

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"

FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TESIS EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

AUTOR: MSC. YURI ALMAGUER CARMENATES
TUTOR: DR. RAFAEL GUARDADO LACABA

MOA, 2005

SÍNTESIS

El presente trabajo titulado "Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda" tiene como objetivo general evaluar los niveles de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda que permita establecer criterios de estabilidad de taludes y laderas y sirva de base para futuras evaluaciones de riesgos para prevenir o mitigar los daños derivados de estos fenómenos.

La metodología empleada parte de la confección del mapa inventario de deslizamientos. La influencia de los factores condicionantes como lito-estructura, tectónica, condiciones hidrogeológicas y geotécnicas, pendiente del terreno y el uso de suelo sobre las inestabilidades, se determina mediante el método estadístico de análisis condicional.

Como resultados se presenta una caracterización de los mecanismos y tipologías de deslizamientos desarrollados en el área. Se realiza una valoración de los factores que influyen en las inestabilidades, haciendo énfasis en las características geotécnicas de la corteza laterítica y se obtiene el mapa de susceptibilidad del terreno para el yacimiento Punta Gorda.

TABLA DE CONTENIDO

Materia	Página
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN	
Base teórica de la investigación.	9
Métodos de estimación de la susceptibilidad del terreno.	15
Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la cartografía de susceptibilidad.	19
La cartografía de susceptibilidad en Cuba.	21
Algunos trabajos recientes de cartografía de susceptibilidad a nivel mundial.	26
Tendencias actuales de la cartografía de susceptibilidad.	28
CAPITULO II. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	
Generalidades.	31
Condiciones geológicas.	32
Condiciones hidrogeológicas.	37
Fenómenos y procesos geodinámicos.	38
Conclusiones.	40
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LA ROTURA	
Introducción.	42
Criterios de inestabilidad.	42
Factores condicionantes utilizados en el análisis de susceptibilidad.	44
Metodología de valoración de la susceptibilidad a la rotura mediante el análisis estadístico.	51
Conclusiones.	55
CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LA ROTURA EN EL YACIMIENTO PUNTA GORDA	
Introducción.	56
Descripción y cartografía de deslizamientos.	56
Clasificación de los deslizamientos.	62
Descripción de los factores que intervienen en el surgimiento de inestabilidades.	66
Valoración y reclasificación de los planos de factores condicionantes.	87
Descripción del plano de susceptibilidad.	90
Conclusiones.	91
CONCLUSIONES	93
RECOMENDACIONES	95

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
ANEXOS

RELACIÓN DE FIGURAS**CAPÍTULO I**

1.1	Presión de poros sobre una superficie de rotura potencial.	11
1.2	Diagrama de esfuerzo-deformación. Resistencia máxima y residual.	12
1.3	Dirección esfuerzos principales en la rotura de un talud.	13
1.4	Envolvente de rotura y círculo de Mohr.	13

CAPÍTULO II

2.1	Ubicación geográfica del área de estudio.	31
2.2	Plano litológico del substrato rocoso del yacimiento Punta Gorda.	41
2.3	Diagrama de roseta del agrietamiento en el yacimiento Punta Gorda.	35
2.4	Diagrama de roseta de fallas en el yacimiento Punta Gorda.	36
2.5	Diagrama de roseta de diques de gabro en el yacimiento Punta Gorda.	37
2.6	Procesos erosivos en taludes del yacimiento Punta Gorda.	39

CAPÍTULO III

3.1	Procedimientos para la caracterización y combinación de factores condicionantes mediante técnicas SIG a través de análisis probabilístico condicional.	53
3.2	Procesos de rasterización y reclasificación para la obtención de planos de susceptibilidad de factores condicionantes.	54
3.3	Metodología empleada en la evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura.	54

CAPÍTULO IV

4.1	Plano inventario de deslizamientos.	59
4.2	Deslizamiento traslacional desarrollado en corteza laterítica.	64
4.3	Deslizamiento rotacional desarrollado en corteza laterítica.	64
4.4	Deslizamiento en cuña desarrollado en corteza laterítica residual.	65
4.5	Diagrama de planos principales de grietas y ladera. Análisis tipológico de movimientos en el caso de estudio 1.	68
4.6	Representación gráfica del movimiento planar. Posición relativa de las familias de grietas y la ladera.	68
4.7	Diagrama de planos principales de grietas y ladera. Análisis tipológico de movimientos en el caso de estudio 2.	69
4.8	Representación gráfica de la rotura por cuña. Posición relativa de las familias de grietas y la ladera.	69
4.9	Características ingeniero-geológicas del perfil de meteorización en el yacimiento Punta Gorda.	77
4.10	Relación de la humedad, límite líquido y la plasticidad en los horizontes	79

	ingeniero-geológicos.	
4.11	Relación entre el FS y la pendiente del terreno para los suelos SM.	81
4.12	Relación entre el FS y la profundidad de la superficie de rotura para suelos SM.	81
4.13	Relación entre el FS y la pendiente del terreno para los suelos MH.	82
4.14	Relación entre el FS y la profundidad de la superficie de rotura para suelos MH.	82
4.15	Relación entre el FS y la pendiente del terreno para los suelos SM (SL).	83
4.16	Relación entre el FS y la profundidad de la superficie de rotura para suelos SM (SL).	83
4.17	Relación entre el FS y la profundidad de la superficie de rotura en el yacimiento Punta Gorda.	84
4.18	Relación entre el FS y la pendiente del terreno en el yacimiento Punta Gorda.	84
4.19	Plano de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda.	92

RELACIÓN DE TABLAS

CAPÍTULO II

2.1	Caracterización de las familias de grietas del macizo rocoso del yacimiento Punta Gorda.	35
2.2	Caracterización de las fallas del macizo rocoso del yacimiento Punta Gorda.	36

CAPÍTULO III

3.1	Relación de factores utilizados en el análisis de susceptibilidad.	44
3.2	Caracterización de los grupos lito-estructurales del yacimiento Punta Gorda.	46

CAPÍTULO IV

4.1	Caracterización de los grupos lito-estructurales en relación al desarrollo de deslizamientos.	67
4.2	Caracterización de las clases de distancia a fallas en relación al desarrollo de deslizamientos.	70
4.3	Caracterización del plano de hidroisohipsas en relación al desarrollo de deslizamientos.	71
4.4	Caracterización del plano de subpresiones de la corteza laterítica en relación al desarrollo de deslizamientos.	72
4.5	Caracterización del plano de pendiente umbral en relación al desarrollo de deslizamientos.	73
4.6	Horizontes ingeniero-geológicos presentes en el yacimiento Punta Gorda.	76

4.7	Resultados del análisis de colapsabilidad de los horizontes ingeniero-geológicos.	78
4.8	Análisis de correlación entre las variables utilizadas en el cálculo del FS.	80
4.9	Factor de seguridad determinado para suelos SM.	80
4.10	Factor de seguridad determinado para suelos MH.	81
4.11	Factor de seguridad determinado para suelos SM (SL).	82
4.12	Análisis de correlación entre variables de cálculo del FS con el método de rotura planar para talud infinito.	84
4.13	Caracterización del plano de tipo de suelo en relación al desarrollo de deslizamientos.	85
4.14	Caracterización del plano de uso de suelo en relación al desarrollo de deslizamientos.	86
4.15	Valoración de los factores condicionantes de las inestabilidades en el yacimiento Punta Gorda.	87
4.16	Resultados del proceso de reclasificación de los planos de susceptibilidad temáticos.	90
4.17	Caracterización del plano de susceptibilidad a la rotura.	91

INTRODUCCION

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han producido cambios profundos en las interrelaciones Hombre–Medio Geológico. El hombre ha provocado una aceleración de los agentes naturales y al mismo tiempo, en el proceso de desarrollo económico, ha generado un cierto grado de vulnerabilidad, aumentando los riesgos de las actividades socioeconómicas de ellas derivadas. Bajo estas condiciones geoambientales, los deslizamientos constituyen un peligro geológico. Por lo general estos tienen lugar en zonas de difícil acceso y poco pobladas lo que provoca impactos a pequeña escala y de poca consideración, a excepción de algunos eventos catastróficos como el de Aberfan en el Reino Unido (Bishop et al., 1969), el del Nevado Huascarán en Perú (Plafker y Ericksen, 1979), el del Mount Sant Helens en Estados Unidos (Voigth et al., 1983) y el de Vaiont en Italia (Shuster, 1996) entre otros. En algunos terremotos recientes los deslizamientos han sido una de las principales causas de daños y pérdidas de vidas humanas (Kobayashi, 1981; Keefer, 1984; Plafker y Galloway, 1989; Schuster, 1996) y otros. La mejor estrategia para reducir los impactos de los deslizamientos es la prevención, la evaluación de la susceptibilidad y riesgos y la adopción de medidas para mitigar los efectos (Corominas, 1992).

Actualmente los avances en las técnicas computacionales y la generación de nuevos software, permiten realizar análisis de riesgos, determinar la susceptibilidad y la vulnerabilidad del terreno a los movimientos de masas de manera mas precisa y confiable. En la actualidad los Sistemas de Información Geográfica (SIG), realizan el análisis de la susceptibilidad a la rotura por deslizamiento, así como la elaboración de mapas de peligrosidad de manera sistemática, rápida y eficiente, tratando con grandes bases de datos y realizando cálculos para la estimación de la susceptibilidad que no eran viables en grandes áreas.

La presente investigación se realiza en el entorno que forma parte de la política ambiental de las Empresas de la Unión del Níquel y del Instituto Superior Minero Metalúrgico, de aplicar el conocimiento teórico en la resolución de problemas prácticos en el medio en el cual se desarrollan.

Problema.

La problemática que se trata consiste en la ocurrencia de deslizamientos de suelos lateríticos en taludes y laderas de los yacimientos de corteza ferroniquelífera, lo cuál genera riesgos debido a la vulnerabilidad de la actividad minera y a la predisposición del terreno frente a estos fenómenos.

Objeto de estudio.

Se seleccionó como objeto de estudio de la presente investigación el yacimiento Punta Gorda, debido a las condiciones ingeniero-geológicas del terreno y la diversidad de factores condicionantes que lo convierten en un laboratorio natural para el análisis de los fenómenos de deslizamientos de suelos lateríticos.

Objetivo general.

Evaluar los niveles de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda 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.

Objetivos específicos.

- Caracterizar los mecanismos y tipologías de deslizamientos desarrollados en el yacimiento Punta Gorda.
- Caracterizar las condiciones ingeniero-geológicas del yacimiento y aplicarlo en el análisis de susceptibilidad.
- Determinar un método de valoración y obtención del plano de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos.

Hipótesis.

Si se conocen la tipologías y mecanismos que gobiernan los deslizamientos, así como la influencia que sobre estos tienen factores condicionantes como tipo de litología, estructura del macizo rocoso, geomorfología, condiciones hidrogeológicas y geotécnicas de la corteza laterítica y el uso de suelo, es posible obtener el plano de susceptibilidad del terreno a la rotura por el desarrollo de deslizamientos en el yacimientos Punta Gorda.

Novedad científica.

La novedad de este trabajo esta dada en la obtención de un plano de susceptibilidad del terreno frente al desarrollo de deslizamientos en un yacimiento de corteza laterítica ferroniquelífera con la aplicación de un Sistema de Información Geográfico.

Aportes científicos.

- Caracterización de los mecanismos y tipologías de deslizamientos desarrollados en el yacimiento Punta Gorda.

- Determinación de la influencia de los grupos lito-estructurales, condiciones estructurales, hidrogeológicas y geotécnicas del macizo rocoso, geomorfología del terreno y el uso actual del suelo sobre el desarrollo de deslizamientos.
- Caracterización del perfil de meteorización desde el punto de vista geotécnico.
- Método de valoración y obtención del plano de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos.

Fundamento metodológico.

En la evaluación del grado de susceptibilidad a la rotura de terrenos frente a deslizamientos se aplican varias aproximaciones. Estas 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 susceptibilidad, obteniendo como resultado los mapas de susceptibilidad.

La metodología aplicada en la investigación esta basada en 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 del yacimiento de corteza laterítica ferroniquelífera Punta Gorda.

Los primeros trabajos realizados para cumplir con el objetivo de la investigación, se relacionan con la descripción de cada movimiento de masa cartografiado en el yacimiento, determinando en cada caso el mecanismo y la tipología desarrollada, las dimensiones, el material involucrado y las condiciones hidrogeológicas. Como resultado, se obtiene el plano inventario de deslizamientos, a través de las técnicas de fotointerpretación y cartografiado de campo, mostrando la distribución areal, los escarpes y dirección de los movimientos.

Los factores condicionantes de las inestabilidades utilizados en la investigación son el factor lito-estructural, tectónico, condiciones hidrogeológicas y geotécnicas, pendiente del terreno y el uso de suelo.

El factor lito-estructural se analiza tomando como base la clasificación propuesta por Nicholson y Hencher (1997). El yacimiento se divide en base a los tipos litológicos, sus características estructurales y al comportamiento o susceptibilidad frente al desarrollo de deslizamientos. De esta forma tenemos materiales con apariencia de suelo en los cuales se manifiesta la estructura de la roca que le dio origen, materiales con apariencia de suelo con estructura sedimentaria, materiales granulares y rocas debilitada tectónicamente. En la

valoración del plano de grupos lito-estructurales se incluye la influencia de los cuerpos de gabros presentes en el yacimiento.

En el factor tectónico, se utiliza información de estructuras como grietas, fallas y diques de gabro. En la investigación se realiza un estudio de la influencia del agrietamiento del macizo rocoso sobre los tipos de mecanismos y tipologías de movimientos. El plano incluido en el análisis de susceptibilidad es el de distancia (buffer) a las fallas presentes el área de estudio.

El factor hidrogeológico se trabaja mediante el análisis del gradiente hidráulico y gradiente crítico, permitiendo la determinación de las áreas más susceptibles al desarrollo del proceso de sifonamiento o tubificación. Esta información se obtuvo a través del plano de hidroisohipsas y las propiedades físicas de los horizontes lateríticos. Se analiza además la influencia de las subpresiones de la corteza laterítica sobre el desarrollo de movimientos.

Desde el punto de vista geotécnico, se realiza un análisis de las propiedades físico-mecánicas en la corteza laterítica, se estudian los horizontes ingeniero-geológicos y se determina su relación con los mecanismos y tipologías de movimientos de masas. Se muestra el análisis del factor de seguridad, a partir del método de cálculo para rotura planar para talud infinito y los métodos de equilibrio límite. El plano, utilizado en la evaluación de la susceptibilidad, es el de tipo de suelo clasificado por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Como característica geomorfológica, se seleccionó la pendiente umbral de deslizamiento, sobre la base del modelo digital del relieve actual del yacimiento. La pendiente umbral se determinó a partir de los reconocimientos de campo realizados en el yacimiento, midiendo la inclinación de la ladera o talud a partir del cuál se desarrolló cada movimiento.

Para integrar en el análisis de susceptibilidad, la influencia antrópica sobre el desarrollo de los movimientos de masas, se utiliza el plano de uso de suelo actual. Éste está clasificado en varias clases relacionadas con las áreas minadas, zonas reforestadas, áreas ocupadas por caminos mineros primarios, depósitos de mineral y las zonas ocupadas por la vegetación natural.

La integración de toda la información en formato digital, tanto de forma areal (planos) como los atributos (datos), se realiza sobre un SIG. La valoración y clasificación de cada plano temático (factores condicionantes), se obtiene mediante el análisis probabilístico condicional. Éste método trata de evaluar la relación probabilística entre los diversos factores relevantes para las condiciones de inestabilidad y las ocurrencias de deslizamientos. Se basa en la

superposición los planos de factores con el plano inventario de deslizamientos, para obtener una probabilidad condicionada de cada factor a la presencia o ausencia de deslizamientos.

Como paso final, se reclasifican los planos temáticos de susceptibilidad, convirtiéndose en formato raster con tamaño de celda 5x5 m, para la obtención del plano resultante de susceptibilidad del yacimiento Punta Gorda.

La aplicación de estos nuevos métodos de cartografía de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo deslizamientos, que ofrecen peligro para la actividad minera y su infraestructura, se traducen en impactos, que se manifiestan tanto a nivel social, ambiental como económico en la Unidad Minera Ernesto Che Guevara.

A nivel social, el impacto que tiene la investigación, se traduce en la existencia de un conjunto de procedimientos metodológicos para el análisis de susceptibilidad del terreno del yacimiento a la rotura en manos de los directivos de la Unidad Básica Minera y del departamento de medio ambiente de dicha entidad, responsables del monitoreo, prevención y corrección de los desastres ocasionados por los deslizamientos.

Además de lo anterior y por la propia necesidad de utilizar avanzadas tecnologías en la implementación de estos métodos de cartografía, se plantea como necesidad urgente la elevación del nivel científico-técnico de los recursos humanos, en relación al uso del sistema de información geográfico obtenido en la investigación. Desde el punto de vista cognoscitivo, relacionado con el desarrollo de la cartografía de susceptibilidad, la investigación forma parte del continuo ascenso del conocimiento, en el que se han incorporado avances científico-técnicos desarrollados a nivel mundial en esta temática.

En el plano ambiental, el presente análisis de susceptibilidad en el área del yacimiento, como método de prevención de desastres, se convierte en una útil herramienta para el ordenamiento medioambiental del área en cuestión. Además, encuentra un amplio campo de acción en la identificación y caracterización de los fenómenos de deslizamientos y evaluación del comportamiento de los terrenos en función del tipo de uso de suelo y de las condiciones naturales inherentes de las cortezas lateríticas, convirtiéndose en una herramienta, además, para controlar, monitorear y evaluar los riesgos asociados al desarrollo de movimientos de masas en los demás yacimientos por explotar por las empresas del níquel.

En el orden económico, el mayor impacto que representa la investigación, es que sirve para prevenir pérdidas económicas considerables en las áreas clasificadas con niveles

relativamente altos de susceptibilidad en función del uso de suelo que se manifieste en el área del yacimiento.

Con anterioridad a este trabajo, el autor ha desarrollado investigaciones relacionadas con la temática como son:

- Proyecto de investigaciones ingeniero-geológicas e hidrogeológicas del yacimiento Punta Gorda. Departamento de geología, (1997).
- Estudio de las condiciones hidro-geomecánicas de los suelos lateríticos y rocas serpentizadas en el yacimiento Punta Gorda. Trabajo de diploma, (1998).
- Análisis estructural del macizo rocoso serpentizado del territorio de Moa y su influencia en los mecanismos y tipologías de movimientos de masas, (1999-2000).
- Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo rocoso serpentizado del territorio de Moa. Tesis de maestría, (2001).
- Cartografía geológica del basamento del yacimiento Punta Gorda a escala 1:2 000. Subprograma del Proyecto de Modelación Geotecnológica de la Empresa Ernesto Che Guevara, Moa (2002).

Publicaciones realizadas por el autor:

Guardado R. y Almaguer Y. “Evaluación de riesgos por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín”. Revista Minería y Geología. XVIII (1): 1-12 p. 2001.

Guardado R., Almaguer, Y., Hernández, Y., Tamayo, J. R. y Pea Guy. “Estabilidad de taludes en suelos lateríticos del yacimiento Punta Gorda aplicando criterios de rotura”. GEOBRASIL (ISSN 1519-5708). 12-24 p. 2001.

Almaguer Y., y Guardado R., “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. Huelva, España. Ediciones Panorama Minero. 69-84 p. 2002.

Guardado R., Almaguer Y. “Rocas y suelos como indicadores ingeniero geológicos y ambientales de estabilidad y sostenibilidad de taludes y laderas”. CD Congreso de Geología Minería. ISBN 959-7117-11-8. 2003.

Almaguer Y., Guardado R. “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. 2003.

Almaguer Y. “Calculo de estabilidad de taludes en cortezas lateríticas”. Memorias del I Taller Internacional Ingeotaludes. Moa. 2003.

- Guardado R. y Almaguer Y., “Mecanismos y tipologías de los movimientos de laderas y taludes en Iberoamérica”. Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Geología. Quito, Ecuador. ISBN 9978-44-206-5. 2005.
- Almaguer Y. “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, Bolivia. Del 6-10, junio 2005.
- Almaguer Y. 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. Del 15-20, agosto, 2005.
- Almaguer Y. “Métodos de cartografía de susceptibilidad y peligrosidad por el desarrollo de deslizamientos”. Memorias del II Taller internacional Ingeotaludes. Moa. 2005.
- Almaguer Y., Guardado R. “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. 2005.
- Almaguer Y., Guardado R. “Caracterización geotécnica del perfil de meteorización de rocas ultrabásicas serpentinizadas en el territorio de Moa”, Cuba. Revista Geología y Minería. 2005.
- Almaguer Y., Guardado R. “Tipologías de movimientos de masas desarrollados en el territorio de Moa, Cuba”. Revista Geología y Minería. 2005.

Trabajos de diploma tutorados:

1. Análisis de estabilidad de taludes en el yacimiento Punta Gorda. Propuesta metodológica para la confección de un GIS. 2002.
2. Evaluación y plan de mitigación de la peligrosidad por movimientos de masas en el yacimiento Punta Gorda, 2003.
3. Cartografía de riesgos por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda. 2004.

Principales premios alcanzados en la actividad investigativa:

- Premio Relevante en el Forum Provincial de Ciencia y Técnica, 1998.
- Mención en el Forum Nacional de Estudiantes de Ciencias Técnicas. Cienfuegos, 1998.
- Segundo premio en el Forum Nacional de Ciencias Naturales, Sociales y Exactas. Habana, 1999.
- Primer Premio en Forum Nacional de Estudiantes de Ciencias Técnicas. Camaguey, 2000.
- Premio Nacional en el Concurso Nacional de las BTJ. 2000.

- Mención Provincial en la Exposición Forjadores del Futuro. Holguín, 2000.
- Premio Provincial en la X Exposición Forjadores del Futuro de las BTJ, 2002.
- Premio Relevante y Destacado en Forum Municipal de Ciencia y Técnica, Moa, 2002.
- Premio Destacado en el Forum Ramal del MES. Habana, 2002.
- Relevante en el Forum de Base del ISMM, 2003.

CAPITULO I

CAPITULO I. MARCO TEORICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN.

Base teórica de la investigación.

Sharpe en 1938 definió los deslizamientos como la caída perceptible o movimiento descendente de una masa relativamente seca de tierra, roca o ambas. Según Lomtadze (1977), es una masa de roca que se ha deslizado o desliza cuesta abajo por la vertiente o talud al efecto de la fuerza de gravedad, presión hidrodinámica, fuerzas sísmicas, etc. Crozier (1986), define un deslizamiento 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. A pesar que el término deslizamiento, se utiliza para movimientos de ladera que se producen a lo largo de una superficie de rotura bien definida, en la presente investigación se utiliza de forma genérica para cualquier tipo de rotura.

En el proceso de deslizamiento, las masas de rocas y suelos siempre se mueven por una o varias superficies de resbalamiento (rotura), que constituye un elemento característico de la estructura de cada deslizamiento. La superficie de resbalamiento, es la superficie por la cual sucede el desprendimiento de la masa deslizable y su deslizamiento o arrastre. También se le llama superficie de rotura (SR) (Lomtadze, 1977).

La forma de la SR en las rocas homogéneas, con mayor frecuencia es cóncava, próxima por su forma, a la superficie cilíndrica redonda. En las rocas heterogéneas, la forma de la SR, se determina por la situación y orientación de las superficies y zonas de debilitamiento en el macizo rocoso que integran la ladera o talud. Estas superficies pueden ser:

- Superficies de rocas firmes o de frontera inferior de rocas fuertemente erosionadas.
- Capas o intercalaciones de rocas débiles (arcillas, argilitas, areniscas arcillosas, margas, etc.)
- Grietas o sistemas de fisuras.
- Superficies de fallas.

La forma de la SR en las rocas heterogéneas también pueden ser cóncavas, pero con mayor frecuencia planas, plano-escalonadas, onduladas o más irregular, como resultado de la combinación y orientación desfavorable de las familias de grietas y otras fronteras (esquistosidad, estratificación, etc.) con respecto a la dirección de las laderas y taludes.

Existen varias clasificaciones de deslizamientos basadas 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):

- 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.
- 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.
- 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 o traslacionales.
- 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.
- 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.

Esfuerzo y resistencia al cortante en el proceso de rotura en un deslizamiento.

La modelación o representación matemática del fenómeno de rotura al cortante en un deslizamiento, se realiza utilizando teorías de la resistencia de materiales (Sowers G. B. et al, 1976; Suárez, 1998). Las rocas y los suelos al fallar al corte, se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la cohesión generalizada de Coulomb:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \varphi \quad (\text{para suelos saturados})$$

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \varphi' + (\mu - \mu_a) \tan \varphi'' \quad (\text{para suelos parcialmente saturados}).$$

Donde:

τ : esfuerzo de resistencia al corte.

c : cohesión.

σ : esfuerzo normal total

μ : presión del agua intersticial o de poros.

μ_a : presión del aire intersticial.

φ' : ángulo de fricción interna del material.

ϕ'' : ángulo de fricción del material no saturado.

El análisis de la ecuación de Coulomb, requiere predefinir los parámetros ángulo de fricción y cohesión, que son propiedades intrínsecas del suelo. La presencia del agua, en las laderas y taludes, reduce el valor de la resistencia del suelo, dependiendo de las presiones internas o de poros de acuerdo a la ecuación, en la cual el factor μ , está resaltando el valor de la presión normal. La presión resultante, se le conoce con el nombre de presión efectiva: σ' (presión efectiva) = $\sigma - \mu$

El ángulo de fricción, es la representación matemática del coeficiente de rozamiento ($\tan \phi$). Depende de varios factores como: tamaño de los granos, forma de los granos, distribución de los tamaños de los granos y densidad (Sowers et al, 1976).

La cohesión, es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión, en mecánica de suelos, es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación. En suelos eminentemente granulares, en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero (0), y se les denomina suelos no cohesivos.

Presión de poros.

La presión de poros es la presión interna del agua de saturación [figura 1.1]. Depende de la localización de los niveles freáticos, presiones internas de los acuíferos y las características geológicas del sitio. Varía de acuerdo a las variaciones del régimen de aguas subterráneas. Los incrementos de presión pueden ocurrir rápidamente en el momento de una lluvia, dependiendo de la intensidad, la rata de infiltración del área tributaria, etc. Un incremento en la presión de poros positiva o una disminución de la presión negativa, equivale a una reducción de la resistencia al cortante y de estabilidad del terreno (Sowers et al, 1976).

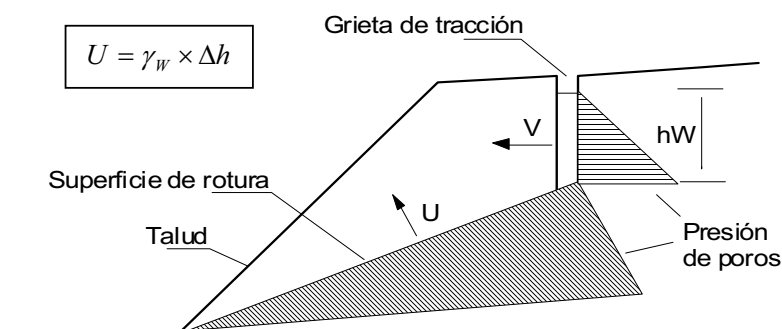


Figura 1.1. Presión de poros sobre una superficie de rotura potencial.

Esfuerzo efectivo.

Una masa de suelo saturada, consiste en dos fases distintas: el esqueleto de partículas y los poros llenos de agua. Cualquier esfuerzo impuesto sobre el suelo, es soportado por el esqueleto y la presión en el agua. Típicamente, el esqueleto puede transmitir esfuerzos normales y de corte por los puntos de contacto entre partículas, y el agua a su vez, ejercer una presión hidrostática, que es igual en todas las direcciones. Los esfuerzos ejercidos por el esqueleto solamente se conocen como esfuerzos efectivos, y los esfuerzos hidrostáticos del agua se les denominan presión de poros. Los esfuerzos efectivos son los que controlan el comportamiento del suelo y no los esfuerzos totales. En problemas prácticos, el análisis con esfuerzos totales podría utilizarse en problemas de estabilidad a corto plazo y las presiones efectivas para analizar la estabilidad a largo plazo.

Resistencia máxima o resistencia pico, es la resistencia al corte máxima, que posee el material que no ha sido fallado previamente. Corresponde al punto más alto en la curva de esfuerzo-deformación. La resistencia residual es la resistencia que posee el material después de haber ocurrido la rotura [figura 1.2].

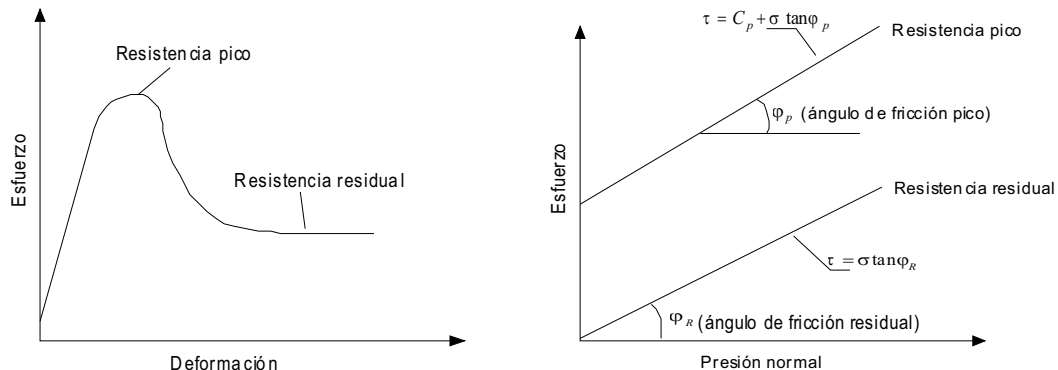


Figura 1.2. Diagrama de esfuerzo-deformación. Resistencia máxima y residual.

En suelos residuales, generalmente predominan las mezclas de partículas granulares y arcillosas, y el ángulo de fricción depende de la proporción grava-arena-limo-arcilla, y de las características de las cada tipo de partícula presente.

Envolvente de rotura.

En un análisis bidimensional, los esfuerzos en un punto, pueden ser representados por un elemento infinitamente pequeño sometido a los esfuerzos σ_x , σ_y y τ_{xy} [figura 1.3]. Si estos esfuerzos se dibujan en un sistema de coordenadas, es posible obtener el círculo de esfuerzos de Mohr.

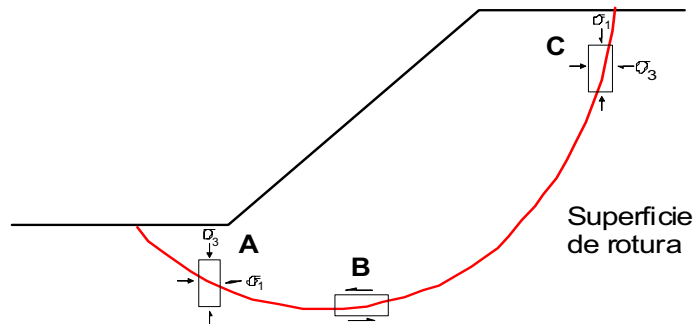


Figura 1.3. Dirección de esfuerzos principales en la rotura de un talud.

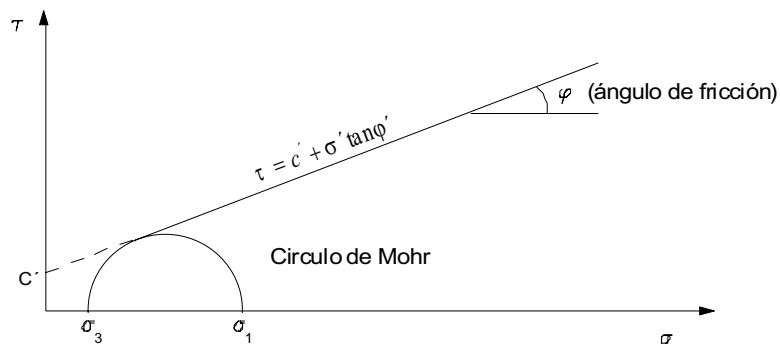


Figura 1.4. Envolvente de rotura y círculo de Mohr.

El círculo de Mohr, se utiliza para representar o describir la resistencia al cortante de los suelos, utilizando la envolvente de rotura Mohr-Coulomb, que significa que se ha alcanzado una combinación crítica de esfuerzos. En la práctica de la geotecnia, la envolvente se define como una recta aproximada dentro de un rango seleccionado de esfuerzos [figura 1.4], definida por la ecuación: $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$.

Factores condicionantes y desencadenantes de la inestabilidad del terreno.

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): factores internos y externos.

Los 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.

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 km² (Keefe, 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.

Análisis de peligrosidad y riesgos. Conceptos y definiciones.

Como se ha comentado los deslizamientos son procesos naturales que conllevan a 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).

Métodos de estimación de la susceptibilidad del terreno.

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 (Hansen, 1984; Hartlén y Viberg, 1988; Corominas, 1987 y 1992; Van Westen, 1993 y 1994; Carrara et al., 1995; y Leroi, 1996). Existen cuatro procedimientos utilizados en la evaluación y confección de mapas de susceptibilidad del terreno: métodos determinísticos, heurísticos, probabilísticos y métodos 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. Los datos de entrada son derivados de ensayos de laboratorio y se utilizan para determinar el factor de seguridad de la ladera. Estos métodos muestran un grado de fiabilidad alto si los

datos son correctos. Su principal inconveniente es su baja idoneidad para zonificaciones rápidas y de extensas áreas (Van Westen, 1993). 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).

Los **métodos heurísticos** se basan en el conocimiento a priori de los factores que producen inestabilidad en el área de estudio. Los factores son ordenados y ponderados según su importancia asumida o esperada en la formación de deslizamientos (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. Un procedimiento de este tipo es el análisis cualitativo basado en combinación de mapas de factores (Lucini, 1973; Stevenson, 1977; Bosi, 1984). 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 análisis heurístico introduce un grado de subjetividad que imposibilita comparar documentos producidos por diferentes autores.

Las **aproximaciones probabilísticas** se basan en las relaciones observadas entre cada factor y la distribución de deslizamientos actual y pasada (Carrara et al., 1995). 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 costo de la adquisición de algunos factores relacionados con la inestabilidad de laderas es el principal inconveniente. 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 para estimar la susceptibilidad, con condiciones geológicas y climáticas homogéneas.

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. La principal ventaja es la validez y detalle del análisis y mapa resultantes, si se realizan por un buen experto. El inconveniente de estos métodos es el alto grado de subjetividad dependiente de la experiencia del autor. 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). Para este tipo de cartografía, que es básica para la mayor parte de las técnicas restantes, resulta de vital importancia la experiencia del experto.

Escalas utilizadas en la cartografía de susceptibilidad.

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). La escala de análisis es uno de los primeros puntos a considerar en un proyecto. De ella depende la metodología utilizada, los factores o datos considerados, la unidad de terreno etc. Se pueden distinguir cuatro escalas (IAEG, 1976; Luzi, 1995) para la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos:

- Escala regional (< 1:100.000).
- Escala media (1:25.000 a 1:50.000).
- Gran escala (1:5.000 a 1:10.000).
- Escala detallada (> 1:5.000) .

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). En la cartografía a gran escala, los mapas 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). La escala detallada es utilizada para evaluar la susceptibilidad de áreas concretas y se utilizan los mismos métodos de la escala anterior (Luzi, 1995).

Parámetros de factores condicionantes utilizados en los análisis de susceptibilidad.

Los parámetros de factores condicionantes utilizados en la literatura para el análisis de la susceptibilidad a los deslizamientos se enumeran a continuación (Gupta y Joshi, 1990; Carrara et al., 1991; Niemann y Howes, 1991; Lopez y Zinck, 1991; Van Westen, 1993; Naranjo et al., 1994; Carrara et al., 1995; Chung et al., 1995; Nagarajan et al., 1998; Borga et al., 1998):

- **Relacionados con la topografía y geometría de la ladera:** elevación, pendiente (en grados o en porcentaje), orientación, convexidad-concavidad de la ladera, convexidad-concavidad en la dirección de máxima pendiente, convexidad-concavidad en la

dirección transversal a la pendiente, rugosidad (diferencia entre pendiente media y pendiente), índice topográfico (área cuenca dividida por la longitud del contorno de la misma).

- *Relacionados con la hidrología:* orden del río más alto en el píxel, densidad de drenaje, distancia a líneas de drenaje, distancia desde ríos de primer orden (segundo, tercer, etc), distancia desde ríos de primer y segundo orden, distancia a las cabeceras de valles, distancia a divisorias de aguas (líneas de cresta), tamaño de cuenca.
- *Relacionados con la geología:* Litología, formaciones-depósitos superficiales, grosor de depósitos superficiales, procesos y formas geomorfológicos, estructura (fallas y alineaciones), magnitud-frecuencia de eventos sísmicos, propiedades geotécnicas del suelo (ángulo de fricción, cohesión, peso específico, etc).
- *Relacionados con el uso del suelo:* vegetación (tipo o densidad), usos del suelo.
- *Relacionados con el clima:* intensidad de lluvia.
- *Relacionados con la estructura y sismicidad:* distancia a fallas principales, distancia a alineaciones, distancia a epicentros sísmicos.
- *relacionados con red viaria o núcleos urbanos:* distancia a carreteras, distancia a ciudades.
- *Relacionados con la hidrogeología:* nivel de agua subterránea, espesor de la zona saturada.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la cartografía de susceptibilidad.

Al realizar la cartografía de una zona, se mezclan dos conceptos: la situación georeferenciada del dato y la información temática (atributo). Estas dos características, la componente espacial y la información temática asociada, configuran la base para entender los Sistemas de Información Geográfica.

Se han realizado varias definiciones en torno a los Sistemas de Información Geográfica (Cebrián y Mark, 1986; Burrough, 1988; Bracken y Webster, 1990; NCGIA, 1990). De manera simple, un Sistema de Información Geográfica se puede contemplar como un conjunto de mapas de la misma porción del territorio, donde un lugar concreto tiene la misma localización en todos los mapas incluidos en el sistema de información. Así es posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas para obtener un mejor conocimiento de esa zona. Un SIG se puede considerar esencialmente como una tecnología (un sistema de *hardware* y *software*) aplicada a la resolución de problemas territoriales (Bosque, 1992; Suárez, 1998). Como programa de ordenador, presenta capacidades específicas con las siguientes funciones: funciones para la entrada de información, funciones para la salida-

representación gráfica y cartográfica de la información, funciones de gestión de la información espacial y funciones analíticas.

Un SIG puede contener varios modelos de datos de los objetos geográficos: el modelo vectorial, el modelo *raster*, el jerárquico-recursivo, etc., todos ellos válidos para los mapas formados por puntos, líneas y polígonos, y preparados para realizar determinadas funciones. También existen modelos de datos espaciales para realizar mapas tridimensionales o de volúmenes (modelo basado en una red de triángulos irregulares).

De esta forma los SIG son una herramienta perfectamente aplicable para realizar el análisis y la posterior cartografía de susceptibilidad, de peligrosidad y/o del riesgo por deslizamientos. El desarrollo de los SIG ha incrementado enormemente la disponibilidad de las técnicas de evaluación de susceptibilidad a deslizamientos y su aplicación (Van Westen, 1994).

Breve recuento histórico sobre los SIG.

Las primeras aplicaciones con prototipos de SIG en zonificación de peligrosidad-susceptibilidad a deslizamientos datan de los años 70 (Newman et al., 1978, Carrara et al., 1978; Huma y Radulescu, 1978 y Radbruch-Hall et al, 1979). En ellas se utilizaba el análisis cualitativo, combinando factores, y el estadístico multivariante. Durante los años 80 el desarrollo comercial de los sistemas SIG, así como la mayor disponibilidad de los ordenadores personales incrementó el uso de los SIG en los análisis de susceptibilidad. Ejemplos de análisis cualitativo se encuentran en Stakenborg (1986), Brabb (1984) y Brabb et al. (1989), y ejemplos de análisis estadístico multivariante se pueden encontrar en Carrara (1983, 1988) y Bernknopf et al (1988). En los años 90, con la oferta comercial y la ampliación de las capacidades de los SIG, han aumentado las aplicaciones sobre el análisis de susceptibilidad a los deslizamientos (Kingsbury et al., 1992; Alzate y Escobar, 1992; Lopez y Zink, 1991; Choubey y Litoria, 1990; Carrara et al 1990, 1991; Chacon et al., 1992). En 1993 van Westen publicó un manual completo sobre la aplicación de un SIG en la zonificación de inestabilidad de laderas.

Inicialmente la mayoría de las aplicaciones de los mapas de susceptibilidad con SIG utilizaban las técnicas basadas en la superposición de mapas (entendidos éstos como factores relacionados con la inestabilidad). Ello sólo permitía comparar cada valor de un mapa en la misma posición espacial (la misma celda de una malla regular de un sistema *raster*). Posteriormente, con la aparición de las operaciones de vecindad, las cuales tienen en cuenta las relaciones espaciales de cada celda con su entorno, se han podido extraer características morfométricas e hidrológicas a partir de un Modelo Digital de Elevaciones. Estas

características (pendiente, orientación, convexidad, líneas de valles y de divisorias de aguas, área cuenca, orden de la red de drenaje, etc.) se pueden utilizar como parámetros para realizar análisis estadísticos univariantes o multivariantes combinando los factores con los deslizamientos (Carrara et al., 1991, 1995; Niemann y Howes, 1991; Campus et al., 2000; Dhakal et al., 2000; Feiznia, 2000; Zêzere et al., 2000; Thurston y Degg, 2000), análisis para modelizar distancias recorridas por caída de bloques (Van Dijke y van Westen, 1990) y análisis para definir la susceptibilidad de alcance por deslizamientos de tipo *debris flow* (Michael-Leiba et al., 2000).

El uso de un SIG también permite reconstruir la topografía previa al deslizamiento como han demostrado Thurston y Degg (2000). Es posible además, realizar la zonificación del peligro de desplazamiento de un gran deslizamiento, llevado a cabo en China por Wu et al. (2000), utilizando un Sistema de Análisis de Información (Yin y Yan, 1987 y 1988). También los modelos determinísticos han experimentado un auge utilizando SIG (Brass et al., 1989; Murphy y Vita-Finzi, 1991; Hammond et al., 1992; Luzi, 1995; Luzi y Pergalani, 1996; Leroi, 1996). Lee et al (2000) han aplicado un modelo de talud infinito, modificado para incluir carga sísmica, para el análisis de la susceptibilidad a deslizamiento de dos zonas de la plataforma marina de California.

La cartografía de susceptibilidad en Cuba.

Durante la ejecución de la investigación se consultaron varios trabajos realizados en diferentes lugares del territorio nacional, así como algunos desarrollados en el municipio de Moa, relacionados con la aplicación de los sistemas de información geográficos en la evaluación de susceptibilidad, peligrosidad o riesgos geológicos y realizados fundamentalmente desde inicios de la década del 90 hasta la fecha.

Muchas de las investigaciones realizadas se han centrado en la cartografía de susceptibilidad de terrenos al desarrollo de fenómenos como la erosión y las inundaciones. En este sentido aparece el trabajo de Vega M. B. (2005), quién realiza una aplicación de un SIG en la obtención de una mapa de erosión de Cuba a escala 1:250 000 a través del análisis de varios factores como la lluvia y la escorrentía, el relieve y las propiedades del suelo, dirección del flujo, y el flujo acumulado. Rodríguez W. y Valcarce R. M. (2005) realizan una evaluación de la susceptibilidad 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.

Otro gran grupo se ha centrado en el análisis de peligrosidad y vulnerabilidad sísmica y caracterización ingeniero-geológica, fundamentalmente en la parte sur de las provincias orientales y en algunas zonas del occidente del país. En este sentido Escobar E. M. (2005) muestra una aplicación de un complejo de métodos geofísicos, como sísmica somera de refracción de tres canales, métodos eléctricos (SEV), georadar GPR, sismómetros y datos aerogeofísicos en la solución de tareas de valoración de vulnerabilidad sísmica. Como resultados obtiene las propiedades físico-mecánicas del suelo en el lugar de emplazamiento de obras industriales, valora los fenómenos geológicos derivados de microsismos inducidos determinando a su vez los factores de amplificación del suelo, su relación con las afectaciones constructivas y las condiciones geológicas imperantes y cartografía las posibles zonas tectónicas anómalas reflejadas por las discontinuidades geológicas a través de los campos físicos.

Chuy T. J. et al (2005) realizan un análisis de los fenómenos naturales en el municipio Guantánamo, su cronología y evaluación de los impactos negativos producidos por estos fenómenos, entre los que se encuentran los sismos, deslizamientos de tierra, rotura de presas, respuesta dinámica de suelos, ciclones tropicales, tornados, lluvias intensas y ácidas, inundaciones, sequías, salinización, desertificación, degradación de suelos, incendios urbanos, incendios forestales y accidentes tecnológicos. En el apartado relacionado con los fenómenos de deslizamientos muestran un análisis de susceptibilidad de varias comunidades en función de los valores de disección vertical y pendiente del terreno pero no se comparan estos con la cantidad o área ocupada por deslizamientos en cada zona estudiada.

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. Noas J. L. y Chuy T. L. (2005) realizan una valoración de la peligrosidad sísmica de la ciudad de Moa. Para esto parten del análisis del entorno sismotectónico regional, de la actividad sísmica y finalmente determinan el peligro sísmico haciendo uso del método del árbol lógico mediante la combinación de los resultados obtenidos en trabajos previos.

González B. E. et al (2005) caracterizan el medio ambiente urbano del asentamiento de Mariel y se identifican los fenómenos geológicos que constituyen amenazas para el territorio estimando los periodos de recurrencia de los mismos y sus áreas de impacto. Realizan la

microzonificación sísmica sobre la base de la geología superficial y el procesamiento y análisis de microsismos de origen antrópico evaluando la vulnerabilidad, que tiene como componentes factores físicos y ambientales, que inciden en la capacidad de respuesta de la población ante un desastre potencial, provocado por fenómenos geológicos peligrosos, y la vulnerabilidad del medio construido, ante eventos sísmicos extremos y deslizamientos de tierra en la Meseta del Mariel. Pedroso I. I. et al (2005) presentan 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 y el medio socio-económico del mismo partiendo de la precisión de los Escenarios de Peligros. El análisis de diferentes datos les 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.

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.

Relacionado específicamente con el cartografiado y predicción de deslizamientos Chang J. L. et al (2003) muestran una aplicación de datos geofísicos regionales como datos γ -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.

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. Mediante este procedimiento confeccionan el mapa del Modelo Digital del Relieve 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 pesaje 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 mas 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. Alfonso H. M. (2005) realiza un mapa de susceptibilidad a los movimientos de laderas mediante la combinación de factores condicionantes y desencadenantes, naturales e inducidos por la actividad humana, haciendo énfasis en los elementos geomorfológicos como las formas del relieve, los gradientes de sus pendientes y las litologías a través de la aplicación de métodos heurísticos.

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. Además, proponen 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.

En el territorio de Moa, el Departamento de geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico, ha realizado varios trabajos geotécnicos, dirigidos a la caracterización ingeniero-geológica de los suelos lateríticos a partir de las propiedades físico-mecánicas de los mismos y la aplicación de clasificaciones geomecánicas para el análisis de la estabilidad de los taludes. Carmenate J. A., (1996) realiza una evaluación y clasificación de los suelos y rocas a partir de las propiedades físico-mecánicas dando como resultado un mapa ingeniero-geológico a escala 1:10 000 y una zonificación de áreas susceptibles a la ocurrencia de fenómenos geológicos exógenos, que constituyen peligros para la población y objetivos económicos, como los deslizamientos, proponiendo medidas para su mitigación, pero de una manera superficial, porque no caracteriza todas las posibles condicionantes del terreno que posibilitan la aparición de movimientos, limitándose solamente a las propiedades físico-mecánicas sin tener en cuenta el factor estructural o uso de suelo del territorio. Rodríguez A. (1999), profundiza en el conocimiento geólogo-tectónico del territorio de Moa, determina los sistemas de estructuras activas y bloques morfotectónicos, caracteriza los movimientos tectónicos contemporáneos y determina su incidencia en los sectores de máximo riesgo de origen tectónico. Como resultado importante confecciona el mapa de riesgos del territorio, donde establece cuatro zonas por su grado de peligrosidad ante los efectos de los procesos tectónicos. Kempena (2000) realiza un estudio de los diferentes peligros y riesgos geoambientales en un sector de la costa de la ciudad de Moa. Implementa un SIG que permite la cartografía del ambiente costero, proporcionando una imagen global de sus potencialidades, grado de deterioro y vulnerabilidad ante procesos naturales y antrópicos.

En el año 1997, ocurre un deslizamiento en un talud de explotación en el yacimiento Punta Gorda. A partir de esta problemática la subdirección de minas de dicha entidad, solicita al departamento de geología realizar un proyecto de investigación en el cuál se contemplara la evaluación de las condiciones geotécnicas y modelación del factor de seguridad de los taludes

dentro del yacimiento. De esta forma se desarrolla el Proyecto de evaluación hidrogeológica e ingeniero-geológica en la mina Ernesto Che Guevara (Dpto de geología, 1998), en el cual se realizan una serie de investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio con vista al análisis de la estabilidad de los taludes. Tales investigaciones se fundamentaron en la aplicación de los métodos de equilibrio límite para el cálculo del factor de seguridad, mientras que la clasificación del macizo se limitó a la aplicación del índice RMR a partir de un estudio preliminar del agrietamiento.

A partir de entonces continúan los estudios para profundizar en el análisis de la naturaleza y tipología de los deslizamientos en corteza laterítica, resultando el trabajo de Guardado R. y Almaguer Y. (2001), donde se presenta una primera aproximación de un mapa de riesgos para el yacimiento Punta Gorda, obtenido a partir de la superposición de varios mapas de factores como la litología, tectónica y pendientes, incluyendo en el análisis un mapa de elementos en riesgo, poniendo énfasis en la situación de los caminos mineros y la ubicación de las excavadoras en los frentes de explotación. El análisis de la influencia de los factores sobre las inestabilidades se realizó mediante la aplicación de métodos heurísticos presentando un mapa de riesgos por bloques de explotación con muy poco detalle para la escala a la cual trabajaron, y el trabajo de Almaguer Y. (2001), donde se aplican métodos de cálculo de estabilidad de taludes utilizando criterios de rotura a partir del estudio integral del agrietamiento del macizo roca-suelo y de la evaluación geomecánica del macizo rocoso serpentizado.

Algunos trabajos recientes de cartografía de susceptibilidad a nivel mundial.

Santacana (2001) realiza el análisis de susceptibilidad de ladera a la rotura por deslizamientos superficiales a escala regional, mediante tratamiento estadístico multivariante de tipo discriminante. El procedimiento de análisis se ha realizado en formato raster (malla regular) y ha considerado las zonas de rotura como celdas inestables. Los factores utilizados están relacionados con la geometría y situación de la ladera, la cuenca vertiente, la vegetación y usos del suelo, la presencia de formación superficial y el espesor de ésta.

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 la 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.

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.

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.

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.

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.

Tendencias actuales de la cartografía de susceptibilidad.

El avance y desarrollo de las tecnologías tanto de los SIG, como la capacidad de las computadoras y los sensores remotos, permiten vislumbrar nuevas tendencias en el análisis de susceptibilidad a los deslizamientos mediante SIG. Dos grandes grupos constituyen las nuevas tendencias: la captura y obtención automática de los datos y la aplicación de Redes Neuronales.

1. Captura y obtención automática de datos.

La obtención rápida y precisa de MDE, así como de otra información relacionada con deslizamientos (factores causantes y detección automática de deslizamientos), son elementos importantes que reducen el tiempo de un proyecto dirigido a esta tarea.

Creación de MDE detallados: Aleotti et al. (2000) han utilizado el altímetro Láser (Airbone Laser Terrain Model, ALTM) creado por Aquater, que es un sistema de escaneado Láser altamente preciso diseñado para recoger datos morfológicos del terreno en coordenadas XYZ. La resolución espacial depende de la elevación y velocidad del avión oscilando entre 40 cm a 300 m de elevación y hasta 7 m a 1200 m de altitud. Permite crear un MDE caracterizado por una alta densidad de puntos de altitud, precisión geométrica alta y disponibilidad inmediata de los datos adquiridos y entrada en un SIG.

Detección automática de deslizamientos: Las imágenes de sensores remotos (fotografías aéreas, imágenes de satélite e imágenes de radar) constituyen una fuente de información en la estimación de la susceptibilidad a roturas de laderas. Las fotografías aéreas son el producto más utilizado dentro de los sensores remotos, mediante la técnica de fotointerpretación. Las imágenes de satélite se han utilizado desde mediados de los 70 en el estudio de deslizamientos (Mantovani et al., 1996). En las últimas décadas diversos autores han utilizado imágenes de sensores remotos (LANDSAT I, SPOT, etc.) para identificar movimientos de masa (Scanvic et al., 1990), aunque en todos estos casos los deslizamientos no son reconocidos individualmente a partir de las imágenes, si no que son detectados a partir de las condiciones del terreno asociadas con ellos, como litología y diferencias en la vegetación y la humedad del suelo (Mantovani et al., 1982).

Reconstrucción de la topografía previa al deslizamiento: Thurston y Degg (2000) han reconstruido la topografía previa a unos deslizamientos mediante el uso de un área de influencia (*buffer*) alrededor de un deslizamiento, utilizando la elevación de algunos puntos de este para interpolar, con una Red de Triángulos Irregulares (*TIN*), la superficie del terreno previa del área del deslizamiento (figura 1.6). Según los autores esto es posible en el caso de disponer de un buen MDE con una resolución adecuada al tamaño de los deslizamientos.

2. Aplicación de Redes Neuronales Artificiales.

Los procesos geológicos dependen de una gran variedad de parámetros, que a menudo son conocidos de forma incompleta o totalmente desconocidos. Normalmente la relación entre los factores que controlan el proceso y la observación de éste es una relación no lineal. Las técnicas estadísticas normalmente utilizadas para analizar los deslizamientos (regresión múltiple, análisis discriminante y factorial, predicción lineal, etc) requieren una relación lineal

entre los parámetros del modelo y las observaciones. Una alternativa a los métodos basados en estadística lineal son las técnicas desarrolladas en el contexto de la Inteligencia Artificial sobre todo las Redes Neuronales Artificiales (ANN *Artificial Neural Networks*) del tipo de perceptrones multicapa (MLP *multilayer perceptrons*) que intentan emular el reconocimiento humano y están basadas en un modelo del cerebro humano utilizando ciertos conceptos de su estructura básica.

Las Redes Neuronales Artificiales han sido aplicadas con éxito en el reconocimiento de objetos militares, procesamiento de imágenes, control de robots y en ingeniería civil (Pande y Petruszczak, 1995; Siriwardane y Zaman, 1994). También se han aplicado en problemas de inversión y clasificación en geofísica (Langer et al., 1996). La utilización de redes neuronales para predecir desplazamientos y velocidades de movimientos de ladera ha sido utilizada por Mayoraz et al. (1996) en dos deslizamientos de Suiza y Francia. Vulliet y Mayoraz (2000) han utilizado Redes Neuronales y un modelo mecánico (talud infinito) para predecir el Factor de Seguridad, velocidad de desplazamiento y presiones de poros en un deslizamiento instrumentado en Francia.

CAPITULO II

CAPITULO II. CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO.

Generalidades.

El yacimiento Punta Gorda se encuentra dentro del municipio de Moa, ubicado en el extremo oriental de la provincia de Holguín. Geográficamente se encuentra limitado al norte por el Océano Atlántico, la carretera de Punta Gorda 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 con el yacimiento Moa Oriental, separado de este por el límite natural del 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 2.1].

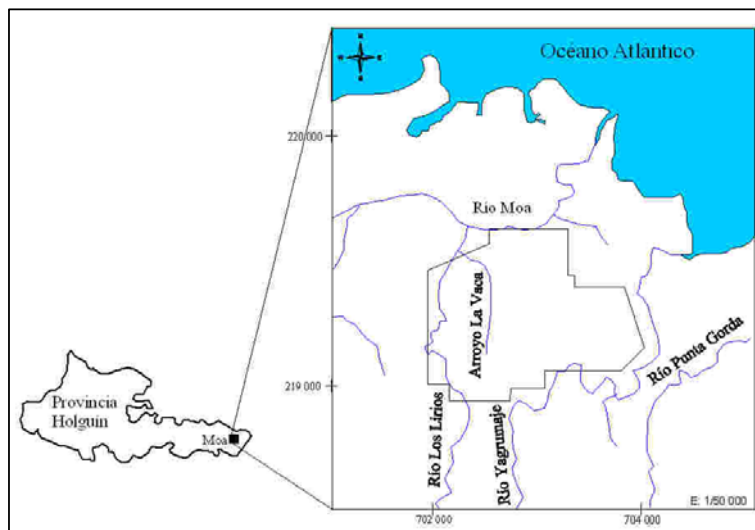


Figura 2.1. Ubicación geográfica del área de estudio.

El área de estudio forma parte del grupo orográfico Sagua-Baracoa, lo cual hace que el relieve sea predominantemente montañoso, principalmente hacia el sur. Hacia el norte el relieve se hace más suave, disminuyendo gradualmente hacia la costa [Anexo I (figura 2.1)].

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, formando 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 hasta 20 m al norte y nordeste. La divisoria del río Yagrumaje presenta cotas que van de 174 m hasta 134 m con una cima plana a suavemente ondulada.

El clima es tropical con abundantes precipitaciones, estando estrechamente relacionadas con el relieve montañoso que se desarrolla en la región y la dirección de los vientos alisios provenientes del Océano Atlántico cargado de humedad. En el período de 1916-1963, la temperatura media anual oscilaba entre 20° y 25°C, el promedio de precipitaciones anuales entre 1200-1400 mm y la evaporación media anual entre 1400-1750 y hasta 1985 la temperatura media anual estuvo entre 22° y 33°C, el promedio de precipitaciones entre 1600-2200 mm y la evaporación media anual entre 2200-2400 mm (Oliva et al, 1989). Desde 1985 al 1991, según la estación hidrometeorológica El Sitio y datos pluviométricos de la estación Vista Alegre, la temperatura media anual osciló entre 22.6° – 30.5°C, siendo los meses más calurosos los de julio, agosto y septiembre y los más fríos enero y febrero; el promedio de precipitaciones anuales entre 1231-5212 mm, siendo los meses más lluviosos noviembre y diciembre y los más secos marzo, julio y agosto; la evaporación media anual oscila entre 1880-7134 mm.

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 destaca los mangles.

Para la caracterización desde el punto de vista regional del territorio, se consultaron los trabajos de Iturralde-Vinent (1983, 1990), Lewis et al (1990), Morris (1990), Campos (1991), Rodríguez (1983, 1998). El área de estudio se relaciona, desde el punto de vista regional, al 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 yacimiento Punta Gorda se encuentra ubicado en el Bloque El Toldo, el cuál ha manifestado los máximos levantamientos relativos de la región (Rodríguez, 1998). 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.

Condiciones geológicas.

En el yacimiento Punta Gorda se encuentran tres grandes conjuntos litológicos: el basamento, la corteza de meteorización laterítica y lateritas redepositadas.

Basamento. En el basamento se revela una alta complejidad tectónica y mediana complejidad litológica [Figura 2.2]. La litología que predomina es la peridotita serpentizada en mayor o menor grado. De acuerdo a estudios anteriores y a las observaciones de campo, las peridotitas presentes son harzburgitas de color azul verdoso oscuro, con contenido variable de piroxenos rómbicos y olivino. En menor grado aparecen piroxenos monoclinicos. Tanto los piroxenos como el olivino han sido transformados a minerales del grupo de la serpentina, siendo ocasional la presencia de relictos de los minerales primarios (Quintas et al, 2002; Almaguer et al, 2005).

En el área se localizan fajas de serpentinita foliada, esquistosa y budinada, que coinciden con las zonas de contacto entre mantos tectónicos imbricados. Las fajas deformadas están completamente cortadas y desplazadas por varios sistemas de fallas más jóvenes. Las budinas, fundamentalmente son de peridotitas, que se presentan fracturadas y rodeadas por serpentinitas esquistosas. Estas fajas se orientan preferentemente al N60°E.

Se observan algunas tendencias distributivas entre las áreas con peridotitas y las que contienen las fajas de micromelanges (serpentinitas foliadas y budinadas), presentándose dos áreas relativamente pequeñas con predominio de peridotitas: al sudoeste y centro norte, mientras que, ocupando la porción central y el borde oriental y norte del yacimiento se alternan las peridotitas con fajas de micromelanges. La zona central se caracteriza por presentar la forma de un gran arco cóncavo hacia el norte. Las fajas foliadas contenedoras de gabro, aunque ocupan áreas relativamente pequeñas, producen una corteza contaminada, caracterizada por el aumento de sílice y alúmina y la disminución de hierro, níquel y cobalto.

Corteza de meteorización. Está desarrollada principalmente sobre peridotitas de tipo harzburgitas serpentizadas en distinto grado y por serpentinitas, las cuales ocupan la mayor parte del yacimiento y en menor grado por material friable producto del intemperismo químico de gabro olivínico, plagioclasita y anfíbolita, ubicado el primero hacia las zonas este y norte del yacimiento y los otros dos tipos de corteza hacia la parte este del depósito mineral. Las litologías que conforman el perfil friable son, de arriba hacia abajo (Quintas et al, 2002)):

- Litología 1: Ocre estructural con concreciones ferruginosas(OIC). Presentan color pardo oscuro con concreciones ferruginosas que aumentan de tamaño hacia la superficie donde forman bloques de distintas dimensiones y forma.
- Litología 2: Ocre inestructural sin concreciones ferruginosas (OI). Presenta color pardo oscuro.
- Litología 3: Ocre estructural final (OEF). Se caracteriza por sus estructuras terrosas y color pardo amarillento hasta amarillo, se distingue la estructura de la roca madre.

- Litología 4: Ocre estructural inicial (OEI). Se caracteriza por su color amarillento, pasando en algunos lugares a colores rojizos y verdosos cerca del límite inferior de la litología. Se reconoce la estructura de la roca madre que le dio origen.
- Litología 5: Serpentina lixiviada (SL). Las rocas como regla están manchadas de ocre. La ocretización se observa en forma de manchas de los hidróxidos de hierro. El grado de intemperismo es irregular y las más intemperizadas están representadas por rocas claras donde en forma de una red de vetillas tiene lugar la serpentización. Son rocas friables y ligeramente compactas de color gris verdoso las cuales conservan la estructura de la roca madre.
- Litología 6: Corteza a partir de gabros (CG). Son materiales arcillosos de color pardo lustroso de diferentes tonalidades (desde pardo oscuro brillante hasta colores ladrillo y crema). Estos materiales son pobres en hierro, níquel y cobalto con contenidos perjudiciales al proceso de sílice y aluminio. Esta litología está presente en la parte este del yacimiento y en menor proporción en su parte norte.

Lateritas Redepositadas. Los redepositos están presentes hacia el norte y este con una distribución discontinua. Los materiales que lo componen, tuvieron su fuente de suministro en terrenos donde existió una corteza friable desarrollada, lo que determinó que las litologías presentes en este conjunto tengan alguna semejanza a las capas componentes del perfil friable. Básicamente están formados 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. Internamente esta secuencia presenta varios ciclos erosivos-acumulativos, marcado por discordancias erosivas intraformacionales. Por lo general estos depósitos están estratificados, pudiéndose observar estratificación paralela y cruzada. El buzamiento de las secuencias es suave hacia el norte y nordeste.

Condiciones estructurales.

Agrietamiento. En el estudio del agrietamiento se midieron un total de 1255 elementos de yacencia de grietas, fallas, diques y foliación primaria y se hizo la caracterización de las grietas teniendo en cuenta la densidad, relleno, tipo de grieta y algunos elementos de las superficies.

Como se observa en el diagrama de roseta [figura 2.3], 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.

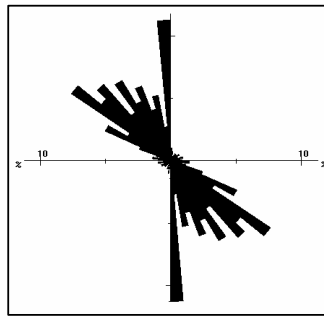


Figura 2.3. Diagrama de roseta del agrietamiento en el yacimiento Punta Gorda.

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 serpentínico [tabla 2.1]. 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 4, acimut de buzamiento 226° , buzamiento horizontal relacionado con zonas de contacto entre mantos tectónicos; familia 1, acimut 63° y buzamiento 45° y 268° con buzamiento 41° , probablemente asociado a los sistemas de fallas de desplazamiento por el rumbo con dirección NW; familia 2, acimut 15° , buzamiento 89° y acimut 42° buzamiento 88° , están relacionadas con los sistemas de fallas NW y NE que desplazan a los de la familia 1 y 4 pero que no son predominantes en el yacimiento.

Tabla 2.1. Caracterización de las familias de grietas del macizo rocoso del yacimiento Punta Gorda.

No. Fam.	Acimut de buzamiento	Buzamiento	Densidad	Relleno	Tipo	Superficie
1	63	45	Moderada – alta	Material serpentínico	75% abierta 25% cerrada	10% rugosa 2% cizalla
2	158	89	Alta	Material serpentínico. 5% garnierita	70% abierta 30% cerrada	15% ondulada lisa 20% rugosa
3	42	88	Moderada – alta	Material serpentínico. 5% garnierita	80% abierta 20% cerrada	20% rugosa 5% ondulada lisa
4	226	2	Moderada – alta	Material serpentínico	75% abierta 25% cerrada	10% rugosa 2% lisa
5	268	41	Moderada	Material serpentínico	80% abierta 20% cerrada	15% rugosa 5% cizalla

Sistemas de fallas. Fueron reveladas varias estructuras disyuntivas de desplazamiento las cuales se manifiestan en cuatro direcciones principales: NS, EW, N45°E y N55°W (figura 2.4).

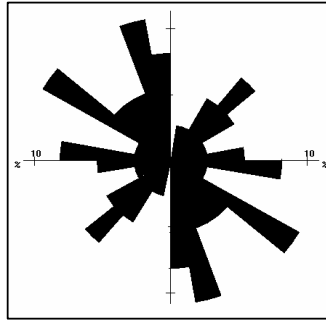


Figura 2.4. Diagrama de roseta de fallas en el yacimiento Punta Gorda.

El sistema con tendencia al rumbo EW, es horizontal [tabla 2.2], 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. Todos los sistemas presentan mineralización de material serpentínico y garnierita.

Tabla 2.2. Caracterización de las fallas del macizo rocoso del yacimiento Punta Gorda.

No. Falla	Acimut de buzamiento	Buzamiento	Densidad del agrietamiento	Relleno	Observaciones
1	267	90	70% alta 30% muy alta	Serpentina y garnierita	Microfalla Trituración
2	329	39	40% alta 20% moderada	Serpentina	Activa
3	37	30	75% alta 25% moderada	Serpentina	Microfalla Cizalla
4	360	1	50% moderada 50% muy alta	Serpentina y garnierita	

Diques de gabros. En el estudio de los diques de gabro se determinó una dirección predominante N55°E, además se presentan otras de menor frecuencia con rumbos NS, N 55°W, E-W, N 75°E [figura 2.5]. El buzamiento de los diques es hacia el W, NW y un sistema vertical.

Foliación primaria de granos minerales. Para el área del yacimiento, se reporta una dirección preferencial de la foliación de granos de piroxenos N45°W.

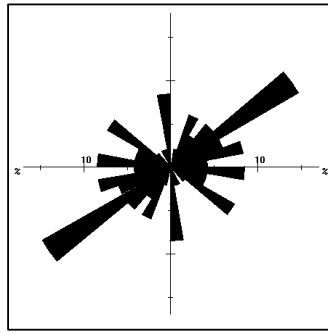


Figura 2.5. Diagrama de roseta de diques de gabro en el yacimiento Punta Gorda.

Condiciones hidrogeológicas.

Las aguas subterráneas del yacimiento Punta Gorda 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° y 31.7° (De Miguel, 1997, 2004; Blanco et al, 2004).

Las rocas acuíferas (serpentinitas agrietadas), presentan un importante flujo por la zona del contacto con la corteza impermeable, donde se produce el movimiento lateral del agua, mientras que en las lateritas, con algunas excepciones (en los OIC y redepósitos), el movimiento del agua es fundamentalmente de ascenso capilar, que varían entre 0.0 m a 25.5 m, correspondiendo los mayores valores al corte completo, inalterado aun por el laboreo minero. La profundidad de las aguas subterráneas se encuentran entre 0 y 27.4 m, correspondiente el nivel 0 a los cursos de aguas corrientes superficiales y a las excavaciones mineras que han descubierto las aguas subterráneas (De Miguel et al, 1998; De Miguel, 2004; Blanco et al, 2004).

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.

Los valores de la potencia acuífera se manifiestan entre 0 y 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.

Procesos geodinámicos y antrópicos.

a) Meteorización.

Es el fenómeno físico-geológico más importante en el área de estudio. Está vinculado con la formación de potentes cortezas lateríticas sobre rocas ultrabásicas y básicas. Las condiciones climáticas, geomorfológicas, tectónicas y características mineralógicas de las rocas existentes favorecieron los procesos de meteorización química del medio.

b) Movimientos de masas.

Este proceso está vinculado a los movimientos de laderas naturales y taludes generados por el proceso minero extractivo. Los mecanismos de rotura y las tipologías de los movimientos de masas desarrollados en las cortezas residuales, están condicionados por las características estructurales del macizo rocoso, aunque en las zonas de desarrollo de cortezas redepositadas, las condiciones geotécnicas de los materiales inciden con más fuerza sobre el tipo de movimiento. Las propias condiciones naturales de las cortezas lateríticas como alta humedad, granulometría muy fina, altos contenidos de minerales arcillosos, baja permeabilidad, así como la intensa actividad sismo-tectónica en la región y elevados índices pluviométricos, hacen que este fenómeno sea muy común y se convierta en un peligro latente, capaz de generar grandes riesgos no solo en la actividad minera sino en otros sectores del territorio. Un catalizador de este fenómeno es la propia actividad minera, que deja descubierta grandes áreas, sin cobertura vegetal, y genera taludes con grandes pendientes.

c) Erosión.

Es un fenómeno muy difundido en el yacimiento Punta Gorda. Es un proceso, que aunque se produce de forma natural en la potente corteza laterítica, se ha visto incrementado por la actividad antrópica, vinculada a la minería a cielo abierto y a la deforestación. La erosión laminar, que se desarrolla sobre la superficie de la corteza laterítica, arrastra las partículas fundamentalmente hacia la zona norte del yacimiento, donde el relieve es menos elevado, además de dirigirse hacia los cauces de los drenes naturales representados por el río Yagrumaje, Los Lirios y el arroyo la Vaca. Se observa además, un amplio desarrollo del arcavamiento, que aumentan sus dimensiones rápidamente en el tiempo (figura 2.6). La dirección de las cárcavas está condicionada fundamentalmente por las condiciones estructurales de los suelos residuales.

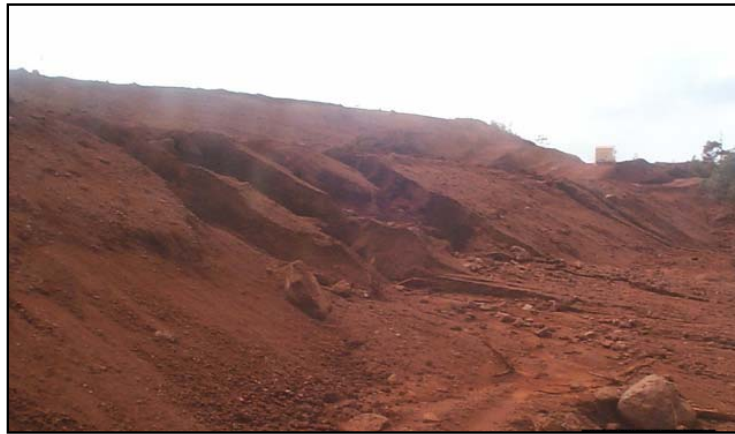


Figura 2.6. Procesos erosivos en taludes del yacimiento Punta Gorda (cortesía de subdirección de minas de UBM Ernesto Che Guevara).

d) Sismicidad.

Por la posición geólogo-estructural que tiene el municipio de Moa, de estar bordeada por tres zonas sismogeneradoras coincidentes con fallas profundas que constituyen límites entre o interplacas, lo ubican dentro del contexto sismotectónico de Cuba Oriental (Oliva et al, 1989). Estas tres zonas son:

- Zona sismogeneradora Oriente: Está asociada a la falla transcurrente Bartlett-Caimán de dirección este-oeste. Constituye el límite entre la placa Norteamericana y Caribeña. A esta zona corresponde la más alta sismicidad de toda Cuba y con ella se encuentran asociados los terremotos de mayor intensidad con epicentros en el archipiélago cubano. La intensidad máxima pronóstico promedio para la zona es de VIII grados en la escala MSK, llegando hasta IX en el sector Santiago-Guantánamo. La magnitud máxima es de 8 grados en la escala Richter.

- Zona sismogeneradora Cauto-Nipe: Está asociada a la zona de fractura de igual nombre, con dirección suroeste-noreste desde las inmediaciones de Niquero hasta la bahía de Nipe. Constituye un límite ínter placa, que separa al Bloque Oriental Cubano del resto de la isla. La potencialidad sísmica de esta zona alcanza los 7 grados en la escala Richter, mientras que la intensidad sísmica, según el mapa complejo de la Región Oriental de Cuba señala valores entre VI y VII grados MSK.

- Zona sismogeneradora Sabana: Se encuentra asociada a la falla Sabana (falla Norte Cubana) o zona de sutura entre el Bloque Oriental Cubano y la Placa Norteamericana. La potencialidad sísmica es variable en el rango de VI a VII grados MSK, alcanzando sus máximos valores hacia su extremo oriental. Los principales focos sísmicos de la zona se localizan en los puntos de intersección de ésta con las fallas de dirección noreste y noroeste que la cortan.

e) Actividad antrópica.

La actividad antrópica desarrollada en el yacimiento Punta Gorda esta representada por la actividad minera. La minería se desarrolla en varias etapas que afectan en mayor o menor grado el entorno. Primeramente se desarrollan actividades de destape de las menas lateríticas, eliminando la cobertura vegetal. En esta etapa, y producto a las grandes precipitaciones, se generan arrastres de grandes volúmenes de sedimentos hacia los cauces de los ríos y arroyos. Luego continúa la actividad extractiva, que genera una cantidad considerable de taludes con pendientes elevadas, relacionados con los frentes de explotación y la construcción de caminos mineros. Además, otro de los elementos negativos es la formación de embalses de aguas en áreas internas del yacimiento. Como actividad paralela, se realiza la formación de escombreras, con los materiales estériles donde se desarrolla el proceso de reforestación y restauración. Sin embargo, en ocasiones estos sitios no se construyen con parámetros de altura, pendiente de los taludes y compactaciones muy óptimas para su conservación en el tiempo. No obstante, como política ambiental, se le ha prestado mayor atención en los últimos años, mejorando los parámetros de construcción y aumentando las áreas reforestadas, disminuyendo de esta forma la exposición de las áreas a los agentes erosivos.

Conclusiones.

- Las condiciones geológicas del yacimiento, caracterizadas por la presencia, en superficie, de cortezas lateríticas ferroniquelíferas residuales y redepositadas, en las cuales se manifiesta agrietamiento relíctico e intercalaciones de diques de arcillas formadas por descomposición de gabros, y por la presencia de un substrato rocoso formado por peridotitas serpentinizadas y en menor medida por gabro, intensamente tectonizados, se convierten en factores condicionales para el desarrollo procesos erosivos y de deslizamientos.
- La caracterización hidrogeológica del área de estudio dada por la presencia de un acuífero agrietado en el contacto corteza laterítica-substrato rocoso, y por horizontes de suelo con gran capacidad de almacenaje, con baja permeabilidad condicionan en gran medida la ocurrencia de inestabilidades en taludes y laderas del yacimiento.

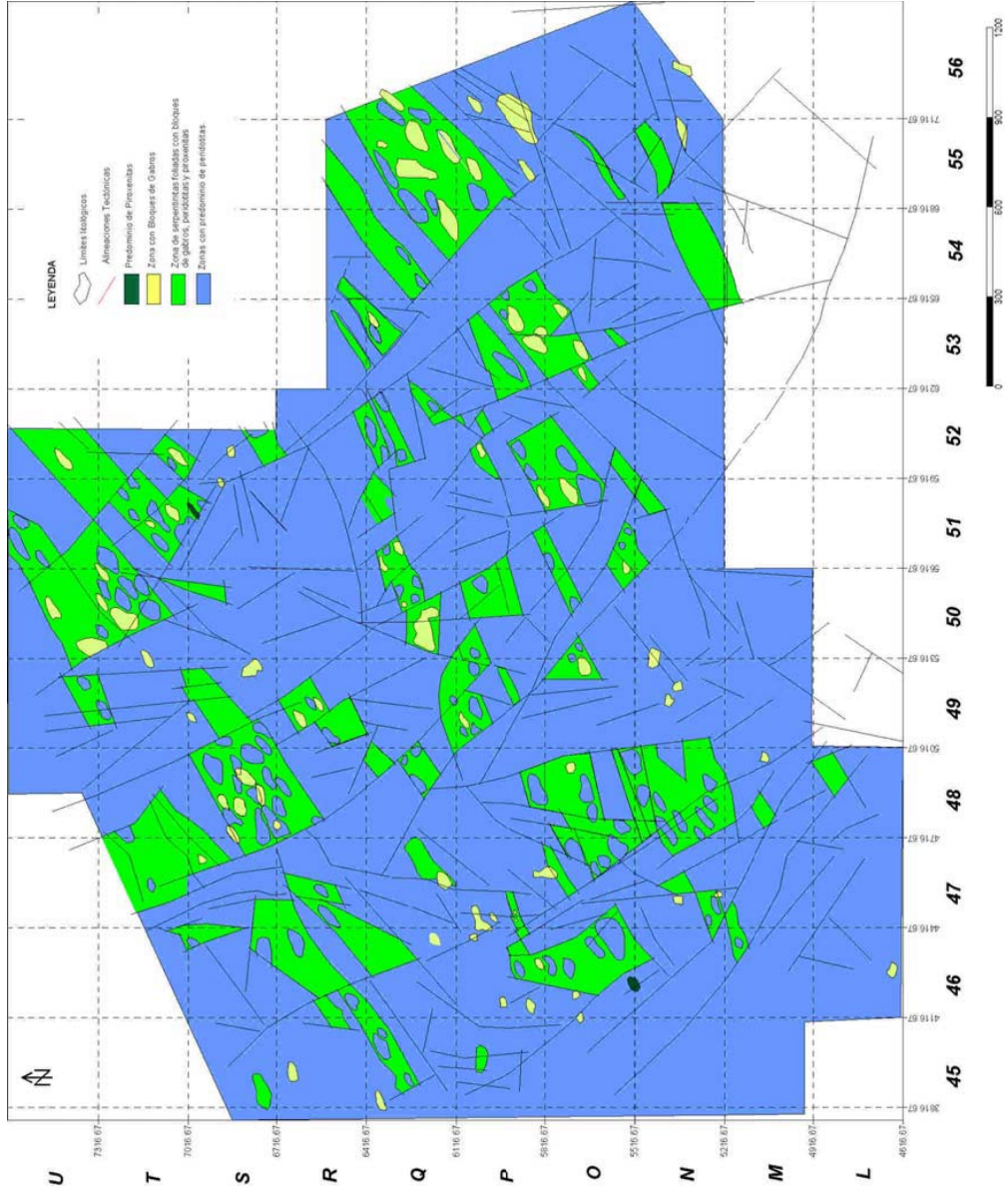


Figura 2.2. Plano litológico del substrato rocoso del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000). Quintas et al (2002).

CAPITULO III

CAPITULO III. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LA ROTURA.

Introducción.

En el presente capítulo se describe la metodología aplicada en la investigación para la valoración de los niveles de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos. Se parte de criterios de inestabilidad y de una hipótesis de rotura definida a partir de las características propias del yacimiento y de los factores que influyen en las inestabilidades observados en las campañas de reconocimiento e inventario de los movimientos. Se describe el procedimiento utilizado en el análisis de cada factor condicionante y el método y modelo estadístico empleado en la valoración de la influencia de cada factor sobre el desarrollo de deslizamientos y la obtención del plano final de susceptibilidad.

Criterios de inestabilidad.

Cada superficie de rotura en la corteza laterítica condiciona la destrucción de la ladera o talud. Este fenómeno ocurre fundamentalmente por efecto de la gravedad, y solo es posible cuando el componente de dislocación de dicha fuerza supera la resistencia del suelo en su conjunto, o cuando resulta alterado el equilibrio límite ($\tau = c + \sigma \tan \varphi$) por las superficies preexistentes o potenciales (Sowers et al, 1976; Lomtadze, 1977). En este caso el factor de seguridad será menos que uno, es decir:

$$1 > FS = \frac{c + \tan \varphi \sum \sigma}{\sum \tau}$$

Donde FS es el factor de seguridad igual a la relación entre las fuerzas resistentes al movimiento y la suma de las fuerzas movilizadoras a lo largo de la superficie de deslizamiento.

De lo dicho anteriormente se desprende que en toda ladera o talud, obligatoriamente actúan los esfuerzos de ruptura debido a las fuerzas gravitacionales, no obstante, en estas condiciones no siempre pueden formarse deslizamientos porque requieren de ciertas causas de alteración del equilibrio de las masas de rocas y la acción del efecto de las fuerzas de ruptura (Lomtadze, 1977). Las principales causas condicionales de inestabilidades se enumeran a continuación:

- Aumento de la pendiente del talud o ladera por cortes, laboreo o derrubio.
- Disminución de la resistencia de las rocas a consecuencia del cambio de su estado físico, al humectar, hinchar, descompactar, erosionar, alterar su constitución natural, así como el desarrollo de fenómenos de flujos subterráneos en las rocas y suelos.

- La acción de las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas sobre las rocas y suelos que causan el desarrollo de deformaciones de filtración (erosión subterránea, abultamiento del suelo, transición al estado de fluencia, etc.)
- La variación del estado tensional de las rocas y suelos en la zona de formación de la ladera o construcción del talud.
- Los efectos exteriores: sobrecarga de la ladera o talud, así como de sus tramos adyacentes a sus bordes, las oscilaciones microsísmicas y sísmicas, etc.

Tomando como base los elementos citados anteriormente y la experiencia manifiesta sobre el conocimiento de los deslizamientos en el área del yacimiento Punta Gorda, se parte de una hipótesis de trabajo para realizar el análisis de susceptibilidad a la rotura por deslizamiento que permite orientar la selección de los parámetros que caracterizan las laderas así como su tratamiento y posterior interpretación. La hipótesis parte de un modelo con las siguientes condiciones (Almaguer, 2005):

- La base de los taludes y las laderas está constituido por un substrato rocoso impermeable compuesto por rocas ultrabásicas serpentinizadas y en menor medida por básicas. Sobre éste yace, en la mayor parte del yacimiento, 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 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 yacimiento.

De esta forma, en los lugares que converjan todas estas condicionantes, fallas, intenso agrietamiento, altas subpresiones en la corteza y presencia de intercalaciones de arcillas formadas a partir de la descomposición de gabros, se deben manifestar roturas o inestabilidades.

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, la experiencia y las consultas con los especialistas de la Unidad Básica Minera Ernesto Guevara, se seleccionaron los factores utilizados en el análisis de susceptibilidad para su tratamiento mediante técnicas estadísticas [tabla 3.1]. La utilización combinada de estos factores genera un plano residual, que explica que lugares son mas 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.

Los factores utilizados en el análisis de susceptibilidad y comparados con el inventario de movimientos son (Almaguer 2005, 2005a, 2005b):

1. Factor litológico.
2. Factor estructural.
3. Factor hidrogeológico.
4. Factor geotécnico.
5. Factor geomorfológico.
6. Factor de uso de suelo.

Tabla 3.1. 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
			Factor geotécnico	Propiedades físico- mecánicas, tipo de suelo, factor de seguridad.
		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

Inventario de deslizamientos.

El inventario se confeccionó a partir de varias campañas de reconocimiento, a escala 1:2 000, ejecutadas desde el año 1997, en las cuales se describieron todos los deslizamientos desarrollados en el área del yacimiento Punta Gorda. Para esto se recorrieron las áreas minadas y no minadas, las áreas reforestadas, y los cauces de los ríos Los Lirios, Yagrumaje y arroyo

La Vaca. Para perfeccionar el cartografiado de los movimientos, fundamentalmente los de mayor extensión, se utilizó la técnica de interpretación fotogeológica con fotos 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 elongadas.
- 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.

Para facilitar la documentación de los deslizamientos en los taludes y laderas se confeccionó una ficha en la cual se incluye la ubicación geográfica del punto, las dimensiones de los deslizamientos y del talud, la pendiente del escarpe del movimiento y del talud, las condiciones hidrogeológicas y tectónicas. Además, se incluye el tipo de material rocoso, la potencia y yacencia y un croquis del deslizamiento [Anexo II, tabla 2.1].

Factor litológico.

En el análisis del factor litológico, se trabajó a partir de la clasificación de las rocas, propuesta por Nicholson y Hencher (1997), de acuerdo a grupos lito-estructurales, teniendo en cuenta sus susceptibilidades, resistencia y características litológicas [tabla 3.2]. El yacimiento se clasificó en cuatro clases de grupos lito-estructurales: 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.

Factor estructural.

Las estructuras seleccionadas para el análisis de este factor fueron las grietas, fallas y diques de gabros. Las grietas fueron medidas en cada afloramiento natural o artificial y en los cauces de los ríos y arroyos presentes en el área del yacimiento. Además de obtener los elementos de yacencia (5200 mediciones), se midieron varios parámetros como abertura, espaciamiento,

tipo de relleno, consistencia del relleno, continuidad, condiciones hidrogeológicas y característica de la superficie de la grieta.

Tabla 3.2. Caracterización de los grupos lito-estructurales del yacimiento Punta Gorda (modificado de Nicholson y Hencher, 1997).

		Factor litológico	
	Grupos lito-estructurales	litologías	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)	Son susceptibles a la erosión fluvial.

La información de las fallas se obtuvo de varias investigaciones realizadas en el área, reconocimiento de campo, análisis fotogeológico y por procesamiento del modelo digital del terreno (MDT) de superficie y del relieve del substrato rocoso. Este último sirvió para detectar estructuras enmascaradas por los procesos denudativos de superficie. Los diques de gabros o de arcillas formadas a partir de estas rocas, se documentaron en cada afloramiento, midiendo en todos los casos los elementos de yacencia.

La información de los elementos de yacencia del agrietamiento y los diques, se utilizó en el análisis de los mecanismos y tipologías de movimientos de masas. La técnica empleada para este análisis fue la proyección estereográfica, que permitió comparar la posición relativa de las familias de grietas del macizo con respecto a la dirección e inclinación de las laderas y taludes. El plano utilizado en el análisis de susceptibilidad, es el resultado de la aplicación de un buffer de 200 m a partir de las disyuntivas con desplazamiento presentes en el área del yacimiento.

Factor hidrogeológico.

Para evaluar la influencia de las condiciones hidrogeológicas sobre el desarrollo de deslizamientos se analizaron varias variables como el nivel de aguas subterráneas, la dirección y gradiente de los flujos, y las subpresiones de la corteza laterítica.

Para el análisis del nivel de aguas subterráneas se confeccionó el plano de hidroisohipsas del yacimiento Punta Gorda clasificado en 6 clases: 0m, 5m, 10, 15m, 20m y 25m. Este sirvió además para el análisis del gradiente hidráulico y la dirección de los flujos en el acuífero agrietado de las serpentinitas.

Un fenómeno muy relacionado con el comportamiento hidráulico del suelo y común en el área de estudio, es el sifonamiento o tubificación, que es la formación de aberturas o conductos debido a la erosión interna del suelo en sentido contrario a la dirección de los flujos de aguas subterráneas. En este proceso juega un papel decisivo el gradiente crítico, definido como el valor máximo del gradiente en un suelo saturado, por encima del cuál se produce sifonamiento (Sowers et al 1976; Penson, 1994). Para un flujo en un suelo la presión neutra y total es:

$$u = \gamma_w(Z_w + Z_s + \Delta h)$$

$$\sigma = \gamma_w Z_w + \gamma Z_s$$

Como en el instante de la agitación del suelo e inicio de la erosión interna $\sigma = u$,

$$\gamma_w Z_w + \gamma_w Z_s + \gamma_w \Delta h = \gamma_w Z_w + \gamma Z_s$$

$$\gamma_w \Delta h = \gamma Z_s - \gamma_w Z_s = Z_s (\gamma - \gamma_w)$$

$$i_c = \frac{\Delta h}{Z_s} = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w}$$

Donde:

σ : presión total.

u : presión neutra o de poros.

γ_w : peso específico del agua.

γ_s : peso específico del suelo.

Z : potencia del agua

La subpresión presente en la corteza laterítica, se determinó a partir de los valores del nivel de afloramiento del agua subterránea y del nivel de estabilización de la misma. Con las coordenadas de los pozos y los valores de presión se generó un plano de isolíneas, dividido en cuatro clases principales: presión nula (0 m), presión baja (2 m), presión alta (4 m) y presión muy alta (> de 6 m).

Factor geotécnico.

En la investigación se utilizaron varias propiedades físico-mecánicas de los suelos y rocas, tales como: granulometría, límites de Atterberg, humedad, peso específico, cohesión, fricción interna y porosidad.

Una de las aplicaciones de las propiedades antes citadas, fue el cálculo de la colapsabilidad de los horizontes ingeniero-geológicos (Compagnucci et al, 2001), mediante la aplicación de tres métodos:

1. Método de Denisov o Coeficiente de subsidencia.

$$KD = \frac{eLL}{e}$$

El suelo se considera colapsable si: $0,50 < KD < 0,75$

2. Método del Código Soviético de Construcción.

$$KS = \frac{e - eLL}{1 + e}$$

El suelo se considera colapsable si: $S < 60\%$ y $KS > -0,1$

3. Método de Gibbs o Relación de Colapso.

$$KG = \frac{HS}{LL}$$

El suelo se considera colapsable si: $KG > 1$

Donde:

eLL : relación de vacíos en el límite líquido. $eLL = \frac{PER}{PEALL} - 1$

PER : peso específico real.

$PEALL$: peso específico en el límite líquido.

$$PEALL = \frac{PER \times 100}{(PER \times LL) + 100}$$

HS : contenido de humedad al 100% de saturación.

$$HS = 100 \frac{e}{PER}$$

S : saturación o humedad natural.

$$S = H \frac{PER}{e}$$

e : relación de poros.

LL : límite líquido.

La aplicación de estos métodos de colapsabilidad, permiten profundizar en el conocimiento de los mecanismos de rotura desarrollados en el área de estudio, teniendo en cuenta que

horizontes ingeniero-geológicos colapsan y cuales no, bajo las condiciones naturales en que se encuentran.

Análisis del factor de seguridad.

Los métodos de cálculo, para analizar la estabilidad de un talud, se pueden clasificar en dos grandes grupos: métodos de cálculo en deformaciones y los de equilibrio límite. Los primeros consideran las deformaciones del terreno, además de las leyes de la estática. El segundo grupo, se basa exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable, sin tener en cuenta las deformaciones del terreno.

En los métodos de equilibrio límite, se destacan los métodos exactos, cuya aplicación proporciona una solución exacta del problema, con la salvedad de las simplificaciones propias del método de cálculo que considera la ausencia de deformaciones y un factor de seguridad constante en toda la superficie de rotura, siendo posible su uso en casos de superficies con geometría sencilla, como la rotura planar y en cuña. El otro grupo son los métodos no exactos, en los casos en que la geometría de la superficie de rotura, no permite obtener una solución exacta del problema, mediante la aplicación de las leyes de la estática. En estos métodos se distinguen, los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante y los métodos de dovelas, que consideran a la masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales. Justamente estos métodos, son los utilizados en la investigación para el cálculo del factor de seguridad.

Los métodos de equilibrio límite, están ampliamente avalados por la práctica. Se conocen sus límites y sus grados de confianza, donde la seguridad del talud, se cuantifica por medio del factor de seguridad, que se define como el cociente entre la resistencia al corte en la superficie de deslizamiento y la resistencia necesaria para mantener el equilibrio estricto de la masa deslizante.

Para el análisis de estabilidad de taludes mediante el cálculo del factor de seguridad se empleó el programa STABLE (Purdue University, 1988), que permite obtener soluciones a los problemas de estabilidad de taludes en dos dimensiones, a través del método de las dovelas, mediante una adaptación del método de Bishop simplificado, Jambú y Spenser, que admite el análisis de superficies irregulares, además de las roturas circulares, generadas de forma aleatoria o definidas por el usuario, proporcionando de forma geométrica, las superficies de deslizamiento pésimas, con sus respectivos factores de seguridad. En los métodos de cálculo,

se supone que la resistencia intrínseca al corte o tensión tangencial máxima, en un punto de la superficie de deslizamiento, sigue la ley lineal de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

Donde:

τ : Tensión máxima tangencial, en un punto de la superficie de rotura.

σ : Tensión normal a la superficie de rotura en un punto considerado.

φ : Ángulo de fricción interna en la superficie de rotura.

c : Cohesión.

Además del método anteriormente descrito, se aplicó el cálculo del factor de seguridad para el área del yacimiento adoptándose un modelo de deslizamiento con superficie planar en talud infinito y sin la información del nivel de agua en el talud. En estas condiciones se considera un perfil de alteración típico de meteorización, con substrato rocoso formado por rocas serpentinizadas, una corteza laterítica de baja permeabilidad y en la parte superior un horizonte de mayor permeabilidad. La superficie de rotura se considera en el contacto roca-corteza laterítica, según las observaciones de campo en la región de estudio. Este modelo de rotura es uno de los más usados por investigadores en regiones montañosas tropicales (Terzaghi, 1950; Matos, 1974; Wolle et al., 1978; Dos Santos et al, 2005). De acuerdo al modelo, el factor de seguridad (FS) se obtiene por la ecuación siguiente:

$$FS = \frac{c + \gamma \times \cos^2 i \times \tan \varphi}{\gamma \times Z \times \cos i \times \text{seni}}$$

Donde:

FS : Factor de seguridad.

C : Cohesión.

γ : Peso específico del suelo.

φ : Ángulo de fricción interna del suelo.

Z : Profundidad de la zona de ruptura.

i : Pendiente de la ladera o talud.

El plano temático, incluido en el análisis de susceptibilidad, es el de tipo de suelo, clasificando, los materiales presentes en el yacimiento a través del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Factor geomorfológico.

El elemento geomorfológico utilizado es la pendiente del terreno. El plano se realizó a partir del MDT del relieve actual del yacimiento, en el que se incluyen las áreas modificadas por la actividad minera. Los intervalos de pendiente seleccionados, se tomaron sobre la base de la

experiencia adquirida sobre este factor en los reconocimientos de campo en el área. De esta forma se presenta un plano clasificado en cuatro clases, 0° - 9° (H:5,75:V:1), 10° - 19° (5,75:1-2,75:1), 20° - 40° (2,75:1-1,40:1) y mayor de 40° (1,40:1). 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.

Factor de uso de suelo.

El plano de uso de suelo del yacimiento se confeccionó a partir del Plano Progreso de las Actividades Mineras y confirmado por reconocimiento de campo y un análisis auxiliar de fotografías aéreas. Está dividido en cuatro clases fundamentales: áreas minadas, áreas de depósitos de mineral, áreas reforestadas y áreas de vegetación natural.

Se dividen las zonas de vegetaciones naturales y reforestadas por su influencia en la estabilidad de la corteza, mediante mecanismos hidrológicos y mecánicos. Los hidrológicos comprenden la capacidad de infiltración en el suelo, la humedad del suelo, la evapotranspiración, etc., mientras que los mecánicos traducen el aumento de resistencia que proporcionan las raíces y la protección frente a la erosión (Geenway, 1987; Mulder, 1991). La vegetación puede influir de manera beneficiosa o adversa en la estabilidad de las laderas, dependiendo de cómo actúen los mecanismos mencionados (Baeza, 1994). Un ejemplo de ello es que mientras las raíces aumentan la resistencia del suelo, al mismo tiempo favorecen una mayor infiltración del agua de lluvia.

Metodología de valoración de la susceptibilidad a la rotura mediante el análisis estadístico.

El análisis estadístico está basado en la relación observada entre cada factor condicionante analizado y la distribución espacial o temporal de los deslizamientos. La fortaleza funcional del método aplicado es directamente dependiente de la calidad y cantidad de los datos disponibles para el análisis. La aproximación estadística puede ser aplicada siguiendo diferentes técnicas las cuales difieren en el procedimiento estadístico aplicado (univariado o multivariado) y del tipo de unidad de terreno utilizada.

La técnica estadística aplicada en la investigación es el análisis condicional, que aunque es simple conceptualmente, no lo es operacionalmente; intenta evaluar la relación probabilística entre los factores condicionantes relevantes seleccionados y la ocurrencia de deslizamientos en el área del yacimiento Punta Gorda. El basamento teórico parte del teorema de Bayes (Parzen, 1960), 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.

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) (Carrara, 1995). La frecuencia de deslizamientos se determina:

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

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:

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

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, 2005):

$$V_c = \left[\frac{1}{G_l} \left(\frac{X_l}{Y_l} \times \frac{X}{Y} \right) + \sum \left(\frac{X_n}{Y_n} \times \frac{X}{Y} \right) \right] \times 1000$$

Donde:

V_c : 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 3.1 se muestra la aplicación del análisis condicional en ambiente SIG para la caracterización de los planos 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 gabbro, 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. Una vez valoradas todas clases de los factores analizados, se procedió a la conversión en formato raster con tamaño de celda de 5x5 m [figura 3.2] y la posterior reclasificación de cada plano temático mediante el análisis de cluster, 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 plano final de susceptibilidad.

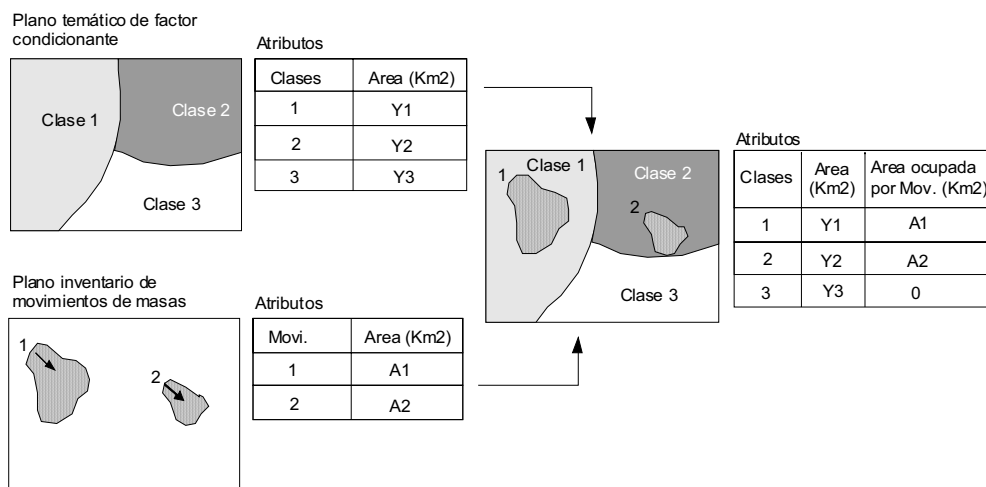


Figura 3.1. Procedimientos para la caracterización y combinación de factores condicionantes mediante técnicas SIG, a través del análisis de probabilidad condicional.

La metodología aplicada en la investigación, se resume en la figura 3.3 y Anexo II [figura 2.1], donde se presenta la estructura del SIG implementado y el orden lógico de los procedimientos para la obtención del plano final de susceptibilidad.

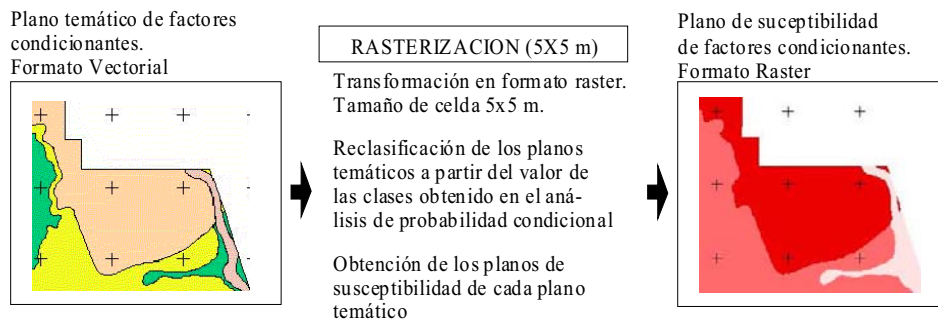


Figura 3.2. Proceso de rasterización y reclasificación para la obtención de planos de susceptibilidad de factores condicionantes.

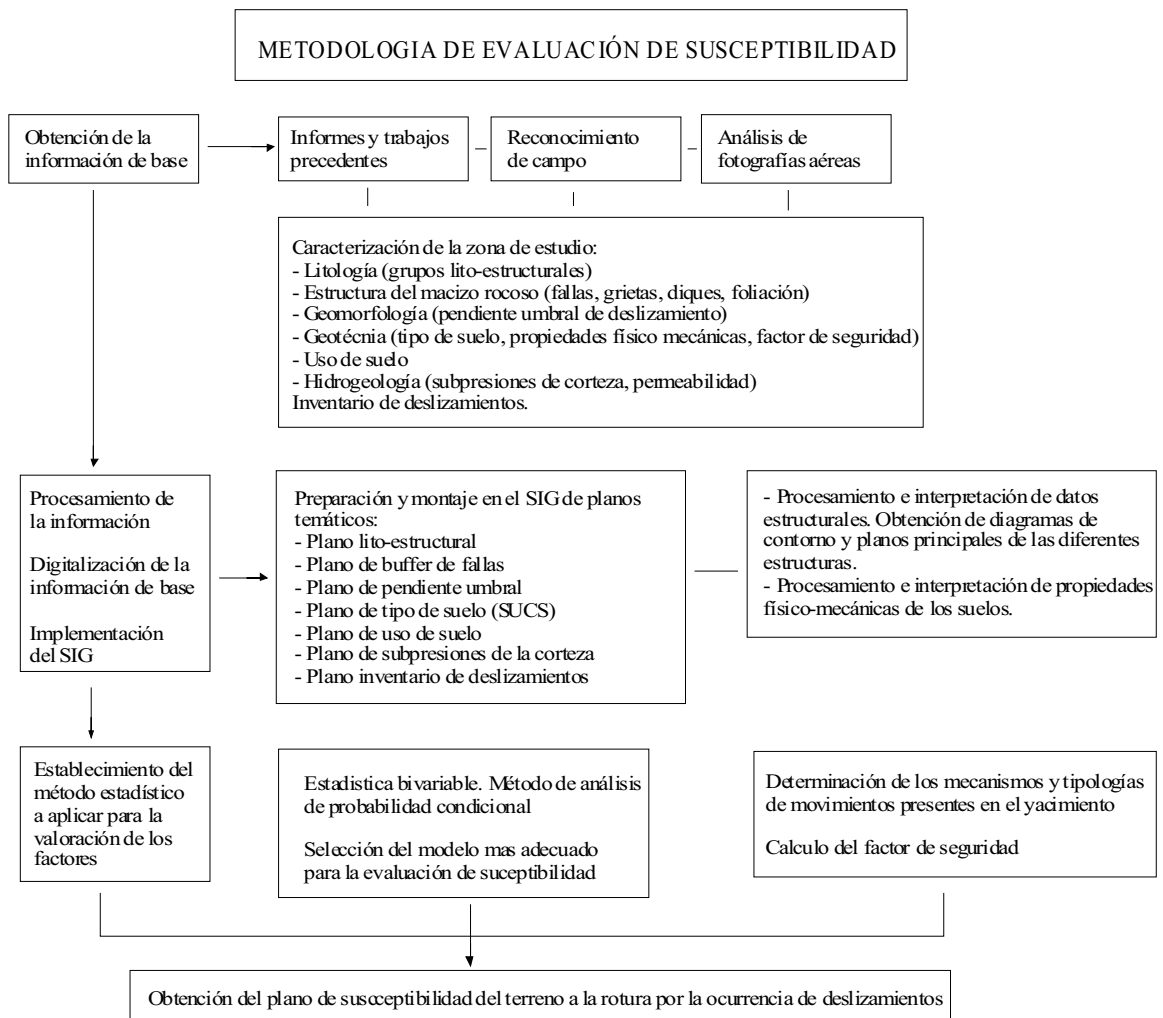


Figura 3.3. Metodología empleada en la evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura.

Conclusiones.

- La metodología empleada en la investigación, parte de criterios de inestabilidad, en los cuales se declaran los factores que inciden en las inestabilidades y las condiciones en las cuales se desarrollan. Esto sirve de punto de partida para el análisis de susceptibilidad.
- Los factores que inciden en las inestabilidades, empleados en la valoración de la susceptibilidad son las características lito-estructurales y tectónicas del macizo rocoso, condiciones hidrogeológicas caracterizadas por los niveles de aguas subterráneas, gradientes hidráulicos y las subpresiones de la corteza laterítica, las pendientes del terreno, condiciones geotécnicas y el uso de suelo en el área del yacimiento.
- Para valorar la influencia de los factores condicionales sobre el desarrollo de deslizamientos, el método probabilístico de análisis condicional es apropiado debido a la escala de trabajo (1:2 000), las características de la información y el grado de estudio del yacimiento desde el punto de vista ingeniero-geológico e hidrogeológico.

CAPITULO IV

CAPITULO IV. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LA ROTURA EN EL YACIMIENTO PUNTA GORDA.

Introducción.

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 o planos 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). Aunque existen diversas técnicas de estimación, todas ellas se basan en el principio del actualismo. El principio expresado según Varnes (1984) afirma que “*el estudio del pasado y del presente es la clave de lo que puede ocurrir en el futuro*”. En referencia a los deslizamientos, significa que las roturas que pueden ocurrir en un futuro, es probable que lo hagan en las mismas condiciones en que ocurrieron los deslizamientos antiguos o actuales.

En el presente capítulo nos referiremos a 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 yacimiento Punta Gorda.

Descripción y cartografía de los deslizamientos.

Los primeros trabajos realizados, con vista al análisis de la susceptibilidad del terreno, fueron de reconocimiento del área del yacimiento para ubicar y caracterizar los deslizamientos existentes y crear el plano de inventario de los mismos [figura 4.1]. A continuación se presenta una síntesis de las características de los movimientos registrados:

Deslizamiento 1.

Ocupa un área de 0,0489 Km², la dirección del movimiento es hacia el oeste. Tiene longitud máxima de 240 m y ancho de 255 m. La corona del deslizamiento se encuentra en los bloques de explotación N-46 y O-46 y afecta además a los bloques N-45 y O-45. Se desarrolla en corteza laterítica residual. Los materiales desplazados llegan hasta el cause del río Los lirios. El escarpe principal coincide con zona de subpresiones moderadas (2 m) de la corteza laterítica. Se encuentra a 70 m de una falla de dirección noreste-suroeste.

Tipología: presenta un gran componente de deslizamiento planar, con presencia de familia de grietas ($228^{\circ}/40^{\circ}$) en sentido aproximado de la dirección del movimiento. La corona presenta forma triangular por la intersección de dos familias de grietas: $125^{\circ}/90^{\circ}$ y $222^{\circ}/89^{\circ}$.

Deslizamiento 2.

Abarca un área de $0,0472 \text{ Km}^2$ y la dirección del movimiento es hacia el noroeste. Tiene longitud máxima de 260 m y ancho de 244 m y se encuentra en el bloque P-45. Se desarrolla en corteza laterítica residual. Los materiales desplazados llegan hasta el cause del río Los Lirios. El movimiento ocurrió en zona de subpresiones moderadas (2 m) en la corteza y el escarpe se desarrolla sobre una falla de dirección noreste-suroeste.

Tipología: presenta componente de rotura en forma de cuña por la intersección de dos familias de grietas: $222^{\circ}/89^{\circ}$ y $248^{\circ}/40^{\circ}$.

Deslizamiento 3.

Abarca un área de $0,0127 \text{ Km}^2$ y la dirección de movimientos es hacia el oeste. Tiene longitud máxima de 105 m y ancho máximo de 140 m. Se encuentra en el bloque Q-45. Se desarrolla en corte laterítica residual. Los materiales desplazados llegan hasta el cause del río Los Lirios. Ocurre en zona de subpresiones moderadas de la corteza y el escarpe se encuentra a 100 m de una falla de dirección noreste-suroeste.

Tipología: componente de rotura planar por familia de grietas $228^{\circ}/40^{\circ}$.

Deslizamiento 4.

Presenta un área de $0,0321 \text{ Km}^2$ y la dirección del movimiento es hacia el noroeste. Tiene longitud máxima de 225 m y ancho máximo de 190 m. La corona se encuentra en el límite del bloque R-45 con los bloques R-46 y Q-45 y afecta además el sureste R-45. Se desarrolla en corteza laterítica residual. El borde derecho del escarpe coincide con valores altos de subpresiones (4 m) en la corteza. El escarpe además se encuentra a 90 m de una falla de dirección noreste-suroeste.

Tipología: presenta componente de rotura en forma de cuña por la intersección de dos familias de grietas: $222^{\circ}/89^{\circ}$ y $248^{\circ}/40^{\circ}$.

Deslizamiento 5.

Abarca un área de $0,0213 \text{ Km}^2$ y la dirección del movimiento es hacia el norte. Tiene longitud máxima de 190 m y ancho máximo de 170 m. Se encuentra al noroeste del bloque R-46. Se desarrolla en corteza laterítica residual, donde las subpresiones en la misma son altas (4 m). El escarpe se encuentra a 200 m de una falla de dirección noreste-suroeste.

Tipología: presenta componente de rotura en forma de cuña por la intersección de dos familias de grietas: $222^{\circ}/89^{\circ}$ y $125^{\circ}/90^{\circ}$.

Deslizamiento 6.

Afecta un área de 0,0126 Km² y la dirección del movimiento es hacia el oeste. Tiene longitud máxima de 120 m y ancho máximo de 118 m. Se encuentra en la zona este central del bloque P-49. Se desarrolla en corteza laterítica residual donde las subpresiones son mínimas donde la roca se encuentra a poca profundidad (< 1,5 m). El movimiento está a 120 m de una falla de dirección norte-sur.

Tipología: presenta un gran componente de deslizamiento planar, con presencia de familia de grietas (228°/40°) en sentido aproximado de la dirección del movimiento. El escarpe, presenta forma triangular por la intersección de las familias de grietas: 125°/90° y 222°/89°.

Deslizamiento 7.

Presenta un área de 0,0182 Km² y la dirección del movimiento es hacia el norte-noreste. Tiene longitud máxima de 180 m y ancho máximo de 130 m. Se encuentra en la zona este central del bloque Q-49. Se desarrolla en corteza laterítica residual de poca potencia donde la roca se encuentra a menos de 1,5 m de profundidad. El escarpe se desarrolló sobre una falla arqueada con dirección del segmento este-oeste y el movimiento coincide con área de presiones mínimas de la corteza.

Tipología: rotacional con componente planar, la dirección del movimiento de la masa está controlado por la familia de grietas 61°/47°.

Deslizamiento 8.

Abarca un área de 0,0128 Km² y la dirección del movimiento es hacia el noreste. Tiene longitud máxima de 170 m y ancho máximo de 100 m. Se encuentra en la zona este central del bloque Q-50. Se desarrolla en corteza laterítica residual donde las subpresiones son mínimas, sin embargo el escarpe coincide con una falla de dirección noroeste y a 50 m de la intersección de esta con otra de dirección norte-noreste. Hay presencia en el perfil de corteza formada a partir de la descomposición de gabros.

Tipología: deslizamiento planar a través de la superficie de la familia de grietas de yacencia 61°/47°.

Deslizamiento 9.

Abarca un área de 0,0078 Km² y la dirección del movimiento es hacia el suroeste. Tiene longitud máxima de 110 m y ancho máximo de 90 m. Se encuentra hacia la zona este central del bloque R-51. Se desarrolla sobre corteza laterítica residual de poca potencia donde la roca se encuentra a menos de 1.5 m de profundidad. Las subpresiones son mínimas en la corteza. El movimiento coincide con una falla de dirección noreste-este.

Tipología: rotura planar a través de la superficie de la familia de grietas 248°/40°.

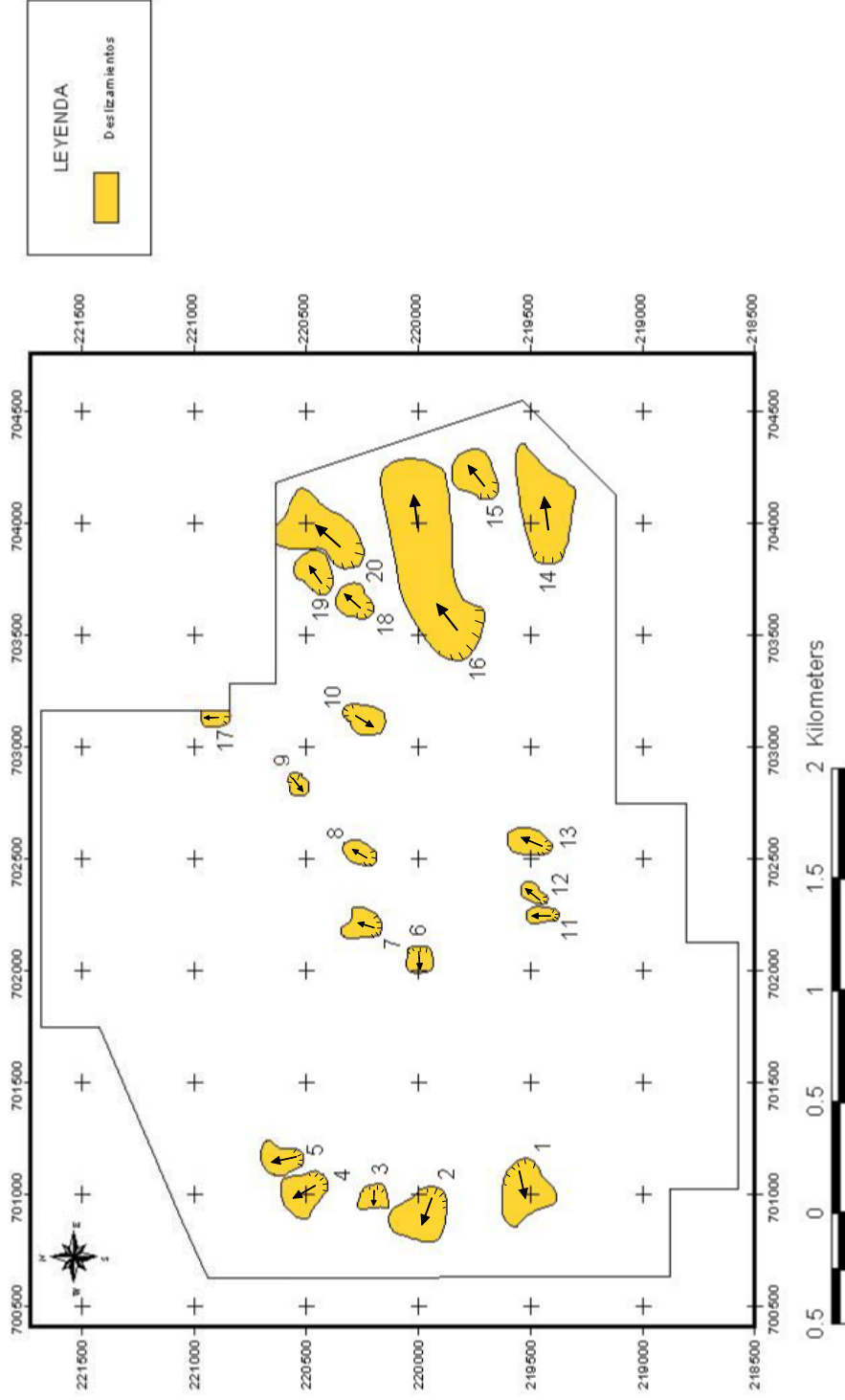


Figura 4.1. Plano inventario de deslizamientos del yacimiento Punta Gorda (escala original 1:2 000).

Deslizamiento 10.

Presenta un área de 0,020 Km² y la dirección del movimiento es hacia el sur-sureste. Tiene longitud máxima de 200 m y ancho máximo de 140 m. Se encuentra hacia la zona este central del bloque Q-52. Se desarrolla sobre corteza laterítica residual donde las subpresiones son mínimas. El escarpe se desarrolla sobre una falla de dirección noroeste-sureste y el extremo izquierdo sigue el rumbo de una falla de dirección sur-suroeste.

Tipología: rotacional. No se manifiesta ninguna otra componente por la intensa trituración.

Deslizamiento 11.

Abarca un área de 0,0088 Km² y la dirección del movimiento es hacia el norte. Tiene longitud máxima de 150 m y ancho máximo de 70 m. Se encuentra en el bloque N-49. Se desarrolla en corteza laterítica residual de poca potencia donde la roca se encuentra a menos de 1,5 m de profundidad. El escarpe se desarrolla en zonas límites entre subpresiones mínimas y moderadas (2 m) y se encuentra a 110 m de una falla de dirección noroeste-sureste. Hay presencia de corteza de gabro en la zona afectada por el deslizamiento.

Tipología: rotacional con componente en cuña, controlado por la intersección de dos familias de grietas: 222°/89° y 125°/90° confiriéndole forma triangular a la corona.

Deslizamiento 12.

Presenta un área de 0,0078 Km² y la dirección del movimiento es hacia el noreste. Tiene longitud máxima de 130 m y ancho máximo de 80 m. Se encuentra en el noroeste del bloque N-50. Se desarrolla en corteza laterítica residual de poca potencia donde el escarpe aparece en zonas límites entre subpresiones mínimas y moderadas (2 m) y coincide con una falla de dirección noroeste. Hay presencia de corteza de gabro.

Tipología: rotura planar debido a la presencia de la familia de grietas con yacencia 61°/47°.

Deslizamiento 13.

Tiene un área de 0,0194 Km² y la dirección del movimiento es hacia el norte-noreste. Presenta longitud máxima de 200 m y ancho máximo de 130 m. Afecta los bloques N-50, N-51, O-50 y O-51. Una pequeña porción se desarrolla sobre corteza laterítica redepositada y el resto sobre corteza residual. Su escarpe se desarrolla en zona de subpresiones altas (4 m) en la corteza. Se encuentra a 90 y 200 metros de distancia de dos fallas de dirección noroeste y noreste respectivamente.

Tipología: rotura planar a través de la superficie de la familia de grietas 61°/47°. Presenta un componente de cuña, por el extremo derecho, debido a la presencia de la familia de grietas de yacencia 125°/90°.

Deslizamiento 14.

Abarca un área de 0,0939 Km² y la dirección del movimiento es hacia el este. Presenta longitud máxima de 550 m y ancho máximo de 250 m. Afecta los bloques N-55 y N-56 y el

borde sur del O-56.

Se desarrolla en corteza laterítica residual. El escarpe coincide con áreas de subpresiones máximas en la corteza y con una intersección de dos fallas de direcciones noroeste y noreste. Los materiales desplazados llegan hasta el cause del río Yagrumaje.

Tipología: la tipología inicial es una combinación de movimiento planar-cuña, aunque el movimiento final el material experimenta un giro a través de un centroide, propio de movimientos rotacionales. La superficie de rotura es a través de la familia de grietas $61^{\circ}/47^{\circ}$, sin embargo, la forma triangular de la corona esta condicionada por la conjunción de dos familias de grietas verticales con yacencia $222^{\circ}/89^{\circ}$ y $125^{\circ}/90^{\circ}$.

Deslizamiento 15.

Su área es de $0,0345 \text{ Km}^2$ y la dirección del movimiento es hacia el noreste. Presenta longitud máxima de 240 m y ancho máximo de 190 m. Afecta el bloque O-56 y el borde sur del P-56. Se desarrolla en corteza laterítica residual. En casi toda su totalidad se desarrolla en zona de subpresiones altas (4 m) de la corteza y coincide con una falla de dirección noreste.

Tipología: es una combinación de deslizamiento rotacional-planar, la masa de suelo desplazada, se desliza a través de la superficie de la familia de grieta $61/47$. Esta superficie varía el buzamiento, y el conjunto experimenta un giro hasta el final de su trayectoria.

Deslizamiento 16.

Tiene un área de $0,2384 \text{ Km}^2$ y la dirección del movimiento es hacia el este-noreste. Presenta longitud máxima de 920 m y ancho máximo de 290 m. Afecta los bloques P-53, P-54, P-55, P-56, O-53, O-54 y el borde sur de los bloques Q-55 y Q-56. Es el mayor deslizamiento reportado en el yacimiento. Se desarrolla en corteza laterítica residual con intercalaciones de corteza de gabro. Su escarpe principal coincide con zonas de subpresiones moderadas (2 m) de la corteza, sin embargo atraviesa áreas de subpresiones máximas ($> 6 \text{ m}$), además, se desarrolla sobre una zona de intersección de fallas con direcciones noreste y noroeste.

Tipología: es una gran deslizamiento rotacional, en el cual se manifiesta un componente planar en los escalones principales, por la superficie de la familia de grietas $61^{\circ}/47^{\circ}$.

Deslizamiento 17.

Abarca un área de $0,0103 \text{ Km}^2$ y la dirección del movimiento es hacia el norte. Presenta longitud máxima de 140 m y ancho máximo de 80 m. Se encuentra en los límites de los bloques S-52 y S-53. Se desarrolla en corteza laterítica redepositada donde las subpresiones son mínimas. Se encuentra a 230 metros de una falla de dirección noreste.

Tipología: deslizamiento rotacional.

Deslizamiento 18.

Presenta un área de 0,0198 Km² y la dirección del movimiento es hacia el noreste. Presenta longitud máxima de 180 m y ancho máximo de 150 m. Afecta el bloque Q-54. Se desarrolla en corteza laterítica redepositada en zonas límites de subpresiones altas (4 m) y muy altas (> 6m). Se encuentra a 120 m de una falla de dirección noreste.

Tipología: deslizamiento rotacional.

Deslizamiento 19.

Su área es de 0,0249 Km² y la dirección del movimiento es hacia el noreste. Presenta longitud máxima de 200 m y ancho máximo de 160 m. Afecta los bloques Q-54, R-54 y el R-55. Se desarrolla en corteza laterítica redepositada con subpresiones altas (4 m) y a una distancia de 200 m de una falla de dirección noreste.

Tipología: deslizamiento rotacional.

Deslizamiento 20.

Abarca un área de 0,0820 Km² y la dirección del movimiento es hacia el norte-noreste. Presenta longitud máxima de 430 m y ancho máximo de 260 m. Afecta los bloques Q-55, R-55 y el R-56. Se desarrolla en corteza laterítica redepositada donde existen subpresiones máximas (> 6 m). El extremo derecho del cuerpo del deslizamiento sigue el rumbo de una falla de dirección noreste. En la zona del escarpe hay intercalaciones de corteza de gabro.

Tipología: deslizamiento rotacional.

Se reporta un total de 20 deslizamientos, ocupando un área total de 0,8668 Km², lo que representa un 8,84 % del área total de trabajo [figura 4.1 y anexo III (tabla 3.1)].

Clasificación de los deslizamientos.

Los movimientos de laderas y taludes, desarrollados en el área del yacimiento, son fenómenos asociados al mecanismo de rotura de la corteza laterítica y al tipo de desplazamiento de los volúmenes de materiales o de sus partes móviles unidas entre sí, que componen el cuerpo de los movimientos. El conocimiento del mecanismo de las roturas, permiten entender la física del proceso, revelar los esquemas de calculo mas reales y elegir las medidas ingenieriles que permitan debilitar los esfuerzos de dislocación y/o aumentar la resistencia de las rocas. Así, para revelar el mecanismo de los deslizamientos que tienen lugar en el yacimiento Punta Gorda fue necesario un estudio detallado de la estructura y las propiedades físicas y mecánicas de las rocas y suelos y la dinámica de los movimientos.

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 y tipologías de fenómenos gravitacionales en laderas y taludes en el yacimiento Punta Gorda (Almaguer, 2002; Almaguer et al, 2005, 2005a, 2005b):

1. Mecanismos relacionados con caída libre de la roca.

- Desprendimientos de rocas. En el yacimiento los fenómenos de desprendimientos de rocas lo podemos dividir en dos tipos: los desprendimientos propiamente dichos y los derrumbes. Estos mecanismos 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 serpentinizadas, intensamente agrietadas, tiene lugar los fenómenos de derrumbes asociados con la alteración del material rocoso.
- Vuelcos. Estos mecanismos tienen lugar en aquellas laderas o cortes de masas de rocas serpentinizadas que generan un eje situado por debajo del centro de gravedad. La fuerza inestabilizadora es la gravedad o también por las acciones hidrodinámicas e hidrostáticas en las grietas. La parte movida se desplaza haciendo un giro o inclinando el movimiento de arriba hacia fuera. El apoyo de las aristas inferiores se deshace, y el mecanismo de desplome es combinado con un movimiento vertical de colapso. Estos movimientos en el yacimiento se observan en laderas compuestas por rocas serpentinizadas, en las cuales existen sistemas de grietas paralelas a la ladera o talud a través de las cuales se filtran las aguas superficiales rompiendo el equilibrio del sistema. Además, se ha reportado este tipo de movimiento en las cortezas lateríticas residuales y redepositadas en las cuales se manifiesta agrietamiento relicto o tensional el cuál realiza la misma función que en la roca [anexo III (foto 1)].

2. Deslizamientos a través de una superficie de fallo definida: se manifiestan ladera abajo de una masa de suelo o roca y tiene lugar a través de una o más superficies de rotura o zonas relativamente delgadas con intensa deformación de cizalla.

- Deslizamientos traslacionales. Se le llama deslizamiento traslacional o planar a aquellos que se producen a través de una única superficie plana u ondulada. En el área de estudio se manifiestan en la roca serpentizada cuando existe una familia de grietas dominante y orientada aproximadamente en el mismo sentido del talud o ladera, a veces estas discontinuidades se relacionan con fallas de sobrecorrimiento de escamas tectónicas en la cual se manifiesta un intenso cizallamiento con espesores mayores de 1m. Este tipo de movimiento también se produce en las cortezas lateríticas residuales o redepositadas, en las cuales la superficie de deslizamiento se encuentra en el contacto roca/suelo, donde el material presenta menos resistencia y a través del cual se mueven las aguas subterráneas [figura 4.2]. Las condiciones determinadas por Hoek y Bray

(1977) para la ocurrencia de este tipo de rotura se ponen de manifiesto en el yacimiento:

- los rumbos del plano del talud o ladera y del plano de deslizamiento son paralelos o casi paralelos, formando entre sí un ángulo máximo de 20 grados.
- los límites laterales de la masa deslizante producen una resistencia al deslizamiento despreciable.

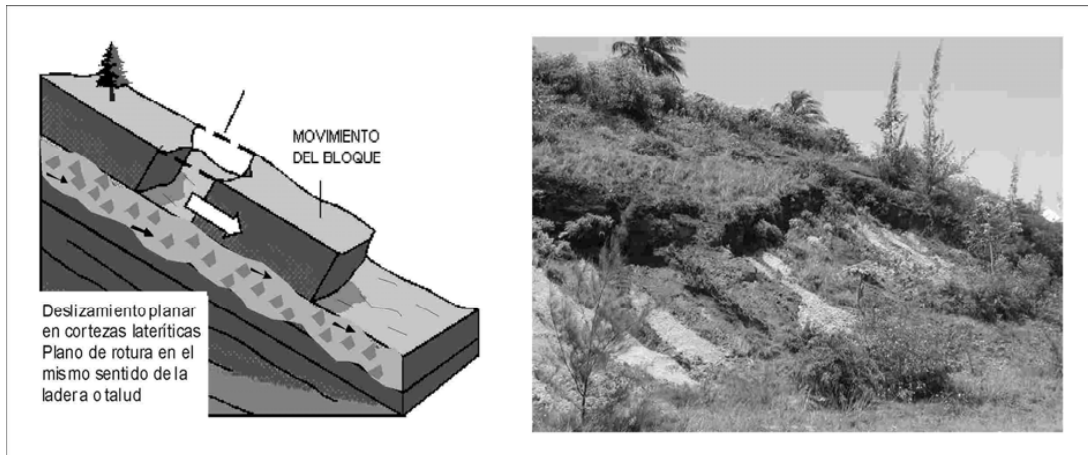


Figura 4.2. Deslizamiento traslacional desarrollado en corteza laterítica. Carretera Moa-Holguín. (Almaguer, 2002).



Figura 4.3. Deslizamiento rotacional desarrollado en corteza laterítica. Carretera Moa-Holguín. (Almaguer, 2002).

- Deslizamientos a través de una superficie circular. Los materiales de suelo laterítico se desplazan a través de una superficie de rotura curvilínea o cóncava. Generalmente la masa desplazada se divide en bloques o escalones los cuales experimenta un giro según un eje situado por encima del centro de gravedad de esta. El material de la cabecera de los escalones se inclinan contra la ladera,

generando depresiones paralelas a la corona del talud o ladera y a través de la cuál se infiltran las aguas superficiales y pueden lograr reactivaciones. Como generalmente hay presencia de agua en estos tipos de movimientos en cortezas lateríticas, 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 serpentinizada, en la cuál el espaciado de las grietas es tan pequeño que le confiere un comportamiento tipo suelo [figura 4.3].

- Deslizamientos en cuña. Se llama rotura por cuña a aquella producida a través de dos discontinuidades dispuestas oblicuamente a la superficie del talud o ladera, con la línea de intersección de ambas aflorando en la superficie del mismo y buzando en sentido desfavorable. Este tipo de rotura en el caso del yacimiento, se origina en el macizo rocoso serpentizado en los lugares que se da la disposición adecuada, en orientación y buzamiento de las discontinuidades, sin embargo, por la existencia de cortezas lateríticas residuales en las cuales se conservan en la mayoría de los horizontes del perfil de meteorización la estructura de la roca este tipo de movimiento se desarrolla igualmente en la corteza [figura 4.4].

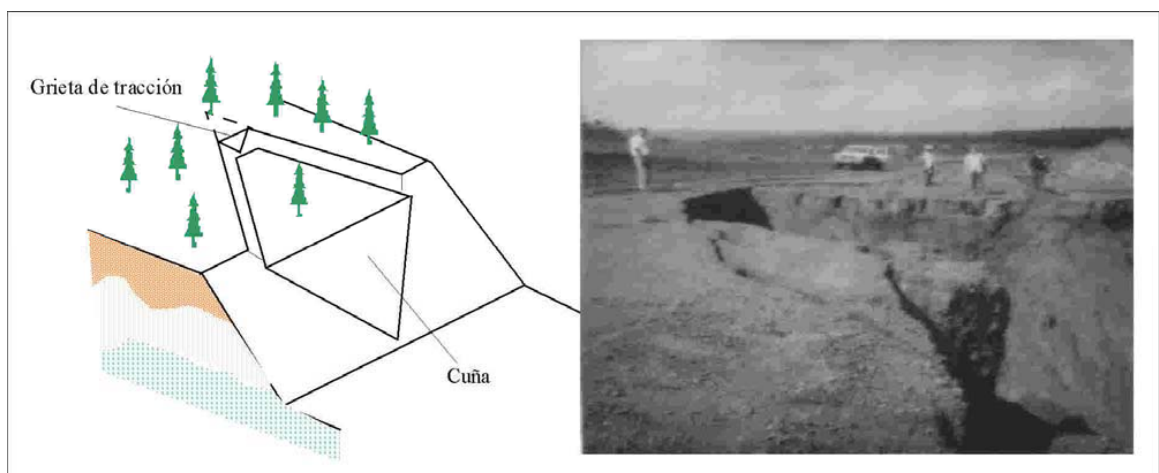


Figura 4.4. Deslizamiento en cuña desarrollado en corteza laterítica residual. Yacimiento Punta Gorda. (Cortesía de la subdirección de minas de la empresa Ernesto Guevara).

- Deslizamientos combinados. En este tipo de movimiento se conjugan normalmente dos mecanismos; en el caso de las cortezas lateríticas en el área del yacimiento se pueden combinar movimientos traslacionales y vuelco, rotacionales y traslacional, rotacional y flujos de tierras. Siempre el primer mecanismo predomina sobre el segundo.
2. Movimientos de masas de manera desorganizada (movimientos de flujos). Se definen como movimientos continuos desde el punto de vista espacial; las superficies de cizallas

tienen corta duración y generalmente no se conservan. La masa movida no conserva su forma en el movimiento descendente, tomando formas lobuladas cuando se desarrollan en materiales finos y cohesivos y dispersándose cuando se manifiestan en materiales de granulometrías más gruesas.

- Coladas de tierra. Se definen como deformación plástica, lenta y no necesariamente húmeda, de tierra o rocas blandas en laderas de inclinación moderada. En las cortezas lateríticas se forman depósitos elongados, en forma de lengua en la parte frontal (pie), generando un relieve positivo sobre la superficie del terreno [anexo III (foto 2 y 3)].
- Corrientes de derrubios. Se definen como movimientos rápidos de material detrítico con predominio de fracciones gruesas (arenas, gravas, bloques). En el área del yacimiento se reportan en vaguadas u hondonadas del terreno en las laderas de 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 [anexo III (foto 4)].

Descripción de los factores que intervienen en el surgimiento de inestabilidades.

Para el análisis de la susceptibilidad del terreno frente al desarrollo de deslizamientos se utilizaron como factores condicionantes la litología, las condiciones tectónicas, las condiciones hidrogeológicas, el uso de suelo, la geomorfología y las condiciones geotécnicas de los suelos.

Relación de las características litológicas con el desarrollo de deslizamientos.

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 serpentinizadas: 26,8 %), roca con apariencia de suelo con estructura sedimentaria (lateritas redepositadas: 15,6 %) y materiales granulares (sedimentos aluviales: 8,8 %) [anexo III (figura 3.1)].

Del análisis realizado de cada una de las litologías, y la comparación del plano correspondiente con el inventario de deslizamientos [anexo III (figura 3.2) y tabla 4.1], las más afectadas son las lateritas residuales (0,456 Km²) lo que representa un 52,7 % del área total ocupada por deslizamientos, en segundo lugar las rocas serpentinizadas (0,21 Km²) y las lateritas redepositadas (0,18 Km²) lo que representa un 24,7 y 21,7 % respectivamente.

Influencia de las condiciones estructurales del macizo sobre el desarrollo de deslizamientos.

Influencia del agrietamiento del macizo rocoso serpentizado.

Como se ha descrito anteriormente, el agrietamiento juega un papel decisivo en el desarrollo de los movimientos en el yacimiento Punta Gorda, 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 plano de direcciones de agrietamiento confeccionado con las mediciones de elementos de yacencia tomadas en los bloques de explotación con afloramientos del substrato rocoso [anexo III (figura 3.3)].

Tabla 4.1. 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 gabro	% del área total ocupada por cuerpos de gabro	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
Roca debilitada tectónicamente	Serpentinitas de cause	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 relíctica 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

Caso 1. Deslizamiento número 1. Tipología: deslizamiento planar.

Situación estructural: presencia de dos familias de grietas con yacencia $248^{\circ}/40^{\circ}$ y $225^{\circ}/2^{\circ}$ [figura 4.5]. La familia 1, sirve de superficie de debilidad, para la formación de la grieta de tracción en la corona del movimiento. La familia 2 actúa como plano de deslizamiento, teniendo en cuenta su dirección y que las aguas subterráneas pueden moverse a través de ella, en la misma dirección de la ladera (hacia el oeste) [figura 4.6].

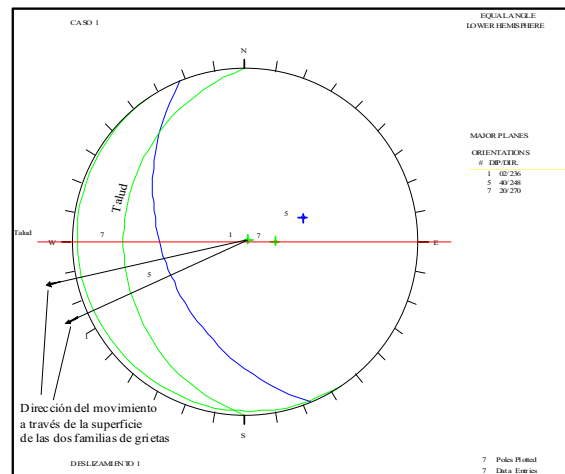


Figura 4.5. Diagrama de planos principales de grietas y ladera. Análisis tipológico de movimientos en el caso de estudio 1.

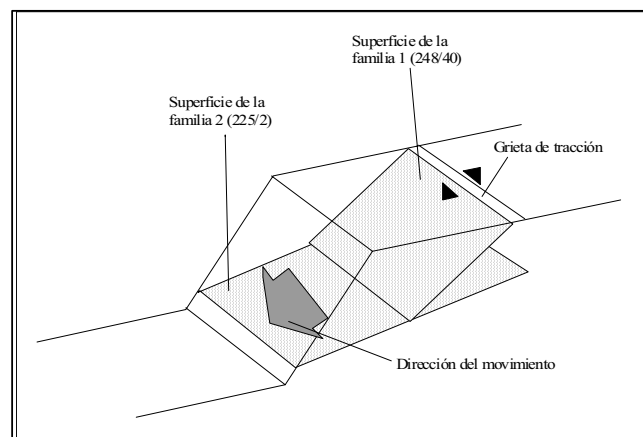


Figura 4.6. Representación gráfica del movimiento planar. Posición relativa de las familias de grietas y la ladera.

Caso 2. Deslizamiento 4. Tipología: rotura en forma de cuña.

Situación estructural: presencia de dos familias de grietas con yacencia $248^{\circ}/40^{\circ}$ y $222^{\circ}/89^{\circ}$ [figura 4.7]. La intersección de las superficies de las dos familias, y la posición relativa de estas con el plano del talud o laderas, forman una cuña con dirección de movimiento es hacia el oeste [figura 4.8].

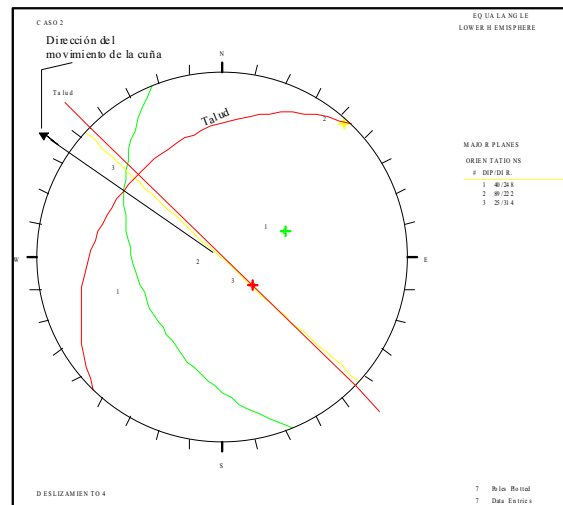


Figura 4.7. Diagrama de planos principales de grietas y ladera. Análisis tipológico de movimientos en el caso de estudio 2.

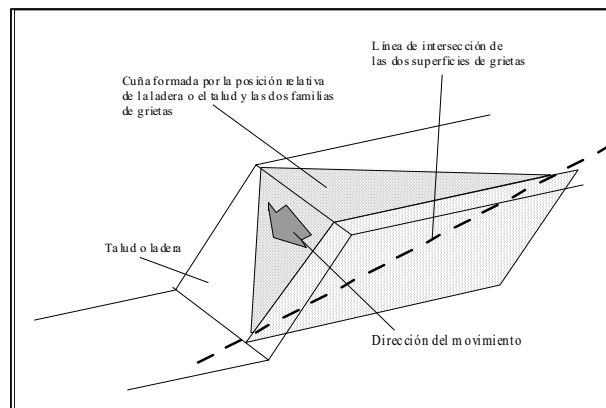


Figura 4.8. Representación gráfica de la rotura por cuña. Posición relativa de las familias de grietas y la ladera.

Influencia de las fallas sobre los deslizamientos.

Este tipo de estructura se analizó a dos niveles, mesoestructural (afloramientos) y macroestructural. A nivel de afloramiento, se midieron un total de 34 elementos de yacencia de las superficies de cada estructura en 7 bloques de explotación. Los resultados se muestran en el anexo III [figura 3.4], y confirman el resultado obtenido a nivel macroestructural. Existen direcciones predominantes: en cuatro bloques hay predominio de la dirección norte-sur (O-48, O-49, L-48 y M-48), la dirección noroeste aparece en los bloques O-47, N-47, M-47, M-48 y L-48. La dirección noreste solo se reporta en los bloques L-48 y M-48 y la este-oeste en el bloque O-49.

Tabla 4.2. Caracterización de las clases de distancia a fallas en relación al desarrollo de deslizamientos.

Clases de distancia a las fallas	Área (Km ²)	% del área total	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
200	7,1103	81,4159	0,6983	80,56
400	1,6230	18,5840	0,1585	18,29

Para analizar la influencia de la tectónica sobre la susceptibilidad del terreno mediante el SIG, se aplicó un buffer a partir de las estructuras principales del plano tectónico, a dos intervalos de 200 m de distancia (200 y 400 m) [anexo III (figura 3.5)], para comparar la cantidad de deslizamientos presente en cada intervalo [anexo III (figura 3.6)]. En la tabla 4.2, se presenta el resumen de los resultados del análisis. El intervalo de 200 m, ocupa un área de 7,1103 Km², lo que representa el 81,4159 % del área total. Existen 0,6983 Km² ocupados por deslizamientos, 80,56 % del área total ocupada por movimientos de masas. Esto significa que este primer intervalo es una distancia crítica para el desarrollo de deslizamientos, debido a la intensa trituración y debilitamiento del macizo rocoso, acumulación de humedad, mayor intensidad del proceso de meteorización y por constituir zonas de mayor permeabilidad, a través de las cuales, se infiltran las aguas superficiales y subterráneas. A medida que aumenta la distancia, como se aprecia en el intervalo de 400 m, disminuye la influencia de la tectónica sobre los movimientos. Se reporta 0,1585 Km² ocupados por deslizamientos, lo que representa el 18,29 % del área total de deslizamientos.

Estudio de los diques de gabros presentes en la corteza laterítica.

Este tipo de estructura, muy típica en el yacimiento Punta Gorda, aparece intercalada en la corteza laterítica y constituye, por sus propiedades físico-mecánicas e hidrogeológicas, un factor condicionante de las inestabilidades de taludes y laderas. Esta influencia negativa se incrementa cuando la yacencia de los planos de estos diques, coincide o se aproxima a la dirección de las laderas, convirtiéndose de este modo, en superficies de resbalamiento a través de las cuales se desplazan los materiales. En el anexo III [figura 3.7], se muestra el resultado de las mediciones ejecutadas en los bloques de explotación. Existen varios diques buzando hacia el noroeste en los bloques L-46, N-50, O-47, O-49, P-47, Q-50 y R-49. Con buzamientos hacia el este se encuentran en los bloques M-48, N-47 y O-49 y buzamientos hacia el sur-suroeste aparecen en los bloques N-49, P-47, S-49, S-51, S-52 y T-50. En los bloques N-47, N-49, N-50 y Q-50 aparecen buzamientos hacia el sureste.

Otra forma de análisis de estos cuerpos, se realizó mediante la caracterización de los cuerpos de gabros presentes en el substrato rocoso [anexo III (figura 3.8)]. Se observan concentraciones de estos cuerpos hacia el este, sur y centro-oeste. El área total ocupada por gabro es de 0,1440 Km², 1,64 % del área total de trabajo.

Relación de las condiciones hidrogeológicas con el desarrollo de deslizamientos.

Influencia del nivel freático sobre el desarrollo de deslizamientos.

En análisis se realiza a partir del plano de hidroisohipsas [anexo III (figura 3.9)], clasificado en 6 clases: 0m, 5m, 10m, 15m, 20, y 25m. Los niveles más bajos se distribuyen hacia el norte, sur, este y oeste del área. Los niveles de 5m están distribuidos en región central de área, con cierta alineación noreste-suroeste. Los niveles de 10m aparecen hacia el este y oeste. Los restantes niveles por encima de 15m solamente aparecen hacia el este y sureste del yacimiento.

Comparando el plano del nivel freático con el inventario de deslizamientos [tabla 4.3] da como resultado que en los niveles mínimos (0m) y máximos (25m) no se reportan movimientos. En los 5m y 20m se desarrollan el 9,4% y 9,3% respectivamente, en los 15m el 23,3% y en el nivel 10m se reporta el mayor porcentaje de área ocupada por deslizamientos, 57,9%.

Tabla 4.3. Caracterización del plano de hidroisohipsas en relación al desarrollo de deslizamientos.

Nivel freático (m)	Área (Km ²)	% del área total	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
0	1,2083	13,80	0	0
5	3,2083	36,66	0,0819	9,45
10	2,8783	32,89	0,5019	57,90
15	1,1283	12,89	0,2019	23,29
20	0,2883	3,29	0,0809	9,33
25	0,0383	0,44	0	0

Análisis del gradiente crítico y del proceso de sifonamiento. Influencia sobre las inestabilidades.

El estudio del gradiente crítico se realizó para cada horizonte ingeniero-geológico utilizando finalmente el valor medio para compararlo con el gradiente hidráulico obtenido mediante el plano de hidroisohipsas. El valor del gradiente crítico para el horizonte serpentinitas lixiviadas es de 0,4071, para el horizonte de ocre estructurales de 0,7640 y para los ocre inestructurales con perdigones de 1,0290. El valor de cálculo es de 0,7546, o sea la media de los anteriores. De esta forma se ha obtenido un plano donde se señala las áreas de posible

desarrollo de procesos de sifonamiento en la corteza clasificados en dos grados o clases de alta y media susceptibilidad [anexo III (figura 3.10)].

De acuerdo al plano correspondiente [anexo III (figura 3.11)] se observa que el área de susceptibilidad alta, frente a sifonamiento, se ubica al este y en menor medida al sur del yacimiento, en la cual se han desarrollado los mayores movimientos. Las zonas de media susceptibilidad se distribuyen al este, sur y noroeste, estos dos últimos con menor desarrollo.

Influencia de las presiones de la corteza laterítica sobre los deslizamientos.

Para el análisis de la influencia de las condiciones hidrogeológicas sobre el desarrollo de los deslizamientos se confeccionó un plano de subpresiones de la corteza laterítica [anexo III (figura 3.12)], a partir de los datos de la profundidad de alumbramiento del agua subterránea y del nivel de estabilización de las mismas, medidos en 43 calas perforadas en la zona de estudio. Las presiones nulas, se distribuyen en la parte central del yacimiento, relacionadas con las zonas minadas. Los valores de presiones de 2 metros, hacia el oeste, norte central y en una banda alargada de dirección noreste-suroeste, en la región sur y sureste del área. Estas presiones, en las zonas límites entre valores altos y mínimos, influyen sobre las inestabilidades, erosionando los pies de los taludes y laderas, al moverse las aguas subterráneas, hacia las zonas de menor presión.

Tabla 4.4. Caracterización del plano de subpresiones de la corteza laterítica en relación al desarrollo de deslizamientos.

Clases de Subpresiones (m)	Descripción	Área (Km ²)	% del área total	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos	
0	Nula	5,4516	62,304	0,2538	29,280	
2	Baja	2,2136	25,298	0,2265	26,130	
4	Alta	0,8704	9,947	0,2337	26,961	44,589
≥ 6	Muy alta	0,2144	2,450	0,1528	17,628	

En la tabla 4.4 se muestran los resultados del análisis conjunto entre el plano de subpresiones y el inventario de deslizamientos [anexo III, (figura 3.13)]. La clase de presiones nulas (0 m), que ocupa el 62,304 % del área total de trabajo, presenta un total de 0,2538 Km² ocupados por deslizamientos, lo que representa el 29,28 % del área total de deslizamientos, el mayor porcentaje entre todas las clases, sin embargo, los deslizamientos desarrollados son los de menor tamaño. La clase de 2 m de presión, representa el 25,298 % del área total, y en ella se desarrollan el 26,130 % del área total ocupada por deslizamientos. Estos deslizamientos, de mediano tamaño, se ubican fundamentalmente hacia la zona oeste del yacimiento. En las

clases 4 m y ≥ 6 m, que representan tan solo el 12,39% del área total, se desarrollan el 44,589% del área total ocupada por deslizamientos, además de poseer los mayores movimientos desarrollados, que se encuentran hacia el este del yacimiento.

Análisis del factor geomorfológico.

El elemento geomorfológico utilizado en el análisis de susceptibilidad es la pendiente del terreno actual del yacimiento Punta Gorda. Las clases utilizadas en el análisis, se tomaron en base a las pendientes medidas en los trabajos de reconocimiento en el área de trabajo. El plano, muestra los rangos de pendientes umbrales de deslizamiento con cuatro intervalos: 0° - 9° , 10° - 19° , 20° - 39° y $>40^{\circ}$ [anexo III (figura 3.14)].

Como se muestra en el anexo III [figura 3.15] y la tabla 4.5, la clase en la cuál se desarrollan más movimientos es entre 10° y 19° , un total de 8, 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 desarrollan 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, sobre la influencia de las grandes 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 areal.

Tabla 4.5 Caracterización del plano 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
$0^{\circ} - 9^{\circ}$	Baja	3,72	4, 5, 6, 9, 15, 17, 18	35	770	28.20
$10^{\circ} - 19^{\circ}$	Media	3,83	1, 2, 3, 13, 14, 16, 19, 20	40	1450	53.11
$20^{\circ} - 39^{\circ}$	Alta	1,12	10	5	130	4,76
$\geq 40^{\circ}$	Muy alta	0,08	7, 8, 11, 12	20	380	13,91

Análisis de las condiciones ingeniero-geológicas de la corteza laterítica.

Comportamiento de las propiedades físico-mecánicas en la corteza laterítica.

Para el análisis de la corteza laterítica desde el punto de vista geotécnico, fue necesario establecer el estado físico de los diferentes horizontes ingeniero-geológicos, así como su comportamiento mecánico. Del análisis de estas propiedades, se realizó un estudio de su comportamiento en los diferentes niveles de la corteza laterítica, y la determinación de cuatro horizontes ingeniero-geológicos (De Miguel et al, 1998; Almaguer et al, 2001; Blanco et al, 2004), los cuales se describen a continuación de abajo hacia arriba:

Horizonte 1. Roca serpentinizada: La litología predominante es la peridotita más o menos serpentinizada (RMA) (Capítulo II). Además de esta litología, en el substrato rocoso se presentan bloques de gabros distribuidos en casi todo el yacimiento. Las propiedades físico-mecánicas de las peridotitas serpentinizadas son: densidad $2,77 \text{ g/cm}^3$, humedad 0,55%, porosidad 2,8% y resistencia a la compresión de $289,4 \text{ Kg/cm}^2$.

Horizonte 2. Arena limo-gravosa con arcilla (SM): Corresponde al horizonte de Serpentinita Lixiviada (RML), eluvio de las serpentinitas o rocas de la base. Constituyen una arena limo-gravosa con arcilla, en partes es un limo arcilloso con arena. Es talcosa al tacto, con fragmentos angulosos de la roca original de diámetros variables. El color es verdoso y la plasticidad es alta. Se clasifica según el SUCS como SM (arena limosa). Los valores promedios de su granulometría son: Grava 36 %, Arena 37 %, Limo 18 %, Arcilla 9 %, Coloide 6 %. El peso específico relativo de los sólidos es de 27,4. La plasticidad es alta, con Límite Líquido 63 %, Límite Plástico 37 % e Índice de Plasticidad 26 %.

Las condiciones naturales por encima de la zona saturada se presentan con humedad 78,4 %, peso específico húmedo y seco $13,8 \text{ kN/m}^3$ y $7,7 \text{ kN/m}^3$ respectivamente, condicionando la saturación al 83%. Las condiciones naturales en la zona saturada presenta humedad 85,3 % y pesos específico húmedo y seco son $15,5 \text{ kN/m}^3$ y $8,4 \text{ kN/m}^3$ respectivamente.

Horizonte 3. Limo arcilloso de alta plasticidad (MH): este horizonte ingeniero geológico está constituida por tres subcapas (3c, 3b y 3a), que se corresponden con las capas geológico-genéticas: ocre inestructural sin perdigones (OI), ocre estructural final (OEF) y ocre estructural inicial (OEI) respectivamente. Las semejanzas en sus propiedades, permiten agruparlas en una sola capa ingeniero geológica. Está constituido por un limo arcilloso con poca arena, de alta plasticidad, de color carmelita amarillento a verde amarillento con algunas manchas de color negro, verdosas y otras de color rojo, en partes predomina el aspecto abigarrado, y pueden encontrarse fragmentos de serpentinita lixiviada o presentarse la estructura de la roca original. Se clasifica según el SUCS como un MH (limo arcilloso de

alta plasticidad).

Los valores promedios de su granulometría son: Grava 1 %, Arena 10 %, Limo 54 %, Arcilla 34 %, Coloide 21%. El peso específico relativo de los sólidos es de 36,1. La plasticidad es alta, con Límite Líquido 75 %, Límite Plástico 47 % e Índice de Plasticidad 28%. Las condiciones naturales por encima de la zona saturada se presenta con humedad 55,5 %, peso específicos húmedo y seco son 17,3 kN/m³ y 11,4 kN/m³, respectivamente, los que condicionan que estén saturadas con un 88 %. En la zona saturada se presenta con humedad 69 %, pesos específicos húmedo y seco son 17,2 kN/m³ y 10,3 kN/m³, respectivamente. Según el cortante en esquema rápido natural, la cohesión es de 0,034 MPa y el ángulo de fricción interna de 16,5°. Por el esquema rápido saturado, la cohesión es de 0,021 MPa y el ángulo de fricción interna de 15°. Por el cortante en esquema lento saturado la cohesión es de 0,032 MPa y el ángulo de fricción interna de 16,4°. Según el cortante, en esquema rápido natural, la cohesión es de 0,037 MPa y el ángulo de fricción interna de 14,3°.

Horizonte 4. Arena gravo-limosa (SM): Corresponde a los ocres inestructurales con perdigones (OICP), formada por una arena limo-gravosa con arcilla. El color es rojo ladrillo oscuro, en partes aparecen manchas amarillas y negras. La fracción areno gravosa, esta constituida fundamentalmente por perdigones de hierro que disminuyen su diámetro y cantidad con la profundidad. La presencia de éstos últimos son los que establecen una diferencia notable, apreciable a simple vista, con el resto de los estratos lateríticos presentes. Se clasifica, según el SUCS, como un SM (arena limosa de baja plasticidad).

Los valores promedios de su granulometría son: Grava 31 %, Arena 46 %, Limo 17 %, Arcilla 5 %, Coloide 3 %. El peso específico relativo de los sólidos es de 36,4. De acuerdo a los Límites de Attemberg, la plasticidad se cataloga desde no plástica hasta muy plástica, pero como promedio es de baja plasticidad, con Límite Líquido 42 %, Límite Plástico 30 % e Índice de Plasticidad 12 %.

Las condiciones naturales por encima de la zona saturada se presentan con humedad 31,8 %, peso específico húmedo y seco de 20,4 kN/m³ y 15,6 kN/m³ respectivamente. Son los pesos específicos más altos de todos los estratos lateríticos presentes y condicionan que estén saturadas con un 82 %. En la zona saturada, se presenta con humedad 48 %, peso específico húmedo y seco 19,9 kN/m³ y 13,6 kN/m³ respectivamente. En correspondencia con sus pesos específicos y composición granulométrica, entre los suelos presentes, este horizonte posee los valores de resistencia más altos, según el cortante en esquema rápido saturado la cohesión es de 0,031 MPa y el ángulo de fricción interna de 18,3°.

En la figura 4.9, se muestra el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas para cada horizonte ingeniero-geológico, asociado a cada horizonte geólogo-genético [tabla 4.6]. La humedad tiende a disminuir con el grado de alteración de la roca, de valores por encima del 80% en el horizonte 2 hasta alrededor del 50% en la parte superior del corte, esto es debido al gran porcentaje de minerales arcillosos presentes en la parte inferior del corte, que le confieren a la corteza gran capacidad de almacenaje de agua, y poca permeabilidad, transmitiéndola muy lentamente, manteniéndose con altas humedades, incluso durante épocas de seca, y que las aguas subterráneas se mueven en el contacto roca-suelo. El peso específico, tiene un comportamiento opuesto a la propiedad anterior, a medida que aumenta el grado de descomposición, aumenta de valores 10 KN/m³ hasta mayores de 20 KN/m³, dado por la concentración de óxidos e hidróxidos de hierro.

Tabla 4.6. Horizontes ingeniero-geológicos presentes en el yacimiento Punta Gorda (Guardado y Almaguer, 2001; Blanco et al, 2002; Almaguer et al, 2005a)

Horizontes ingeniero geológicos		Horizontes geólogo-genéticos	Tipo de suelo (SUCS)	Observaciones
4		Ocre inestructural con perdigones (OICP)	SM – Arena gravo-limosa con fracción gruesa constituida por perdigones de óxido de hierro. Plasticidad baja. Color – Rojo ladrillo oscuro.	A medida que se desciende en el corte aumenta la humedad, disminuyen los pesos específicos naturales y disminuyen las características resistentes.
3	3c	Ocre inestructural sin perdigones (OI)	MH- Limo arcilloso de alta Plasticidad. Color- varía desde carmelita amarillento hasta verde amarillento, en partes abigarrado.	
	3b	Ocre estructural final (OEF)		
	3a	Ocre estructural inicial (OEI)		
2		Serpentinita lixiviada (RML)	SM – Arena limo-gravosa con arcilla, con fracción gruesa constituida por fragmentos de serpentinitas. La fracción fina presenta alta plasticidad. Color- verdoso.	
1		Roca ultrabásica Serpentinizada (RMA)	Roca.	

El índice de plasticidad desde los horizontes 2 al 3 se mantiene prácticamente constante con valores aproximadamente entre 27 y 30, solo existe un notable cambio en horizonte 4, suelo residual, donde hay una disminución hasta 12 debido a la disminución del contenido de material arcilloso y aumento de los materiales arenosos. La cohesión y la fricción interna tienden a disminuir en los horizontes inferiores, con un notable aumento en el horizonte 4.

Una característica, determinada a partir de los límites de Atterberg, es la consistencia

relativa, la cuál permite evaluar las condiciones de soporte de los materiales que componen cada horizonte ingeniero-geológico (Penson, 1994). De los resultados se tiene en el horizonte 4, los materiales presentan baja consistencia en estado saturado ($Cr = -0,5$) donde el porcentaje de humedad ($W = 48\%$) sobrepasa el límite líquido ($LL = 42$); en estado no saturado la consistencia adquiere valores mayores ($Cr = 0,85$). En los horizontes 2 y 3 la consistencia presenta valores positivos pero siempre menores que 1, teniendo para estado saturado valores de 0,21 y no saturado de 0,7. En el horizonte 2 vuelve a disminuir la consistencia tanto en estado saturado ($CR = -0,85$) como no saturado ($Cr = -0,59$), manteniéndose los porcentajes de humedad por encima del límite líquido de los materiales, siendo esto un elemento a considerar durante la construcción de taludes para laboreos mineros.

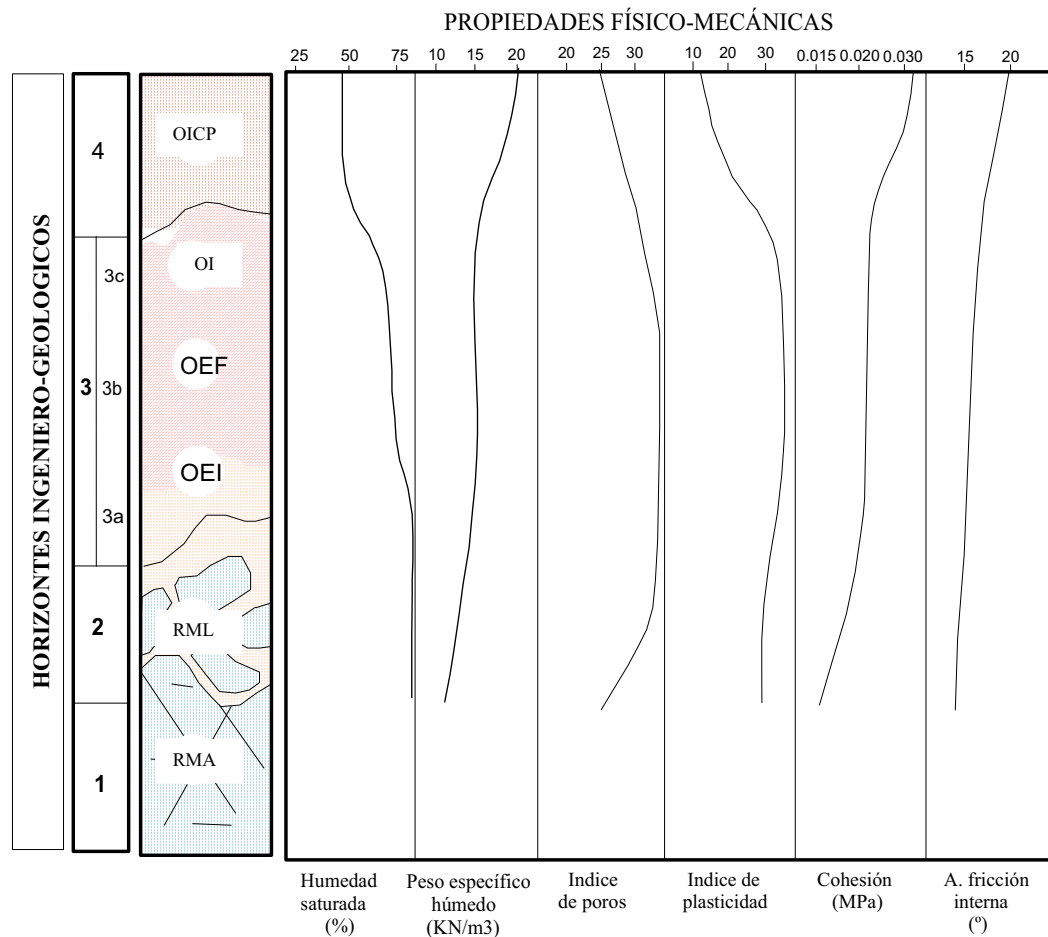


Figura 4.9. Características ingeniero-geológicas del perfil de meteorización en el yacimiento Punta Gorda (Almaguer, 2003; Almaguer et al 2003; Almaguer et al, 2005a).

Análisis de la colapsabilidad de los horizontes ingeniero geológicos.

Un elemento mas que permite conocer los mecanismos de roturas en los taludes y laderas presentes en el yacimiento, es mediante la colapsabilidad de los diferentes horizontes

ingeniero-geológicos de la corteza laterítica [tabla 4.7]. De acuerdo a los resultados, el horizonte superior (4) y el inferior (2), clasificados como arenas gravo-limosas y arenas limo-gravosas respectivamente, colapsan en condiciones naturales. Solo el horizonte intermedio (3), clasificado como limo arcilloso de alta plasticidad es estable.

Tabla 4.7. Resultados del análisis de colapsabilidad de los horizontes ingeniero-geológicos (Almaguer, 1998, 2001).

Horizontes ingeniero-geológicos	Métodos de análisis de colapsabilidad					
	Método de Denisov	Colapsabilidad	Método del Código Soviético de Construcción	Colapsabilidad	Método de Gibbs	Colapsabilidad
4	KD= 0,51-0,69	Si	KS= -0,08-0,34 S= 32,3-47,5	Si	KG= 1,23-1,93	Si
3	KD= 4,32-5,44	No	KS= -3,10-(-1,22) S= 569	No	KG= 0,05-0,63	No
2	KD= 0-54-0,65	Si	KS= 1,02-1,33 S= 37,5-48,2	No	KG= 1,09-1,15	Si
1	No calculado					

Lo anterior significa, que en la corteza laterítica, los movimientos de masas que ocurren naturalmente pueden manifestarse mediante la rotura del horizonte superior, lito-genéticamente relacionado con los OIP y el inferior relacionado con la SL. De esta forma queda totalmente inestable el talud o ladera, y solo faltaría la acción de un factor disparador como el aumento de las presiones intersticiales, un movimiento sísmico, la ubicación de una sobrecarga, o simplemente la acción del factor tiempo, para la generación del movimiento. Para fundamentar una poco más el análisis anterior, se estudió el comportamiento de los estados de consistencia y la humedad de los horizontes lateríticos, porque ninguna otra propiedad, por más compleja que sea, puede decir tanto de los suelos muy finos como estos límites (Pearson, 1994). Estos definen su resistencia al esfuerzo cortante, o sea, la oposición que ofrece la masa de suelo a que se le deforme.

En la figura 4.10, se muestra la relación entre el límite líquido, índice de plasticidad y la humedad. La humedad aumenta a medida que descendemos en el corte, existiendo una diferencia de 35% de humedad entre el horizonte 4 y 2. La plasticidad se comporta de manera similar, o sea, los horizontes inferiores son capaces de resistir mayores esfuerzos, debido a su mayor plasticidad.

Analizando el límite líquido y teniendo en cuenta que este se define como el por ciento (%) de humedad a partir del cual un suelo se comporta como un fluido, resulta que en los horizontes 4 y 2, la humedad natural de estos sobrepasan el límite. El caso más crítico es el horizonte 2, donde la humedad sobrepasa en un 22% el límite líquido. Esto indica que, en los taludes y laderas dentro del yacimiento, la base de estos, correspondiente al horizonte de serpentinita lixiviada, y la parte superior de ocre inestructurales con perdigones, son inestables, coincidiendo con los resultados de colapsabilidad.

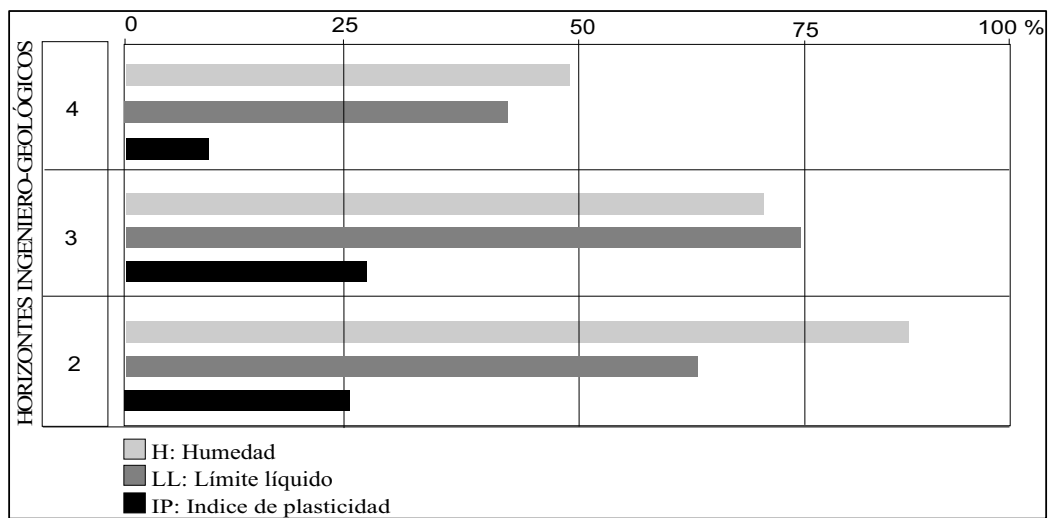


Figura 4.10. Relación de la humedad, límite líquido y la plasticidad en los horizontes ingeniero-geológicos.

Valoración del factor de seguridad por métodos de equilibrio límite.

De la aplicación de los métodos descritos en el capítulo II, resultaron 30 corridas o modelaciones para el cálculo del factor de seguridad [Anexo III (tabla 3.2)]. Se utilizaron como variables de cálculo, la potencia de ocre estructurales, la potencia de la serpentinita lixiviada, el nivel de agua y la altura del talud, la carga a que se somete el talud al colocar la excavadora, así como la distancia de posicionamiento de la misma con respecto al borde del talud. El ángulo del talud utilizado fue de 45° (Almaguer, 1998, 2003; Almaguer et al, 2003).

Para una mejor comprensión del peso de las variables analizadas sobre el factor de seguridad obtenido, se realizó un análisis estadístico multivariado. La matriz de correlación [tabla 3.9] muestra correlaciones negativas relevantes, entre el factor de seguridad y la potencia de serpentinitas lixiviadas y la altura del talud. Esto significa que a medida que aumenta estas potencias en la corteza laterítica, la estabilidad de los taludes disminuye. Otro resultado relevante es la correlación positiva entre el factor de seguridad y la distancia de la excavadora con respecto al borde de los taludes. Es evidente que, la excavadora con más de 320 ton,

ubicada a poca distancia, genera un desequilibrio de las fuerzas dentro de la corteza, aumentando las fuerzas motoras y la inestabilidad de los taludes.

Aplicando el método de análisis de componentes principales, da como resultado dos grupos que explican en conjunto, el comportamiento de las variables en un 82 %. La primera componente explica el 53,5 %, incluyendo la potencia de las menas lateríticas, la potencia de la serpentinita lixiviada, el nivel de agua y la altura del talud. La segunda componente explica en 28,5 %, incluyendo la posición de la carga, representada por la excavadora, con respecto al borde del talud.

Tabla 4.8. Análisis de correlación entre las variables utilizadas en el cálculo del factor de seguridad.

Análisis de correlación	Potencia de ocre (m)	Potencia de serpentinitas lixiviadas (m)	Nivel de agua en el talud (m)	Altura del talud (m)	Distancia de la excavadora al borde del talud (m)	Factor de seguridad
Potencia de ocre (m)	1					
Potencia de serpentinitas lixiviadas (m)	0,19115456	1				
Nivel de agua en el talud (m)	0,37311747	0,41910238	1			
Altura del talud (m)	0,5519013	0,86722706	0,45856496	1		
Distancia de la excavadora al borde del talud (m)	0,07671008	-0,06762199	-0,02114546	-0,07901558	1	
Factor de seguridad	-0,21479256	-0,72302116	-0,44082689	-0,75175159	0,62951096	1

Análisis del factor de seguridad por el método de rotura planar.

Suelos SM (OICP). De los resultados obtenidos en el cálculo del factor de seguridad [tabla 4.9], se tiene que para los suelos SM, relacionados con los horizontes de OICP o las lateritas redepositadas, el FS óptimo es para profundidades de superficie de rotura ≤ 15 metros, con pendientes de 10° . Si la pendiente aumenta a 20° , el factor de seguridad óptimo (1,85) es para profundidades menores de 5 metros. El análisis mediante líneas de tendencia, presenta que el FS, disminuye de manera exponencial, a medida que la pendiente y la profundidad de rotura aumentan [figuras 4.11 y 4.12].

Tabla 4.9. Factor de seguridad determinado para suelos SM (OICP y lateritas redepositadas).

Tipo de suelo SM (OICP, LR)		Pendiente de la ladera o talud			
		10	20	30	40
Profundidad de superficie de rotura	5	4,3670	1,8464	1,1582	0,8000
	10	2,1835	0,9232	0,5791	0,4000
	15	1,4557	0,6155	0,3861	0,2667
	20	1,0918	0,4616	0,2896	0,2000
	25	0,8734	0,3693	0,2316	0,1600

FS: estable; FS: medianamente estable; FS: inestable

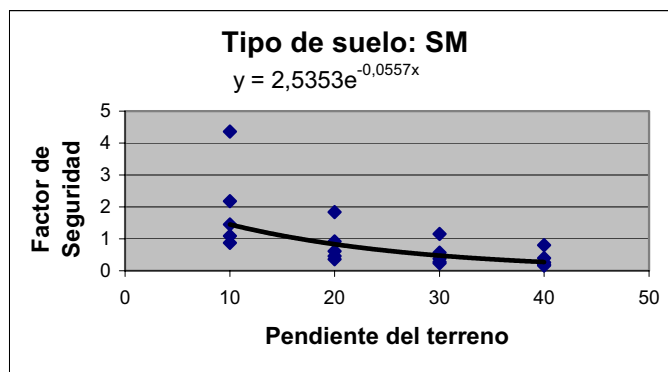


Figura 4.11. Relación entre el FS y la pendiente del terreno para los suelos SM.

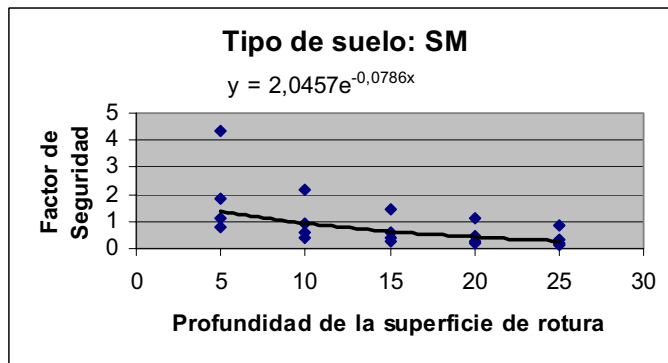


Figura 4.12. Relación entre el FS y la profundidad de la superficie de rotura para los suelos SM.

Suelos MH. En los suelos tipo MH, el FS óptimo se mueve en espacio más restringido que en los SM, para profundidades ≤ 10 metros y pendiente de 10° y para profundidad de 5 metros y pendientes de 20° [tabla 4.10 y figuras 4.13 y 4.14]. Para pendientes de 10° , si se aumenta la profundidad, el FS se considera medianamente estable, al igual que en pendientes de 30° para profundidades de 5 metros de la superficie de rotura.

Tabla 4.10. Factor de seguridad determinado para suelos MH.

Tipo de suelo MH (OI, OEF, OEI)		Pendiente de la ladera o talud			
		10	20	30	40
Profundidad de superficie de rotura	5	3,3831	1,6266	1,0208	0,7057
	10	1,6916	0,8133	0,5104	0,3528
	15	1,1277	0,5422	0,3403	0,2352
	20	0,8458	0,4066	0,2552	0,1764
	25	0,6766	0,3253	0,2042	0,1411

(FS: estable; FS: medianamente estable; FS: inestable).

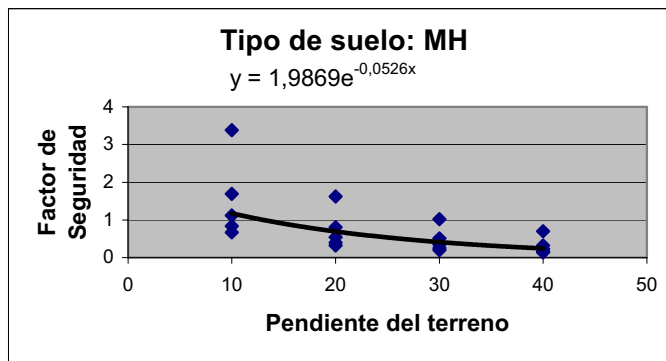


Figura 4.13. Relación entre el FS y la pendiente del terreno para los suelos MH.

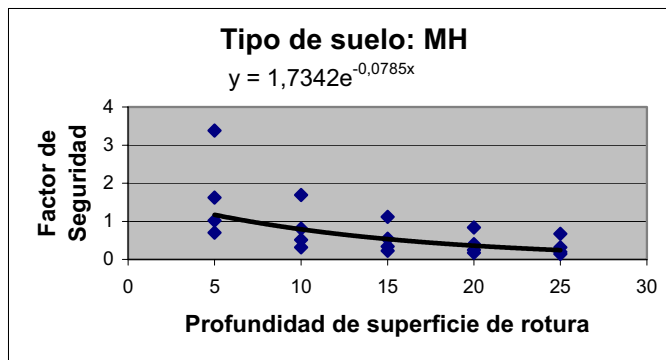


Figura 4.14. Relación entre el FS y la profundidad de la superficie de rotura para los suelos MH.

Suelos SM (RML). El análisis realizado para los suelos SM [tabla 4.11 y figuras 4.15 y 4.16], relacionados con las serpentinitas lixiviadas o alteradas, resulta en FS óptimos mayores de 2.7, en pendientes de 10° y profundidades de hasta 6 metros. Para pendientes de 20°, el FS estable es a profundidades menores de 4 metros. Para las pendientes de 30° y 40°, la estabilidad se da para profundidades de 2 metros.

Tabla 4.11. Factor de seguridad determinado para suelos SM (SL).

Tipo de suelo SM (RML)		Pendiente de la ladera o talud			
		10	20	30	40
Profundidad de superficie de rotura	2	8,1310	3,9077	2,4503	1,6912
	4	4,0655	1,9539	1,2251	0,8456
	6	2,7103	1,3026	0,8168	0,5637

(FS: estable; FS: medianamente estable; FS: inestable).

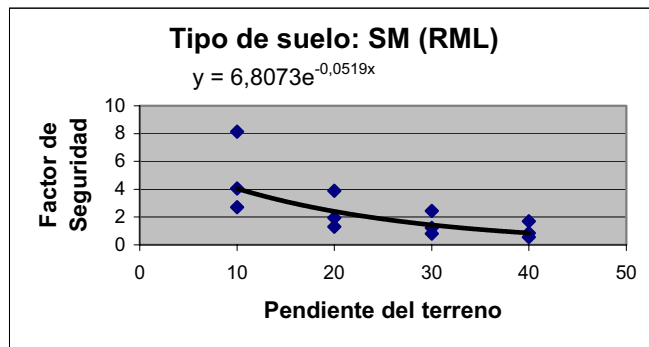


Figura 4.15. Relación entre el FS y la pendiente del terreno para los suelos SM (RML).

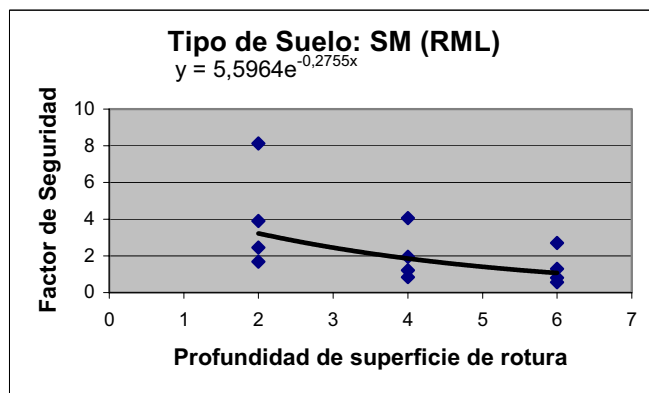


Figura 4.16. Relación entre el FS y la profundidad de la superficie de rotura para los suelos SM (RML).

Análisis de correlación.

Con el objetivo de obtener la relación existente, entre cada variable utilizada en los cálculos y el FS [anexo III (tabla 3.3)], se realizó en análisis de correlación [tabla 4.12]. Los resultados muestran dos elementos importantes a considerar:

- Correlación negativa relevante entre el FS y la pendiente del terreno. Esto significa que, a medida que aumenta los valores de pendiente del terreno, disminuyen los valores del FS, y por tanto los taludes y laderas se hacen más inestables. De acuerdo a la curva de tendencia

[figura 4.17], la pendiente de 13°, se considera la crítica, a partir de la cuál el FS es por debajo de 1,5.

- Correlación negativa entre el FS y la profundidad de la superficie de rotura. Significa un comportamiento similar al anterior, a medida que aumenta la profundidad, disminuye de manera exponencial el FS, aumentando la inestabilidad en los taludes y laderas. La profundidad crítica es mayor de 5 metros, donde el FS disminuye por debajo de 1,5 [figura 4.18].

Tabla 4.12. Análisis de correlación entre las variables de cálculo del Factor de Seguridad con el método de rotura planar para talud infinito.

	c	γ	φ	Pendiente	Potencia	FS
c	1					
γ	0,76067194	1				
φ	0,48280177	0,93572186	1			
Pendiente	-1,9953E-17	1,9362E-17	0	1		
Potencia	0,58991342	0,50187334	0,35650447	2,5129E-17	1	
FS	-0,48682499	-0,38056656	-0,24887122	-0,51108205	-0,56749994	1

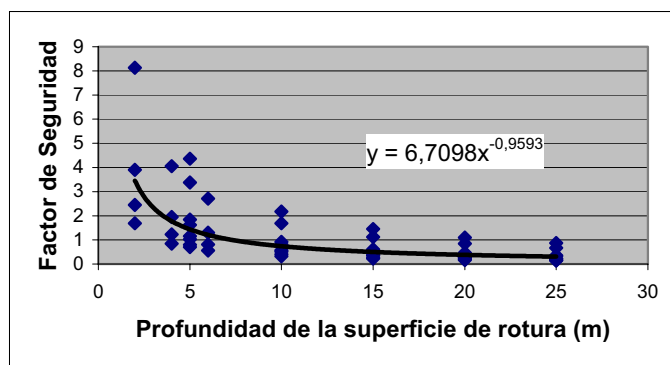


Figura 4.17. Relación entre el FS y la profundidad de la superficie de rotura en el yacimiento Punta Gorda.

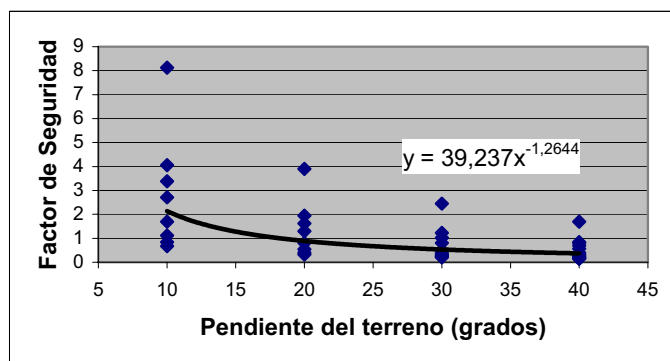


Figura 4.18. Relación entre el FS y la pendiente del terreno en el yacimiento Punta Gorda.

Clasificación del perfil de meteorización desde el punto de vista ingeniero-geológico.

Del análisis de las propiedades físico-mecánicas de los materiales presentes en el yacimiento Punta Gorda, la determinación de los horizontes ingeniero-geológicos y su relación con los horizontes lito-genéticos, además de la determinación de los mecanismos y tipologías de movimientos de masas, se realizó la clasificación del perfil de meteorización desde el punto de vista ingeniero-geológico [anexo III (tabla 3.4)]. La clasificación propuesta, introduce una descripción geotécnica del perfil de meteorización, basada en la información geológica obtenida por la inspección visual y reconocimiento de rasgos típicos de la desintegración física y descomposición química de las rocas en los afloramientos, y en muestras de núcleos de perforación, además, de la información mecánica, física e hidráulica derivada de ensayos de campo y laboratorio, apoyados con observaciones microscópicas (Almaguer et al, 2005a).

Un rasgo importante de la clasificación, es que se muestra para cada clase, el mecanismo de rotura asociado a estas. De esta manera, se tienen mecanismos de rotura de manera desorganizada y relacionados con la caída libre de la masa de suelo, en el horizonte más meteorizado (grado IV), sin control estructural sobre los movimientos. En los grados intermedios (II y III), el mecanismo predominante es la rotura a través de una superficie definida, relacionada con las superficies relícticas de grietas y fallas en la corteza residual. Los movimientos predominantes son rotacionales, traslacionales y en cuña, aunque en la mayoría de los casos, los movimientos son combinados (planar-rotacional, cuña-rotacional). En el grado I, se manifiestan los tres mecanismos de rotura. La tipología de los movimientos depende de la posición espacial relativa (yacencia) de las discontinuidades de la roca con respecto a la dirección e inclinación de las laderas o taludes, así como de la intensidad del agrietamiento. En los sitios donde el agrietamiento se manifiesta muy espaciado, se generan movimientos planares o en cuña. Cuando el espaciamiento disminuye, la roca se comporta como el suelo, generándose movimientos rotacionales.

Relación de las condiciones geotécnicas con el desarrollo de deslizamientos.

Para el análisis de las condiciones geotécnicas del terreno, se confeccionó el plano de tipo de suelo [anexo III (figura 3.16)]. 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 ocupada por roca fresca, arenas y gravas, relacionadas espacialmente con los cauces de los ríos presentes en el área [tabla 4.13].

Tabla 4.13. Caracterización del plano 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)	3,172	36,21	0,2370	27,34
Limo arcilloso de alta plasticidad (MH)	4,270	48,76	0,4568	52,70
Gravas, arenas y limos (GC)	0,770	8,76	0,0065	0,75
Roca (R)*	0,551	6,26	0,1665	19,21

(R)* : Simbología seleccionada por el autor.

Del análisis de los movimientos de masas [anexo III (figura 3.17)], 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.

Relación del uso actual del suelo con el desarrollo de deslizamientos.

Haciendo un análisis del uso del suelo en el área de trabajo, se tienen 5 clases fundamentales [anexo III (figura 3.18) y tabla 4.14]: zonas de vegetación natural (4,74 Km²), distribuida en la periferia del yacimiento, predominando hacia el este; áreas reforestadas (1,94 Km²) y áreas minadas (1,62 Km²), distribuidas en la parte interna del área; zonas de depósitos de mineral (0,28 Km²) y red vial (0,16 Km²).

De acuerdo al desarrollo de deslizamientos [anexo III (figura 3.19)], el uso de suelo mas 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 da una medida de la inestabilidad que presenta el terreno debido a sus propias 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 deslizamientos.

Tabla 4.14. Caracterización del plano 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	% del área total ocupada por deslizamientos
-------------------------	-------------------------	------------------	---------------------------------	---

Áreas minadas	1,6181	18,5027	0,1158	13,34
Áreas reforestadas	1,9430	22,2179	0,0978	11,28
Caminos mineros	0,1613	1,8444	0,0000	0,00
Depósitos de mineral	0,2766	3,1628	0,0000	0,00
Vegetación natural	4,7462	54,2720	0,6530	75,33

Valoración y reclasificación de los planos de factores condicionantes.

Valoración de los factores condicionantes.

Una vez analizados todos los factores condicionantes de los deslizamientos en el área de estudio, se procedió a la valoración de los mismos en función de las áreas de cada clase y del área ocupada por deslizamientos en las mismas. Los resultados se muestran en la tabla 4.15.

Tabla 4.15. Valoración de los factores condicionantes de las inestabilidades en el yacimiento Punta Gorda.

Factores utilizados en el análisis de susceptibilidad											
Grupos lito-estructurales		Tectónica		Hidrogeología		Geomorfología		Geotecnia		Uso de suelo	
Litologías		Distancias a fallas (buffer)		Subpresiones en la corteza		Pendiente umbral		Tipo de suelo		Clases de uso de suelo	
Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor
Serpentinita lixiviada	21,72	200 m	17,91	0 m	8,49	0-9°	211,21	SM	13,63	Áreas minadas	13,05
Serpentinita de cause	1,14									Áreas reforestadas	9,18
Lateritas residuales	19,52	400 m	16,02	2 m	193,4	10-19°	386,31	MH	19,51	Caminos mineros	0
Lateritas redepositadas	25,11			4 m	48,97	20-39°	118,43	GC	1,54	Depósitos de mineral	0
Sedimentos aluviales	1,54			≥ 6 m	130,0	>40°	4846,9	R	2,15	Vegetación natural	25,10

En relación a las litologías, las áreas ocupadas por serpentinitas de cause y sedimentos aluviales, presentan los menores valores de probabilidad, debido a que en estos sitios es donde se depositan los materiales de las partes frontales de los movimientos. Las lateritas residuales

y serpentinita lixiviada presentan valores de probabilidad altos, y las lateritas redepositadas muy altos, debido al amplio desarrollo de movimientos dentro del área que ocupan. De acuerdo a la tectónica, los valores indican una alta influencia sobre los deslizamientos, debido a la alta complejidad e intenso agrietamiento del macizo rocoso.

Sobre la valoración de las subpresiones de la corteza laterítica se tiene alta probabilidad para la clase de 2 m, en la cual se reporta la mayor cantidad de área ocupada por deslizamientos en relación a su área. Valores altos los experimentan las clases de 6 m y 4 m y la menor probabilidad por la clase de 0 m. En cuanto a las pendientes umbrales, la mayor probabilidad la presentan las de 40°, debido a la pequeña área que ocupan. En orden de importancia están las pendientes entre 10-19°, en las cuales se desarrollan los mayores deslizamientos reportados en el área de estudio.

En la valoración según el tipo de suelo, las mayores probabilidades se relacionan con los suelos MH, relacionados con las cortezas redepositadas. La valoración disminuye un poco en los suelos SM, relacionados con la corteza laterítica residual, las cuales presentan mayor extensión en el área del yacimiento. Los menores valores se relacionan con las áreas ocupadas por las clases R y GC.

En el plano de uso de suelo, la valoración mayor se relaciona con las áreas ocupadas por vegetación natural, en las cuales se manifiestan los movimientos de mayor extensión debido a la inestabilidad natural de las cortezas lateríticas. Las áreas minadas y reforestadas presentan valoraciones intermedias, manifestándose mayor estabilidad en las mismas. Esto significa por un lado que la actividad minera no es la que genera grandes problemas de inestabilidad en taludes, y por otro que las medidas tomadas de reforestación están protegiendo al medio de los agentes erosivos y desestabilizadores.

Reclasificación de los planos de factores.

El paso siguiente al proceso de valoración de las clases de cada factor analizado, a partir de la técnica probabilística utilizada, es la reclasificación de cada plano en función de los valores obtenidos en el paso previo [tabla 4.16].

El plano del factor lito-estructural se reclasificó en 3 clases de susceptibilidad: baja, alta y muy alta [anexo III (figura 3.20)]. La clase de baja susceptibilidad, ubicada en la periferia del yacimiento, hacia el sur, sureste, norte, y oeste. Corresponde con el área ocupada por materiales granulares, representados por los sedimentos fluviales y el área ocupada por roca debilitada tectónicamente, relacionada con las serpentinitas de los cauces fluviales. Esta clase ocupa el 29,38% del área total de trabajo. La clase de alta susceptibilidad, se ubica en

toda la parte interna del yacimiento. Se corresponde con el área ocupada por roca con apariencia de suelo con estructura de la roca original, representada por la corteza residual y por roca debilitada tectónicamente, representado por las serpentinitas lixiviadas. Ocupa el 54,81% del área total. El área de susceptibilidad muy alta, se ubica hacia el norte y noreste del yacimiento. Ocupa el 16,65% y corresponde con las rocas con apariencia de suelo con estructura sedimentaria, representadas por las lateritas redepositadas.

El plano de factor tectónico se reclasificó en dos clases: alta y muy alta [anexo III (figura 3.21)]. La clase de susceptibilidad alta corresponde con la distancia de 400 m de las fallas.

Ocupa el 18,58% del área total. La clase de susceptibilidad muy alta, se corresponde con la distancia de 200 m y ocupa el 81,41% del área.

El plano que caracteriza las condiciones hidrogeológicas, se reclasificó en tres clases de susceptibilidad: baja, alta y muy alta [anexo III (figura 3.22)]. La clase de susceptibilidad baja, se relaciona con las supresiones nulas en el yacimiento y ocupa el 62,30% del área. La clase alta se relaciona con las subpresiones de 4 m, y ocupa el 9,94%. Se distribuye en áreas aisladas hacia en oeste, norte y con cierta alineación NE-SW hacia el sureste. La tercer clase, de susceptibilidad muy alta, está representada por las subpresiones de 6 m y 2 m, ocupando un área de 27,74%. Se distribuye en franja alineada desde el sur al este con dirección NE-SW, y en pequeñas áreas ubicadas en el oeste y norte del yacimiento.

El plano de pendiente [anexo III (figura 3.23)], se reclasificó en cuatro clases de susceptibilidad: baja, media, alta y muy alta. La clase de susceptibilidad baja se relacionada con el intervalo de pendiente 20° – 39° , y ocupa el 12,86% del área. La clase media se relaciona con las pendientes 0° - 9° , y es la que ocupa mayor extensión, 42,51% del área total. La clase de alta susceptibilidad se relaciona con las pendientes de 10° - 19° . Ocupa el 43,65% del área. La alta susceptibilidad se relaciona con las mayores pendientes $>40^{\circ}$. Ocupando el 0,92% del área del yacimiento.

El plano de tipo de suelo, que caracteriza las condiciones geotécnicas de la corteza laterítica, se reclasificó en tres clases: baja, alta y muy alta [anexo III (figura 3.24)]. La clase de menos susceptibilidad (baja), se relaciona con las áreas ocupadas por roca dura y por grava, arena y arcilla, relacionadas espacialmente con los cauces fluviales. Esta ocupa el 15,2% del área de trabajo. La clase de susceptibilidad alta, está representada por las arenas limosas (SM) y ocupa

el 32,21% del área. La clase muy alta, ocupa el 48,76% del área total y está representada por los limos arcillosos de alta plasticidad.

El plano de uso de suelo se reclasificó en cuatro clases: baja, media, alta y muy alta [anexo III (figura 3.25)]. La clase de baja susceptibilidad se relaciona con las áreas ocupadas con los caminos mineros y depósitos de mineral, ocupando el 5,01% de área total. Su distribución areal se relaciona con la red vial primaria y algunos sitios aislados al norte, sur este y el oeste del yacimiento, donde no se han manifestado movimientos de relevancia. La clase media está representada por las áreas reforestadas, distribuidas en la parte central, al sur y al oeste del yacimiento, ocupando el 22,21% del área total. Las áreas de susceptibilidad alta, se relaciona con las áreas minadas, desprovistas de una cubierta vegetal que la proteja de los agentes erosivos. Esta se distribuye en la parte central, y en pequeñas franjas al sur, este y oeste del yacimiento. Ocupa el 18,5% de área total. La clase de susceptibilidad muy alta, se relaciona con las áreas cubiertas por vegetación natural, donde se han desarrollado los mayores movimientos de masas. Ocupa el 54,27% del área total de trabajo y se distribuye en toda la parte externa del yacimiento. Tiene su mayor concentración hacia el este.

Tabla 4.16. Resultados del proceso de reclasificación de los planos de susceptibilidad temáticos.

Factor	Clases	No. de píxel	% del área total	Valor	Susceptibilidad
Lito-estructural	Materiales granulares	21300	29,38	0,00	Baja
	Roca debilitada tectónicamente. Serpentinita de cause	30797		1,14	
	Roca con apariencia de suelo con estructura de roca original	172944	54,81	19,52	Alta
	Roca debilitada tectónicamente. Serpentinita lixiviada	72097		21,70	
	Roca con apariencia de suelo con estructura sedimentaria	52586	16,65	25,11	Muy alta
Tectónico	Distancia 200 m	65007	81,41	17,91	Muy alta
	Distancia 400 m	284575	18,58	16,02	Alta
Hidrogeológico	Subpresión nula (0 m)	218367	62,30	8,49	Baja
	Subpresión alta (4 m)	35001	9,94	48,97	Alta
	Subpresión muy alta (6 m)	8783	27,74	130	Muy alta
	Subpresión baja (2 m)	87762		193,4	
Pendiente umbral de deslizamiento	Alta (20° – 39°)	42456	12,8	118,43	Baja
	Baja (0° – 9°)	201696	42,51	211,21	Media
	Media (10° – 19°)	111748	43,65	386,31	Alta
	Muy alta (> 40°)	9785	0,92	4846,90	Muy alta

Tipo de suelo	Grava, arena y arcilla (GC)	30797	15,02	1,54	Baja
	Roca	21300		2,15	
	Arena limosa (SM)	124683	36,21	13,63	Alta
	Limo arcilloso de alta plasticidad (MH)	172998	48,76	19,51	Muy alta
Uso actual del suelo	Caminos mineros	6446	5,01	0,00	Baja
	Depósitos de mineral	11086		0,00	
	Áreas reforestadas	77758	22,21	9,181	Media
	Áreas minadas	64750	18,50	13,05	Alta
	Áreas de vegetación natural	190052	54,27	25,10	Muy alta

Descripción del plano de susceptibilidad.

El plano de susceptibilidad del terreno a la rotura obtenido en la investigación esta clasificado en cuatro clases: Susceptibilidad baja, media, alta y muy alta [tabla 4.17 y figura 4.19]. Las mismas se describen a continuación:

- Susceptibilidad baja: ocupa un área de 3,35 Km² (38,33% del área total). De forma areal se distribuye en la parte central del yacimiento, relacionado con las zonas reforestadas. Además se relaciona con las zonas periféricas del yacimiento, 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 yacimiento, 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). Su distribución es muy localizada 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 yacimiento.
- 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 presente su mayor acumulación en forma continua y alineada en dirección noreste-suroeste.

Tabla 4.17. Caracterización del plano de susceptibilidad a la rotura.

Descripción	Clases de susceptibilidad			
	Baja	Media	Alta	Muy alta
No. píxel	135923	122812	5294	90579
Área (Km ²)	3,35	3,03	0,13	2,23
% de área	38,33	34,63	1,49	25,54

Conclusiones.

- En el yacimiento Punta Gorda se han desarrollado 20 deslizamientos importantes. La tipología y los mecanismos de rotura están en función de las condiciones estructurales y de las características físico-mecánicas de los suelos y rocas. Hay predominio de movimientos combinados de varias tipologías.
- La aplicación de la metodología de análisis de los factores condicionantes, ha permitido valorar la influencia de cada una de sus clases sobre el desarrollo de los deslizamientos y la obtención de los planos de susceptibilidades de factores.
- El método estadístico de análisis condicional y las técnicas de SIG han permitido la obtención del plano de susceptibilidad del terreno a la rotura para el área del yacimiento Punta Gorda, con cuatro clases de susceptibilidad: baja, media, alta y muy alta.

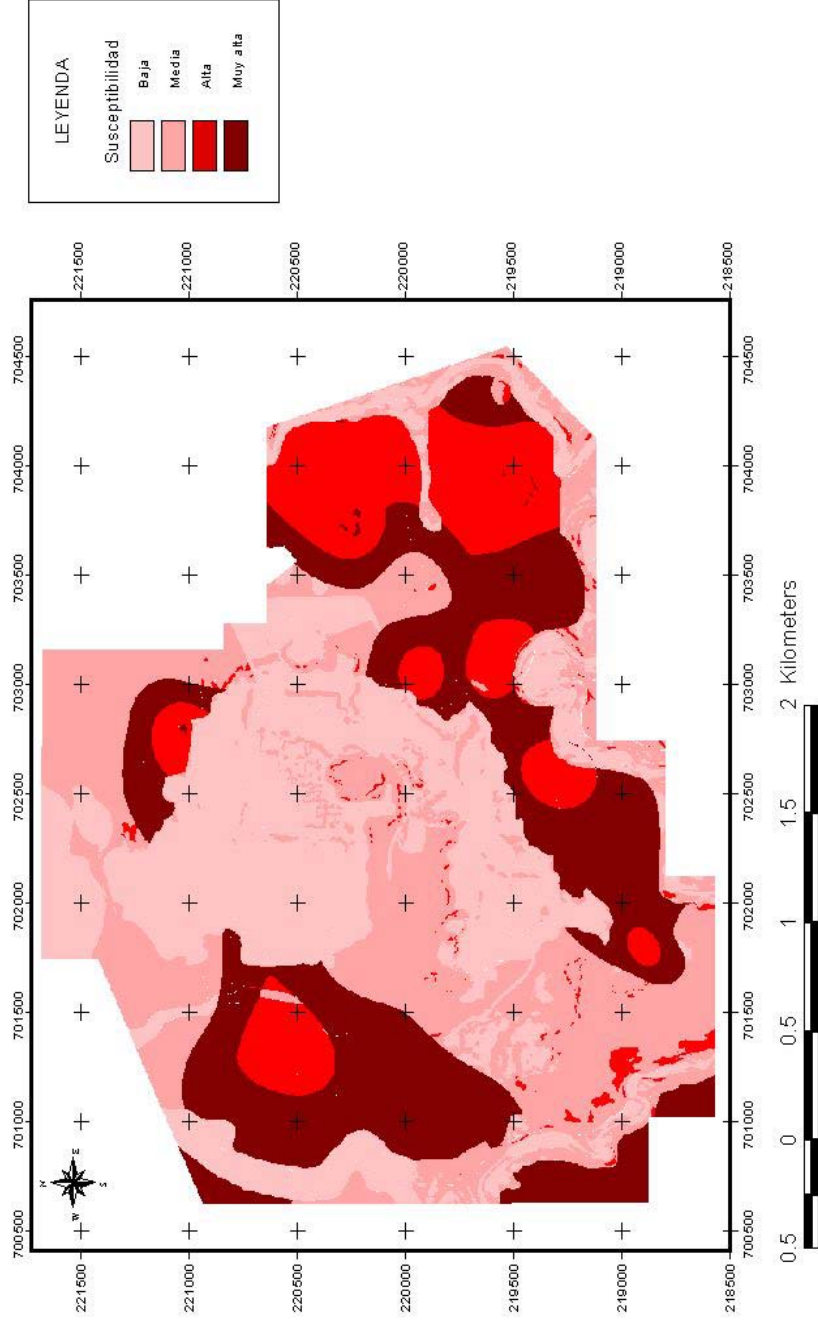


Figura 4.19. Plano de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda. (Escala original: 1:2 000. Formato raster, tamaño de píxel: 5x5 m).

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES.

Los problemas relacionados con los deslizamientos en taludes y laderas han sido elementos de preocupación para proyectistas, constructores y mineros. En las áreas minadas a cielo abierto de los yacimientos de corteza laterítica ferroniquelífera esta situación es mucho más compleja, debido a que se trabaja con taludes que presentan una determinada altura e inclinación, una situación geológica, que en ocasiones tiene comportamiento variable, con anisotropía en las propiedades geotécnicas, con determinada complejidad de las condiciones hidrogeológicas de la corteza laterítica, y donde en muchos casos, la ubicación de las infraestructuras coinciden con zonas de alta sismicidad que provocan el surgimiento y desarrollo de determinados procesos y fenómenos geológicos. En este entorno del yacimiento Punta Gorda, han tenido lugar diferentes tipos de deslizamientos, que conllevaron en determinado momento a la paralización de la actividad extractiva (deslizamiento de la excavadora 2 en 1997). Todo esto provocó que por parte de la subdirección de minas de la Empresa Ernesto Che Guevara solicitara la ejecución de varios proyectos de investigación liderados por el Instituto Superior Minero Metalúrgico. Desde 1997 hasta la fecha han resultado varios trabajos, dentro de los cuales está el presente análisis de susceptibilidad del terreno por deslizamiento, en el que se han arribado a varias conclusiones expresando que:

1. La situación ingeniero-geológica del yacimiento Punta Gorda 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, aumentan los valores de humedad, sobrepasando en algunos casos, el límite líquido. Existen además horizontes colapsables debido a sus propias condiciones naturales. Estas características son elementos condicionantes y desencadenantes de la inestabilidad de los taludes del yacimiento, contribuyendo a la disminución de la resistencia al corte de los suelos y rocas y en otros casos aumentando las tensiones movilizadoras en el medio o talud.
2. Existen diferentes mecanismos de deslizamientos en el yacimiento que hacen que la evaluación y gestión del peligro sea más compleja. La solución de esta situación problemática posibilita a los proyectistas de la actividad minera encontrar zonas más favorables y menos riesgosas para la explotación del yacimiento.
3. Una vez caracterizado desde el punto de vista ingeniero-geológico el yacimiento y llegado a resultados en cuanto a mecanismos y tipologías, se concluye que la metodología empleada mediante el análisis probabilístico implementando un SIG, permite evaluar la susceptibilidad del terreno a la rotura frente al desarrollo de

deslizamientos, por primera vez en Cuba, en un yacimiento de corteza laterítica ferroniquelífera.

4. Los procedimientos de análisis de susceptibilidad de los taludes por desarrollo de deslizamientos utilizados en esta memoria aplicando un SIG, permite las siguientes ventajas: la viabilidad para este tipo de método porque se utilizan datos georeferenciados; la facilidad de actualizar las bases de datos y planos a medida que la actividad minera se desarrolla en el tiempo; la reproducibilidad de los resultados y la regionalización de la metodología utilizada; la rapidez de análisis de los factores que inciden en los deslizamientos y la obtención del plano de susceptibilidad final.
5. El plano de susceptibilidad del yacimiento Punta Gorda permite una mejor valoración de las condiciones del medio geológico-minero y de las causales y condicionales de los deslizamientos. Es una herramienta útil para el ordenamiento minero-ambiental y para la prevención de movimientos de masas, no solo durante la explotación del mineral, sino en la construcción de viales, escombreo y en el proceso de cierre de minas.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES.

1. Aplicar lo resultados durante el proceso de planificación minera y toma de decisiones en el yacimiento Punta Gorda y en los próximos yacimientos a explotar por la Unidad Básica Minera de la Empresa Ernesto Che Guevara, con el objetivo de proyectar la extracción del mineral con menos riesgos asociados al desarrollo de deslizamientos.
2. El uso de la metodología empleada en la investigación para su generalización en otros yacimientos de la región.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- Aleotti, P.; Polloni, G.; Canuti, P. y Iotti, A. "Debris Flow Hazard and Risk Assessment Using Airbone Laser Terrain Mapping Techniques (ALTM)". En: A.E. Bromhead, N. Dixon and M.L. Ibsen (Eds): *Landslides in research, theory and practice*. Tomas Telford. London. 1, 19-26 p. 2000.
- Alfonso H. M., "Análisis de susceptibilidad a los movimientos de laderas en la parte oriental de la cuenca del río Almendares y la llanura marina adyacente". Cuba. VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos. 2005.
- Almaguer Y., "Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo rocoso". Tesis de maestría. Departamento de Geología. 110 p. 2001.
- Almaguer Y., "Calculo de estabilidad de taludes en cortezas lateríticas". Memorias del I Taller Internacional Ingeotaludes. Moa. 2003.
- Almaguer Y., "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. 2002.
- Almaguer Y., "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. 2005.
- Almaguer Y., "Métodos de cartografía de susceptibilidad y peligrosidad por el desarrollo de deslizamientos". Memorias del II Taller internacional Ingeotaludes. Moa. 2005b.
- Almaguer Y., 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. 2005a.
- Almaguer Y., "Análisis ingeniero-geológico e hidrogeológico del yacimiento Punta Gorda". Trabajo de diploma. Departamento de geología, ISMM. 105 p. 1998.
- Almaguer Y., Guardado R. "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. 2003.
- Almaguer Y., Guardado R. "Caracterización geotécnica del perfil de meteorización de rocas ultrabásicas serpentizadas en el territorio de Moa", Cuba. Geología y Minería, XX (1 y 2). 2005a.
- Almaguer Y., Guardado R. "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. 2005.
- Almaguer Y., Guardado R. "Tipologías de movimientos de masas desarrollados en el territorio de Moa, Cuba". Geología y Minería, XX (1 y 2). 2005b.

- Alzate, J. B. y Escobar, A. E., "Adquisición de datos para un SIG". Proc. 1r. Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y sistemas de Información Geográfica para el Estudio de Riesgos Naturales, Bogotá, Colombia. 449-465 p. 1992.
- Baeza, C., "Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante". Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica ETSECCPB-UPC. 1994.
- Bernknopf, R.L.; Campbell, R.H.; Brookshire, D.S. y Shapiro, C.D., "A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation". Bulletin International Association of Engineering Geologist, 25 (1), 39-56 p. 1988.
- Bishop, A.W.; Hutchinson, J.N.; Penman, A.D.M. y Evans H.E., "Aberfan Inquiry: Geotechnical investigation into the causes and circumstances of the disaster of 21st. October, 1966". A selection of technical Reports submitted to the Aberfan Tribunal, 1-80 p. London, Welsh Office. 1969.
- Blanco J. L. y Llorente E., "Investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica de la Base Minera Punta Gorda". Archivos de la Subdirección de Minas, Empresa Ernesto Che Guevara. Julio, 2004.
- Borga, M; Dalla Fontana, G.; Da Ros, D. y Marchi, L., "Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data". Environmental Geology. 35 (2-3), 81-88 p. 1998.
- Bosi C., "Considerazioni e proposte metodologiche sulla elaborazione di carte di stabilità". Geol. Appl. Ed Idrogeol. 13, 246-281. 1984.
- Bosque Sendra, J., "Sistemas de información geográfica". Madrid, Ediciones Rialp, 451 p. 1992.
- Brabb, E. E., "Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping". Proc. 4th. Int. Symp. on Landslides, Toronto, Canada, v.1, 307-324 p. 1984.
- Brabb, E.E. y Harrod, B.L. (Editors), "Landslides: extent and economic significance". Balkema, Rotterdam. 385 p. 1989.
- Brabb, E. E.; Pampeyan, E.H. y Bonilla, M.G., "Landslide susceptibility in San Mateo Country, California". US Geol. Surv. Misc. Field Studies Map MF 360 scale 1:62.500. caused by rainfall". Proc. Int. Symp. Erosion, Debris Flows and Disaster Prevention. Tsukuba, Japan. 347-350 p. 1972.
- Bracken, y Webster., "Information technology in Geography and planning. Including principles of G.I.S.". London: Routledge. 444 p. 1990.
- Brass, A.; Wadge, G. y Reading, A.J., "Designing a Geographical Information System for the prediction of landsliding potential in the West Indies". *Proced.: Economic Geology and*

- Geotechnics of Active Tectonic Regions. University College, London, 3-7 April, 13 p. 1989.
- Burrough, P.A., "Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment". Oxford, Oxford University press. 194 p. 1988.
- Cabrera J., "El catastro ingeniero-geológico y geoambiental de la provincia de Pinar del Río, una herramienta novedosa en la gestión de información georeferenciada". VI Congreso Cubano de Geología y Minería. Geomática. Habana, 2005.
- Campos M., "Rasgos principales de la tectónica de la porción oriental de las provincias de Holguín y Guantánamo". Minería y Geología, ISMM, Cuba. 1991.
- Campus, S.; Forlati, F. y Scavia, C., "Preliminary Study for Landslide Hazard Assessment: GIS Techniques and a Multivariate Statistical Approach". A.E. Bromhead, N. and M.L. Ibsen (Eds): *Landslides in research, theory and practice*. Tomas Telford. London. 2, 621-626 p. 2000.
- Carmenate J. A., "Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas para la zonificación de los fenómenos geológicos en áreas urbanas y suburbanas de la ciudad de Moa". Tesis de maestría. Departamento de geología, ISMM. 108 p. 1996.
- Carrara, A., "Geomathematical assessment of regional landslide hazard". 4th Int. Conf. Applic. Stat. Probabil. In Soil and Estruct. Eng. Firenze. 3-27 p. 1983b.
- Carrara, A., "Landslide hazard mapping by statistical methods. A "black box" approach". Workshop on Natural Disasters in European Mediterranean Countries, Perugia. 21 (2), 187-222 p. 1988.
- Carrara, A., "Multivariate models for landslide hazard evaluation". Math. Geology. 15, 403-426 p. 1983a
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Detti, R.; Guzzetti, F.; Pasqui, V. y Reichenbach, P., "Geographical Information Systems and multivariate models in landslide hazard evaluation".ALSP 90 Alpine Landslide Practical seminar. 6th. Int. Conf. And Field Workshop on Landslides. Milano, Italy. 17-28 p. 1990.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Detti, R.; Guzzetti, F.; Pasqui, V. y Reichenbach, P., "GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard". Earth Surf. Proc. And Landforms. 16(5), 427-445 p. 1991.
- Carrara, A.; Cardinali, M; Guzzetti, F. y Reichenbach, P., "GIS technology in mapping landslide hazard.". En: Carrara A, Guzzetti F (Eds) *Geographical information systems in assessing natural hazards*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. 135-175 p. 1995.
- Carrara, A.; Catalano, E.; Sorriso-Valvo, M; Reali, C. y Osso, I., "Digital terrain analysis for land evaluation". Geol. Appl. ed Idrogeol. 13, 69-127p. 1978.
- Carreño B., García M. y Alvelo N., "Pronóstico de deslizamientos con el empleo de sistemas computarizados". VI Congreso Cubano de Geología y Minería. Geomática. Habana, 2005.

- Castellanos E., "Processing SRTM DEM data for national landslide hazard assessment". VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos. 12 p. 2005.
- Cebrián, J.A. y Mark, D., "Sistemas de Información Geográfica. Funciones y estructuras de datos". Estudios Geográficos. (188), 277-299 p. 1986.
- Chacón J; Irigaray, C. y Fernández, T., "Metodología para la cartografía regional de movimientos de ladera y riesgos asociados mediante un Sistema de Información Geográfica". II Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. La Coruña. Vol.1, 121-133 p. 1992.
- Chang J. L., Suárez V., Castellanos E., Núñez K. y Moreira J., "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. 2005.
- Chau K. T., Sze Y. L., Fung M. K., Wong W. Y., Fong E. L. y Chan L. C. P., "Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS". Computers and Geosciences. Multidimensional geospatial technology for the geosciences. 30 (4), 429-443 p. 2004.
- Choubey, V.D. y Litoria, P.K., "Terrain classification and land hazard mapping in Kalsi-Chakrata area (Garhwal Himalaya) india". ITC-Journal. 1, 58-66 p. 1990.
- Chung C.F., y Fabbri, A.G., "The representation of geoscience information for data integration". Nonrenewable Resources, V. 2:2, 122-139 p. 1993.
- Chung, C.F. y Leclerc, Y., "A quantitative technique for zoning landslide hazard". En: Int. Ass. Math. Geol. Annual Conf., Mont Tremblant, Quebec, Canada. 3-5, 87-93 p. 1994.
- Chung, C.F.; Fabbri, A.G. y Van Westen, C.J., "Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation". En: A. Carrara and F. Guzzetti (Eds), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers. 107-133 p. 1995.
- Chuy T. J., Puente G., Baza R., Seisdedos J. L., Reyes C., Rivera Z., Borges E., Regal A., Sanloy D., Imbert C., Limeres T., Zapata J., Despaigne G., Velázquez V., Martel Y., "Fenómenos naturales en el municipio Guantánamo. Valoración e impactos negativos". VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos. 2005.
- Compagnucci J. P. y otros., "Recalce de las fundaciones de la escuela CEPM-40. Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía". Andalucía, España. 2001, (2003-06-12). Disponible en: www.carreteras.org/ccaa/normativa/carreteras/andalucia/firmes/apartados/anejo2.htm.
- Corominas, J., "Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera". Riesgos Geológicos. Serie Geología Ambiental. IGME, Madrid. 193-201 p. 1987.

- Corominas, J., "Movimientos de ladera: predicción y medidas preventivas". 1r Congreso Iberoamericano sobre Técnicas aplicadas a la Gestión de emergencias para la Reducción de Desastres Naturales, Valencia. 55-77 p. 1992.
- Corominas, J.; Fleta, J.; Goula, X.; Moya, J. y Teixidor, T., "Datación de deslizamientos antiguos en el área de Pardines (Girona)". III simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. La Coruña. 1, 53-69 p. 1992.
- Crozier, M.J., "Landslides. Causes, consequences & environment". Ed. Routledge. London & New York. 252 p. 1986.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J., "Landslide types and processes". En: Turner, A.A.K. and Schuster, R.L. (Eds.): *Landslides. Investigation and Mitigation. Transportation Research Board*, Special Report. National Academy Press, Washington, DC. 247, 36-75 p. 1996.
- De Miguel C., "Informe hidrogeológico conclusivo sobre: Investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica de la Base Minera Punta Gorda. Archivos de la subdirección de Minas, Empresa Ernesto Che Guevara. Octubre, 2004.
- De Miguel C., Guardado R., Riverón B., Blanco J., Rodríguez A., Batista J., Almaguer Y., Pérez R., "Proyecto de investigaciones hidrogeológicas e hidrogeológicas del yacimiento Punta Gorda". Departamento de geología. 1998.
- Del Puerto J. A. y Ulloa D., "Identificación de los peligros geólogo-geomorfológicos de la cuenca de Santiago de Cuba. V Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. V Congreso Cubano de Geología y Minería. Habana, 2003.
- Dhakar, S.; Amada, T. y Aniya, M., "Databases and Geographic Information Systems for Medium Scale Landslide Hazard Evaluation: an Example from Typical Mountain Watershed in Nepal". En: A.E. Bromhead, N. Dixon and M.L. Ibsen (Eds): *Landslides in research, theory and practice*. Tomas Telford. London. 1, 457-462 p. 2000.
- Donati L. y Turrini M. C., "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. 2002.
- Escobar E. M. "Variantes geofísicas en le solución de algunas tareas de valoración de la vulnerabilidad sísmica". VI Congreso Cubano de Geología y Minería. Simposio de Sismicidad y Riesgos Geológicos. Habana, 2005.
- Febles D. y Rodríguez J., "Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de la república de cuba a escala 1:250 000". VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos. 2005.
- Feiznia, S. y Bodaghi, B., "A statistical Approach for Logical Modelling of a Landslide Hazard Zonation in Shahrood drainage Basin". En: A.E. Bromhead, N. Dixon and M.L. Ibsen (Eds): *Landslides in research, theory and practice*. Tomas Telford. London. 2, 549-552 p. 2000.

- Ferrer, M., "Deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas". Serie Geología Ambiental. Riesgos Geológicos. I.G.M.E. Madrid. 175-192 p. 1987.
- González Raynal B. E., Pacheco Moreno S. E., Pedroso Herrera I. I., García Peláez J. A., Pérez Lara L. D., Serrano Herrera M. Y Guerra Oliva M., "Riesgos geológicos y degradación ambiental: el caso del asentamiento urbano del Mariel, Cuba occidental". VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de Sismicidad y Riesgos Geológicos. 23 p. 2005.
- Guardado R. y Almaguer Y., "Evaluación de riesgos por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín". Revista Minería y Geología. XVIII (1): 1-12 p. 2001.
- Guardado R., Almaguer Y., "Rocas y suelos como indicadores ingenieros geológicos y ambientales de estabilidad y sostenibilidad de taludes y laderas". CD Congreso de Geología Minería. ISBN 959-7117-11-8. 2003.
- Guardado R., Almaguer, Y., Hernández, Y., Tamayo, J. R. y Pea Guy., "Estabilidad de taludes en suelos lateríticos del yacimiento Punta Gorda aplicando criterios de rotura". GEOBRASIL (ISSN 1519-5708). 12-24 p. 2001.
- Gupta, R.P. y Joshi, B.C., "Landslide Hazard Zoning Using the GIS Approach- A Case Study from the Ramganga Catchment, Himalayas". Engineering Geology. 28, 119-131 p. 1990.
- Hammond, C.J.; Prellwitz, R.V. y Miller, S. M., "Landslide hazard assessment using Monte Carlo simulation". Proc. 6th. Int. Symp. on Landslides, Christchurch, New Zealand. 2, 959-964 p. 1992.
- Hansen, A., "Landslide hazard analysis". En: D. Brundsen and D.B. Prior (Editors), *Slope Stability*. John Wiley and Sons, 523-602 p. 1984.
- Hansen, A. y Franks, C.A.M., "Characterization and mapping of earthquake triggered landslides for seismic zonation". Proceed. IV. Int. Conf. Seismic Zonation, Stanford, California, 149-195 p. 1991.
- Hartlén, J. y Viberg, L., "Evaluation of landslide hazard". En: Ch. Bonnard (Ed): 5th. International Congress on Landslides. Lausanne. 1 (2), 1037-1057 p. 1988.
- Heckerman, D., "Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factors". En: L.N. Kanal and J.F. Lemmer (editors) *Uncertainty in Artificial Intelligence*. Elsevier, 167-196 p. 1986.
- Huma, I. y Radulescu., "Automatic production of thematic maps of slope instability". Bulletin International Association of Engineering Geologist. 17, 95-99 p. 1978.
- Hutchinson, J.N., "Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology". En: Ch. Bonnard (Editor), 5th Int. Congr. on Landslides, Lausanne. 1, 3-35 p. 1988.
- IAEG., "Engineering geological maps. A guide to their preparation". International Association of Engineering Geologists. The UNESCO Press, Paris, 79 p. 1976.

- Irigaray, C., "Cartografía de Riesgos Geológicos asociados a movimientos de ladera en el sector de Colmenar (Málaga)". Tesis de Licenciatura. Univ. De Granada, 390 p. 1990.
- Irigaray, C., "Movimientos de ladera: inventario, análisis y cartografía de susceptibilidad mediante un Sistema de Información Geográfica. Aplicación a las zonas de Colmenar (Málaga), Rute (Córdoba) y Montefrío (Granada)". Tesis Doctoral. Univ. De Granada. 1995.
- Iturralde-Vinent M., "Las ofiolitas en la constitución geológica de Cuba". Ciencias de la tierra y el espacio, Cuba. 17, 1990.
- Iturralde-Vinent M., "Nuevo modelo interpretativo de la evaluación geológica de Cuba". ". Ciencias de la tierra y el espacio, Cuba. 3, 1981.
- Jones, F.O.; Embody, D.R. y Peterson, W.C., "Landslides along the Columbia river valley, Northeastern Washington". U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 367, 98. 1961.
- Keefer, D. K., "Landslides caused by earthquakes". Geol. Soc. Am. Bull. 95, 406-421 p. 1984.
- Kelarestaghi A., "Investigation of Effective Factors on Landslides Occurrence and Landslide Hazard Zonation – Case Study Shirin Rood Drainage Basin, Sari, Iran". 2004, (2004-04-23). Disponible en: http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/ma03003.htm
- Kingsbury, P.A.; Hastie, W.J. y Harrington, A.J., "Regional landslip hazard assessment using a Geographical Information system". Proc. 6th. Int. Symp. on Landslides, Christchurch, New Zealand. 2, 995-999 p. 1992.
- Kobashi, S. y Suzuki, M., "Hazard Index for judgement of slope stability in the Rokko mountain region". Proc. INTERPRAEVENT 1988, Graz, Austria, Band. 1, 223-233 p. 1991.
- Kobayashi, Y., "Causes of fatalities in recent earthquakes in Japan". Journal. Disaster Science. 3, 15-22 p. 1981.
- Lee, H.J.; Locat, J.; Dartnell, P.; Minasian, D. y Wong, F., "AGIS-Based Regional analysisi of the Potential for Shallow-Seated Submarine Slope Failure". En: A.E. Bromhead, N. Dixon and M.L. Ibsen (Eds): *Landslides in research, theory and practice*. 2, 917-922 p. 2000.
- Leroi, E., "Landslide hazard-Risk mapsx at different scales: objectives, tools ans developments". Proc. 7th. Int. Symp. on Landslices, Trondheim, v.1, 35-51 p. 1996.
- Leroi, E., "Landslide risk mapping: problems, limitations and developments". en: Cruden & Fell (ed.), *Landslide risk assessment*. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment. A.A. Balkema. 239-250 p. 1997.
- Lewis J. L. y Draper G., "Geology and tectonic evolution of the northern Caribbean margin. The Caribbean region the geology of North America. H, 1990.

- Lomtadze V. D., "Geología aplicada a la ingeniería. Geodinámica aplicada a la ingeniería" Ed. Pueblo y Educación, 560 p. 1977.
- López, H.J. y Zinck, J.A., "GIS-assisted modelling on soil-induced mass movement hazards: A case study of the upper Coello river basin, Tolima, Colombia", ITC-Journal. 4, 202-220 p. 1991.
- Lucini, P., "The potential landslides forecasting of the Argille Varicolori Scagliose complex in IGM 174 IV SE Map, Saviano di Puglia (Compania)". Geol. Appl. Idrogeol., 8, 311-316 p. 1973.
- Luzi, L. y Fabbri, A.G., "Application of Favourability Modelling to Zoning of Landslide Hazard in the Fabriano Area, Central Italy". 1st. Joint European Conference and Exhibition on Geographical Information, The Hague, NL. 398-403 p. 1995.
- Luzi, L. y Pergalani, F., "Applications of statistical and GIS techniques to slope instability zonation (1:50.000 Fabriano geological map sheet)". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 15, 83-94 p. 1996.
- MahdaviFar, M.R., "Fuzzy information Processing in Landslide Hazard Zonation and Preparing the Computer System". En: A.E. Bromhead, N. Dixon and M.L. Ibsen (Eds): Landslides in research, theory and practice. Tomas Telford. London. 2, 993-998 p. 2000.
- Mantovani, F.; Masè, G. y Semenza, E., "Franosità e dinamica fluviale del bacino della Valturcana, Alpi (Belluno)". Ann. Univ. Ferrara. Sez. IX, 8(3): 29-60 p. 1982.
- Mantovani, F.; Soeters, R. y Van Westen, C.J., "Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe". Geomorphology. 15, 213-225 p. 1996.
- Mayoraz, F.; Cornu, T. y Vulliet, L., "Using Neural Networks to Predict Slope Movements". Proc. 7th. Int. Symp. on Landslides, Trondheim, v. 1295-300. 1996.
- Mora, S. y Vahrson, W. G., "Macrozonation methodology for landslide hazard determination". Bull. Of the Assoc. Eng. Geology. XXXI (1), 49-58 p. 1994.
- Morgan, B. W., "An introduction to Bayesian statistical decision process". Ed. Prentice-Hall, New York. 116 p. 1968.
- Morris A. E., Taner I., Meyerhoff H. A., y Meyerhoff A. A., "Tectonic evolution of the Caribbean region; alternative hypothesis. The geology of North America. H. 1990.
- Morton D. M., Alvarez R. M., Campbell., R. H., Bovard K. R., Brown D. T., Corriea K. M. y Lesser J. N., "Preliminary soil-slip susceptibility maps, south-western California ". File report OF 03-17. USGS. 67 p. 2003.
- Mulder, H.F.H.M., (1991) "Assessment of landslide hazard". Nederlandse Geografische Studies. PhD Thesis, University of Utrecht. 150 p. 1991.
- Murphy, W. y Inkpen, R.J., "Identifying landslide activity using airborne remote sensing data". Proc. 22nd. Annual 'Conference of the Remote Sensing Society. 392 p. 1996.

- Murphy, W. y Vita-Finzi, C., "Landslides and seismicity: an application of remote sensing. Proc. 8th. Thematic Conference on Geological Remote Sensing (ERIM), Denver, Colorado, USA. 2, 771-784 p. 1991.
- Nagarajan, R.; Anupam Mukherjee; Roy, A. y Khire, M.V., "Temporal remote sensing data and GIS application in landslide hazard zonation of part of Western ghat, India". *Int. Jour. Remote Sensing*, 19 (4), 573-585 p. 1998.
- Naranjo, J.L; Van Westen, C.J. y Soeters, R., "Evaluating the use of training areas in bivariate statistical landslide hazard analysis- a case study in Colombia". *ITC-Journal*. 3, 292- 300 p. 1994.
- NCGIA., "Core Curriculum ". Tres volúmenes: I. Introducción to GIS. II. Technical issues in GIS. III. Application issues in GIS". Santa Bárbara, CA. National Center for Geographic Information and Analysis / University of California. 1990.
- Neuland, H., "A prediction model for landslips". *Catena*. 3, 215-230 p. 1976.
- Newman, E.B.; Paradis, A.R. y Brabb, E.E., "Feasibility and cost of using a computer to prepare landslide susceptibility maps of the San Francisco Bay Region, California". *US Geological survey Bulletin*. 1443, 29 p. 1978.
- Niemann, K.O. y Howes, D.E., "Applicability of digital terrain models for slope stability assessment". *ITC-Journal*. 3, 127-137 p. 1991.
- Noas J. L. y Chuy T L., "Caracterización de la amenaza sísmica de la ciudad de Moa, provincia Holguín". VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos. 2005.
- Okimura, T. y Kawatani, T., "Mapping of the potential surface-failure sites on granite mountain slopes". En: V. Gardiner (Editor), *International Geomorphology. Part 1*. Wiley, New York. 121-138 p. 1986.
- Oliva G., Lluís E., Sánchez E. A., Hernández J. R., Propin E., Buznego E., Lorenzo A. C., Mon M. y Azcue A., "Nuevo atlas nacional de Cuba". Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba. 1989.
- Pande, G.N. y Pietruszczak, S. (Ed.), "Numerical models in geomechanics". Proc. 5th. Int. Symp. on Num. Models in Geomechanics, NUMOG V, Davos, Switzerland, 6-8 September, 1995.
- Parzen E. M., "Modern probability theory and its applications". Edición revolucionaria. Cuba. 60 p. 1960.
- Pedroso E., Fundora M., González Y., Guerra M., Jaimez E., Silvestre E., González B. E., David L., Llanes C., Suárez E. y Hernández Y., "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. 2005.

- Penson E., "Mecánica de suelos. Manuales de cátedras". UNPHU, Santo Domingo, República Dominicana. 506 p. 1994.
- Plafker, G. y Eriksen, G.E., "Nevados Huascaran avalanches, Peru". En: B.Voight (Editor). *Rockslides and avalanches*, Elsevier.1, 277-314 p. 1979.
- Plafker, G. y Galloway, J.P. (Eds.), "Lessons learned from the Loma Prieta, California. 1989.
- Quintas F., Almaguer Y., Rodríguez A., Rodés A., Vargas A., "Cartografía geológica del basamento del yacimiento Punta Gorda a escala 1:2 000". Subprograma del proyecto de Modelación Geotecnológica de la Empresa Enerito Che Guevara. Departamento de geología, ISMM, Cuba. 120 p. 2002.
- Radbruch-Hall, D.H.; Edwards, K. y Batson, R.M., "Experimental engineering geological maps of the conterminous United States prepared using computer techniques". *Bulletin International Association of Engineering Geologist*, 19, 358-363 p. 1979.
- Rengers, N.; Soeters, R. y Van Westen, C.J., "Remote sensing and GIS applied to mountain hazard mapping". *Episodes*. 15 (1), 36-45 p. 1992.
- Reyes P., Ríos Y., Vega N., Arango E., " 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. 2005.
- Rocamora E., "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. 2005.
- Rodríguez A., "Características geólogo-geomorfológicas del yacimiento Punta Gorda. *Revista Minería y Geología*, 1, 1983.
- Rodríguez A., "Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica". Tesis doctoral. Departamento de geología, ISMM, Cuba. 1998.
- Rodríguez W. y Valcarce R. M., "Aplicación SIG para evaluar el peligro de inundaciones". VI Congreso Cubano de Geología y Minería. *Geomática*. 2005.
- Runqiu, H. y Yuanguo, L., "Logical message model of slope stability prediction in the Three Gorges reservoir area, China". *Proc. 6th. Int. Symp. on Landslides*, Christchurch, New Zealand. 2, 977-981 p. 1992.
- Santacana, N., "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. 2001.
- Scanvic, J.Y.; Rouzeau, O. y Colleau, A., "SPOT outil d'aménagement exemple de réalisation par télédétection et analyse multicritère d'une cartographie des zones sensibles

- aux mouvements de terrain le site de La Paz-Bolivie”. BRGM Serv. Géol. Nat. Dépt. Téléd. Orléans Cedex, France. 1990.
- Schuster, R.L., “Socioeconomic significance of landslides”. En: Turner, A.K.; Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides. Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, DC. 2-35 p. 1996.
- Shafer, G., “A Mathematical Theory of Evidence”. Princenton University Press, Princenton N.J. 297 p. 1976.
- Sharpe, C.F.S., “Landslides and their control”. Academia & Elsevier, Prague. 205 p. 1938.
- Sinha L. K., Paul R. S. y Mehta S. D., “Landslide hazard zonation in a part of Giri Basin, Sirmur district (H.P.) using Remote Sensing techniques & GIS”. 2004 (2004-06-12). Disponible en: http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/nhls0012a.htm
- Siriwardane, H.J. y Zaman, M.M., “Computer methods and advances in geomechanics”. Proc. 8th. Int. Conf. of Computer Met. And Advances in Geomech., Morgantown, USA. 1994.
- Sivakumar G. L. y Mukesh M. D., “Landslide analysis in Geographic Information Systems ”. 2004. (2004-06-10). Disponible en: http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/nhls0011.htm
- Sowers G. B. y Sowers G. F., “Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones”. 2 tomos. Edición revolucionaria. p. 319, 1976.
- Stakenborg, J.H.T., “Digitizing alpine morphology. A digital terrain model based on a geomorphological map for computer-assisted applied mapping”. ITC-Journal 4, 299-306 p. 1986.
- Stevenson, P.C., “An empirical method for the evaluation of relative landslip risk”. Bul. IAEG.16, 69-72 p. 1997.
- Suárez J., “Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales”. Ed. Ingeniería de suelos Ltda.. Colombia. 547 p. 1998.
- Tangestani M. H., “Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma operation in a GIS, Kakan catchment area, Iran ”. 2004. (2004-09-23). Disponible en: http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/mi03040.htm
- Thurston, N. y Degg M., “Transferability and Terrain Reconstruction within a GIS Landslide Hazard Mapping Model: Derbyshire Peak District”. A.E. Bromhead, N. Dixon and M.L. Ibsen (Eds): *Landslides in research, theory and practice*. Tomas Telford. London. 3, 961-968 p. 2000.
- Valadao P., Gaspar J. L, Queiroz G. y Ferreira T., “Landslide map of San Miguel island, Azores archipiélago”. Natural Hazard and Earth System Sciences. European Geophysical Society. (2), 51-56 p. 2002.

- Van Dijke, J.J. y Van Westen, C.J., "Rockfall hazard: a geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS". ITC-Journal, 1, 40-44 p. 1990.
- 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 Information Systems*. Taylor & Francis Ltd. 135-165 p. 1994.
- Van Westen, C.J., "Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation". ITC- Publications n° 15 ITC, Enschede. 45 p. 1993.
- Varnes, D.J., "Landslide hazard zonation: a review of principles and practice". Natural Hazards. n° 3. UNESCO, Paris. 63 p. 1984.
- Varnes, D.J., "slope movement types and processes". In: Landslides analysis and control. Special Report. 176, 11-33 p. 1978.
- Vega M. B., "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. 2005.
- Voight, B.; Janda, R.J.; Glicken, H. y Douglass, P.M., "Nature and mechanisms of the Mount St Helens Rock-Slide Avalnache of 18 May 1980". Geotechnique. 33 (3), 243-273 p. 1983.
- Vulliet, L. y Mayoraz, F., "Coupling Neural Networks and Mechanical Models for a Better Landslide Management". En: A.E. Bromhead, N. Dixon and M.L. Ibsen (Eds): *Landslides in research, theory and practice* Tomas Telford. London. 3, 1521-1526 p. 2000.
- Ward, T.J.; Ruh-Ming, Li y Simons, D.B., "Mapping landslide hazards in forest watershed". Journal of Geotechnical Engineering Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers, 108 (GT2), 319-324 p. 1982.
- WP/WLI., "Multilingual landslide glossary". The Canadian Geotechnical society. Bitech Publishers Ltd. 1993.
- Wu, Y.; Yin, K. y Liu, Y., "Information Analysis System for Landslide hazard Zonation". En: A.E. Bromhead, N. Dixon and M.L. Ibsen (Eds): *Landslides in research, theory and practice*. Tomas Telford. London. 3, 1593-1598 p. 2000.
- Yin, K. y Yan, T., "Distibution regularity of landslides and prediction of slope instability nearby Xuyang, Han river valley". Earth Science Journal of China University of Geosciences. 631- 638 p. 1987.
- Yin, K.L. y Yan, T.Z., "Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks". Proceed. 5th. Int. Symp. Landslides, Lausanne. 2, 1269-1272 p. 1988.
- Zadeh, L.A., "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility". Fuzzy Sets and Systems. 1, 3-28 p. 1978.
- Zadeh, L.A., "Fuzzy sets". IEEE Information and Control. 8, 338-353 p. 1965.
- Zêzere, J.A.; Ferreira, A.B.; Vieira, G.; Reis, E. y Rodriguez, M.L., "The use of Bayesian Probability for Landslide Susceptibility Evaluation. A Case Study in the Area North of

Lisbon (Portugal)”. En: A.E. Bromhead, N. Dixon and M.L. Ibsen (Eds): Landslides in research, theory and practice. Tomas Telford. London. 3, 1635-1640 p. 2000.

ANEXOS

ANEXO I
CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

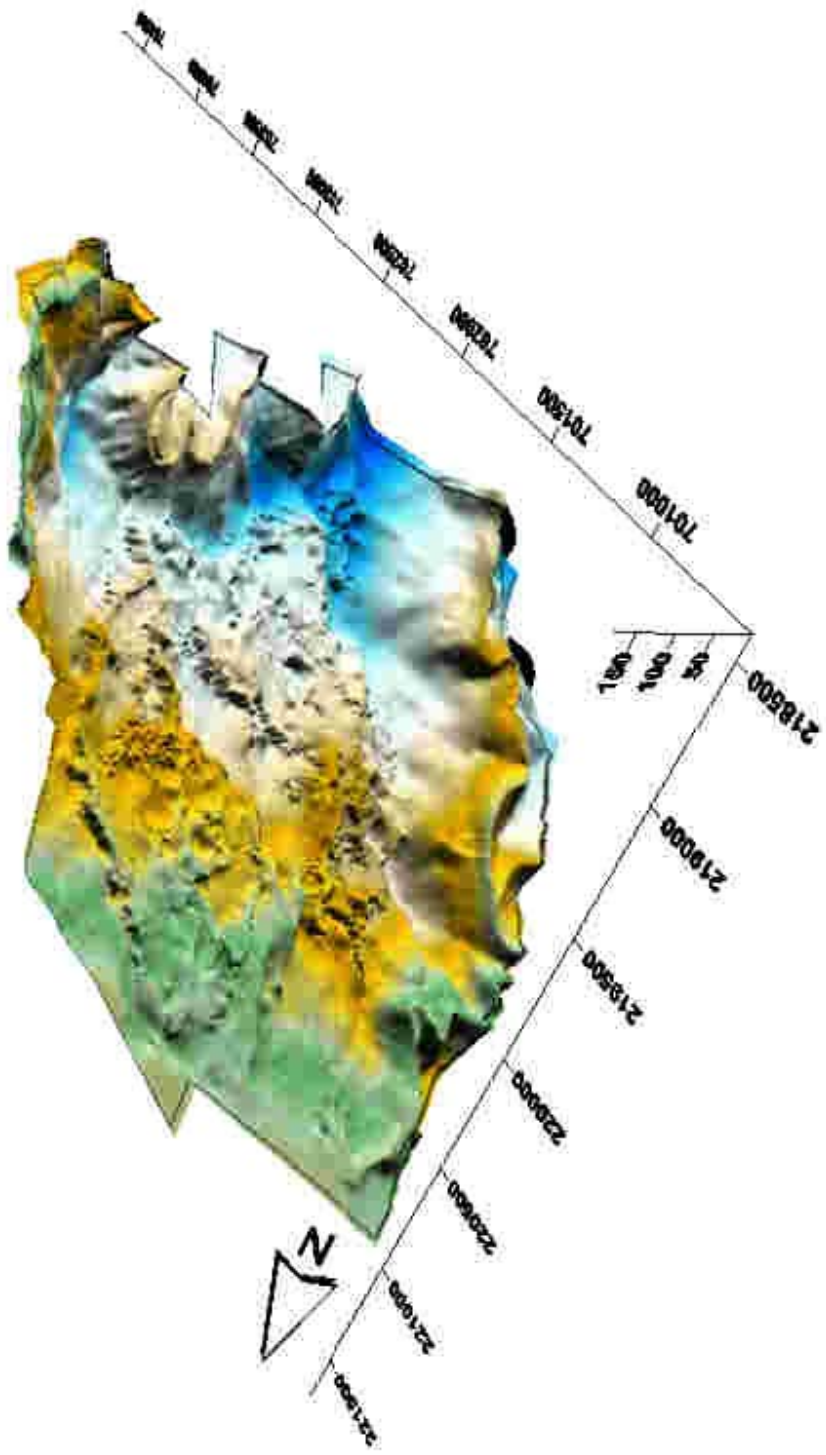


Figura 2.1. Relieve actual del yacimiento Punta Gorda. (escala original 1:2 000).

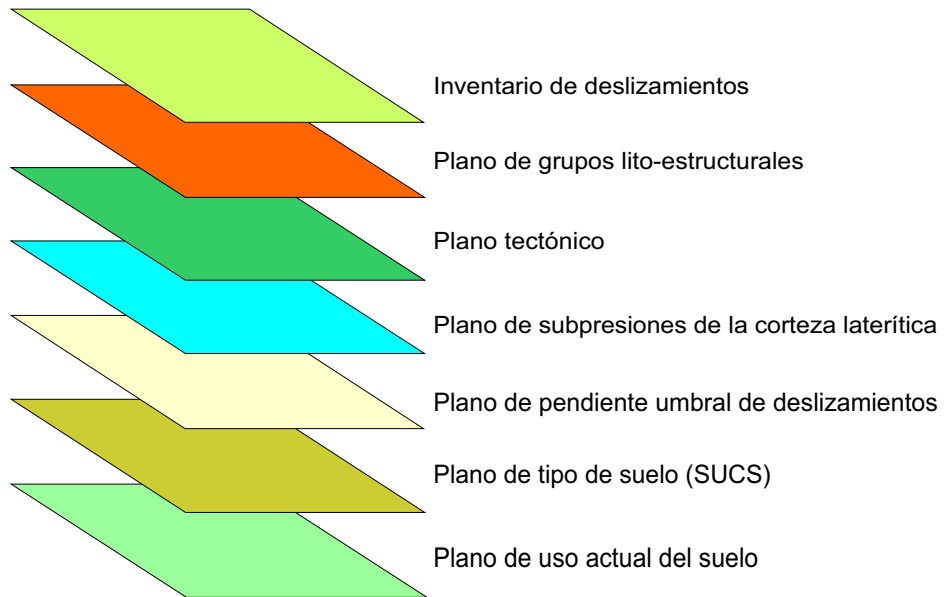
ANEXO II

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LA ROTURA

Tabla 2.1. Ficha utilizada en la descripción de campo de los deslizamientos presentes en el yacimiento Punta Gorda.

COORDENADAS		X:	Y:	Z:	PRESENCIA DE FLUJOS DE AGUA:
TIPO DE MOVIMIENTO					
Rotacional	Suelo		Residual		
Planar			Coluvial		
Cuña					
Vuelco	Roca				
Derrubio					
Otros					
TIPO DE FORMACION					
CAUSAS:					
POTENCIA DE LA MASA DESPLAZADA (m)					
Máxima					
Mínima					
Dimensiones de la masa (m)					
Perpendicular al movimiento					
DATOS ACERCA DEL TALUD					
Dirección		Inclinación			
Altura					
Discontinuidades:					
Rumbo	Acimut	Buzamiento	Espaciamiento	Observaciones	
NOMBRE DEL OBSERVADOR:				FECHA:	

Capas temáticas utilizadas en el SIG



Valoración de la influencia de cada factor sobre los deslizamientos:
- Método de análisis probabilístico condicional.

Reclasificación de los planos temáticos de factores:
- Análisis de cluster.

Combinación de los planos de factores y obtención del plano final de susceptibilidad a la rotura

Plano de susceptibilidad a la rotura por el desarrollo de deslizamientos

Figura 2.1. Relación de capas temáticas utilizadas en el análisis de susceptibilidad mediante la tecnología SIG.

ANEXO III

SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LA ROTURA EN EL YACIMIENTO PUNTA GORDA

Tabla 3.1 Caracterización general de los deslizamientos inventariados en el yacimiento Punta Gorda.

CARACTERIZACION DE LOS DESLIZAMIENTOS						
No.	Area (Km ²)	Dirección del movimiento	Litología	Longitud máx. (m)	Ancho máx. (m)	Longitud del escarpe (m)
1	0,0489	este	laterita residual	240	255	160
2	0,0472	noroeste	laterita residual	260	244	150
3	0,0127	este	laterita residual	105	140	120
4	0,0321	noroeste	laterita residual	225	190	140
5	0,0213	norte	laterita residual	190	170	110
6	0,0126	oeste	laterita residual	120	118	120
7	0,0182	norte-noreste	laterita residual	180	130	160
8	0,0128	noreste	laterita residual	170	100	90
9	0,0078	suroeste	laterita residual	110	90	80
10	0,0200	sur-sureste	laterita residual	200	140	130
11	0,0088	norte	laterita residual	150	70	80
12	0,0078	noreste	laterita residual	130	80	50
13	0,0194	norte-noreste	laterita redepositada y residual	200	130	100
14	0,0939	este	laterita residual	550	250	200
15	0,0345	noreste	laterita residual	240	190	110
16	0,2384	este-noreste	laterita residual	920	290	390
17	0,0103	norte	laterita redepositada	140	80	90
18	0,0198	noreste	laterita redepositada	180	150	120
19	0,0249	noreste	laterita redepositada	200	160	130
20	0,0820	norte-noreste	laterita redepositada	430	260	200
Área total ocupada por deslizamientos	0,8668					
% del área total de trabajo	8,8388					

Tabla 3.2. Resultados del cálculo del factor de seguridad (En negritas los FS óptimos).

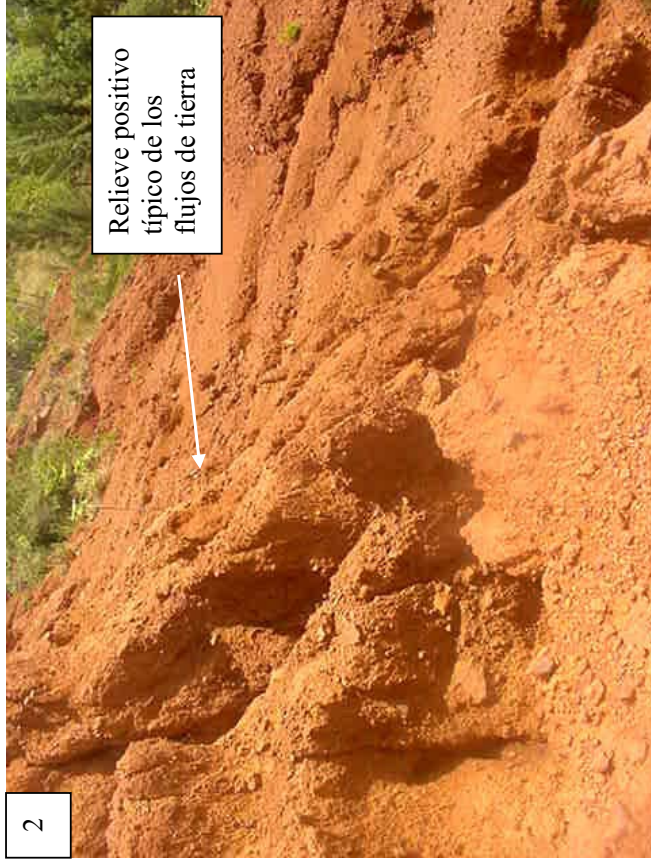
No. Corrida	Variables de calculo					Factor de seguridad
	Potencia de ocre (m)	Potencia de serpentinitas lixiviadas (m)	Nivel de agua en el talud (m)	Altura del talud (m)	Distancia de la excavadora al borde del talud (m)	
1	15	5	22	34	5	1,85
2	15	5	22	34	5	1,16
3	15	5	22	30	5	1,06
4	15	5	16	29	5	1,13
5	15	5	14	29	5	1,11
6	15	5	11	29	5	1,13
7	15	5	28	29	5	1,00
8	15	5	28	29	1	0,91
9	15	5	5	29	1	1,01
10	10	5	5	24	1	1,05
11	10	5	5	24	5	1,30
12	10	5	22	24	5	1,16
13	10	5	22	24	1	0,90
14	10	5	17	24	1	0,95
15	10	5	11	24	1	0,98
16	10	5	11	24	5	1,26
17	10	3	11	22	5	1,40
18	10	3	11	22	1	1,18
19	10	3	5	22	1	1,21
20	10	3	5	22	5	1,43
21	10	3	9	22	5	1,40
22	12	4	10	23	5	1,37
23	12	4	12	23	5	1,35
24	12	4	12	23	7	1,68
25	12	4	15	23	7	1,64
26	14	4	15	23	7	1,60
27	14	4	15	23	2	1,20
28	14	2	15	21	2	1,22
29	14	2	10	21	2	1,29
30	14	2	10	21	5	1,55
31	10	1	7	15	5	1,90
32	10	1	7	15	3	1,77
33	10	1	7	15	4	1,68

Tabla 3.3. Resultados del cálculo del FS para rotura planar en el yacimiento Punta Gorda.

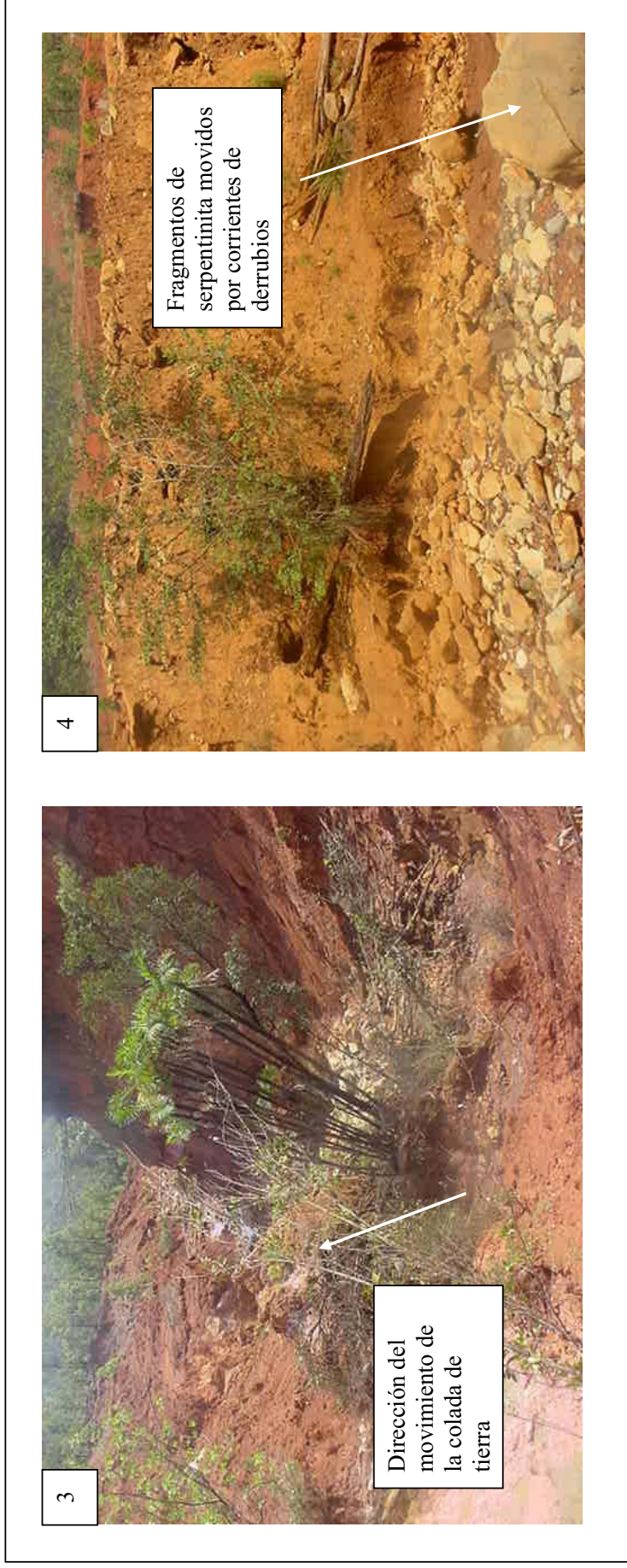
Corridas	Tipo de suelo	c	γ	φ	Pendiente	Potencia	FS
1	SM (OIP)	0,031	20,4	18,3	10	5	4,36
2					10	10	2,18
3					10	15	1,45
4					10	20	1,09
5					10	25	0,87
6					20	5	1,84
7					20	10	0,92
8					20	15	0,61
9					20	20	0,46
10					20	25	0,36
11					30	5	1,15
12					30	10	0,57
13					30	15	0,38
14					30	20	0,28
15					30	25	0,23
16					40	5	0,8
17					40	10	0,4
18					40	15	0,26
19					40	20	0,2
20					40	25	0,16
21	SM	0,034	17,3	16,5	10	5	3,38
22					10	10	1,69
23					10	15	1,12
24					10	20	0,84
25					10	25	0,67
26					20	5	1,62
27					20	10	0,81
28					20	15	0,54
29					20	20	0,4
30					20	25	0,32
31					30	5	1,02
32					30	10	0,51
33					30	15	0,34
34					30	20	0,25
35					30	25	0,2
36					40	5	0,7
37					40	10	0,32
38					40	15	0,23
39					40	20	0,17
40					40	25	0,14
41	SM (SL)	0,01	13,8	16	10	2	8,13
42					10	4	4,06
43					10	6	2,71
44					20	2	3,9
45					20	4	1,95
46					20	6	1,3
47					30	2	2,45
48					30	4	1,22
49					30	6	0,81
50					40	2	1,69
51					40	4	0,84
52					40	6	0,56

Tabla 3.4. Clasificación del perfil de meteorización desde el punto de vista ingeniero-geológico.

Término	Grado	Descripción	Horizonte lito-genético	Tipo de suelo (SUCS)	Características geotécnicas						Mecanismo de rotura	Tipología de movimiento
					γ	W	C	ϕ	IP	Colapsabilidad		
Suelo residual	IV	La textura de la roca no es reconocible. Se presenta en forma de coraza compuesta por concreciones ferruginosas. Resistencia muy baja comparada con la roca fresca. Las capas superficiales contienen raíces de plantas y humus.	Ocre inestructural con perdigones	Arena gravo-limosa (SM)	S: 15 H: 20	30-48	0,031-0,040	18,3	12	Colapsa	Movimientos de masa de manera desorganizada Mecanismos relacionados con caída libre de la roca	Coladas de tierra Vuelcos
Altamente meteorizada	III	Está tan debilitada por el proceso de meteorización que pueden ser separados o desintegrados grandes fragmentos con la mano, llegándose a excavar con la mano si está húmedo. Se pueden obtener núcleos perforando cuidadosamente, en algunos casos no se pueden recuperar. La fábrica original está intacta. Resistencia muy baja comparada con la roca fresca.	Ocre inestructural inicial Ocre estructural final Ocre estructural inicial	Limo arcilloso de alta plasticidad (MH)	S: 10,0 H: 17,4	50-70	0,020-0,037	15-16,4	28	No colapsa	Deslizamientos a través de una superficie de rotura definida	Deslizamientos rotacionales Traslacionales, en cuña y combinados
Moderadamente meteorizada	II	Las grietas están rellenas de limonita. Posee alguna resistencia, no pueden ser rotos grandes fragmentos con la mano. La roca fresca o decolorada se presenta como una estructura discontinua o en núcleos rocosos. La meteorización se manifiesta de manera desigual a través de la fábrica de la roca.	Serpentinita lixiviada o desintegrada	Arena limo-gravosa con arcilla (SM)	S: 8,40 H: 15,3	70-86	< 0,020	13-15,3	26	Colapsa	Deslizamientos a través de una superficie de rotura definida	Deslizamientos rotacionales Traslacionales, en cuña y combinados
Roca fresca	I	No hay signos visibles de material meteorizado. La roca puede tener algunas grietas manchadas de óxidos de Fe.	Roca serpentinizada	Roca	2,79	-	-	27	-	-	Mecanismos relacionados con caída libre de la roca Deslizamientos a través de una superficie de rotura definida	Desprendimientos de rocas Vuelcos Deslizamientos traslacionales, en cuña, circulares (con agrietamiento intenso) y combinados Corrientes de derrubios



Fotos 1 y 2. Desarrollo de movimientos de masa en el yacimiento Punta Gorda. Foto 1. Condiciones para el desarrollo de vuelcos en corteza laterítica. Presencia de discontinuidades paralelas al talud a través de las cuales se infiltran las aguas superficiales y provocan el movimiento. Foto 2. Parte del cuerpo de una colada de tierra en corteza laterítica. Desarrollo de cárcavas por la acción de las aguas superficiales.



Fotos 3 y 4. Desarrollo de movimientos de masas en el yacimiento Punta Gorda. Foto 3. Colada de tierra en corteza laterítica en zona con pendiente moderada.

Foto 4. Fragmentos de rocas removidos por corrientes de derrubio desarrolladas en laderas del yacimiento.

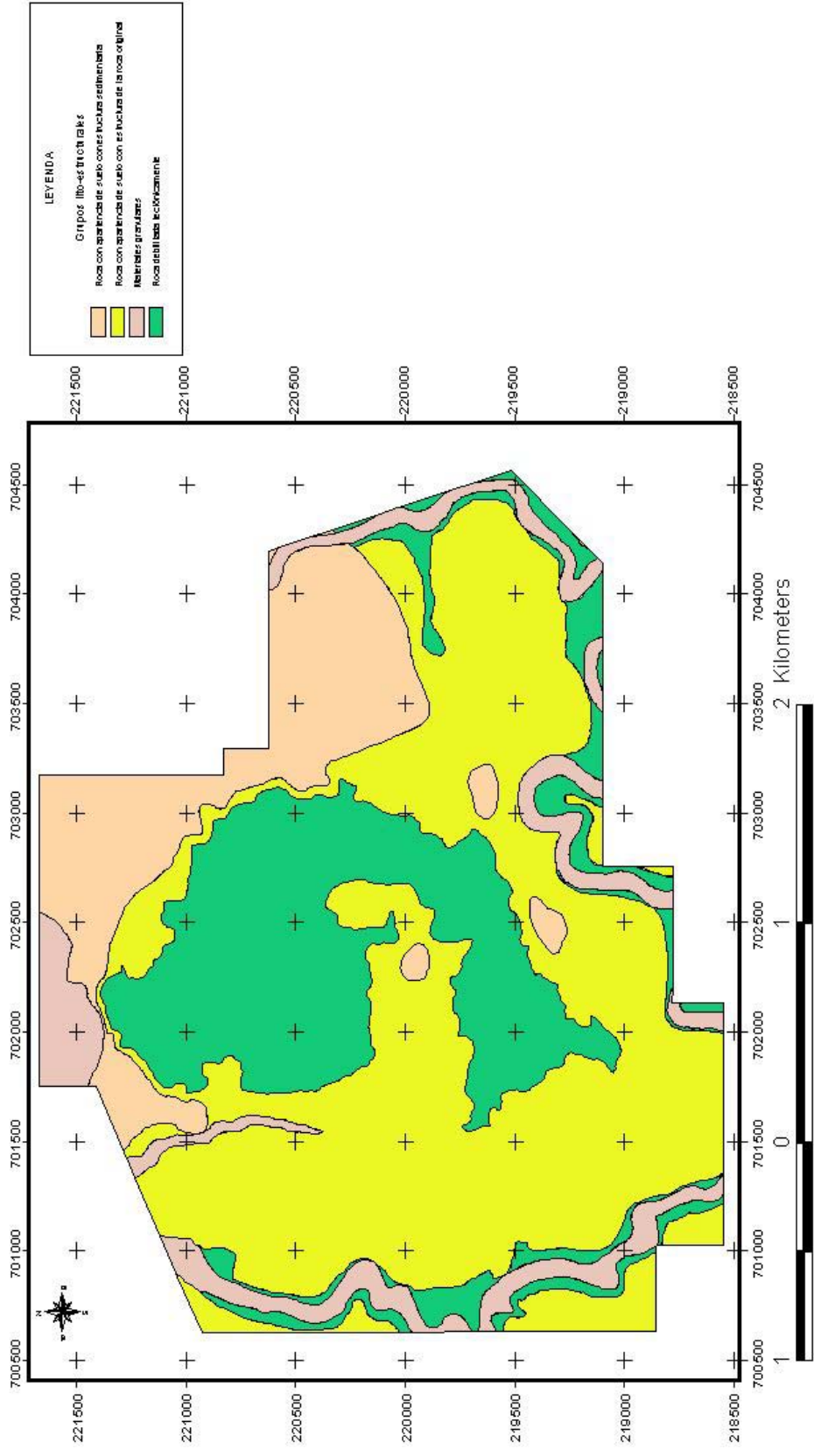


Figura 3.1. Plano de grupos lito-estructurales del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

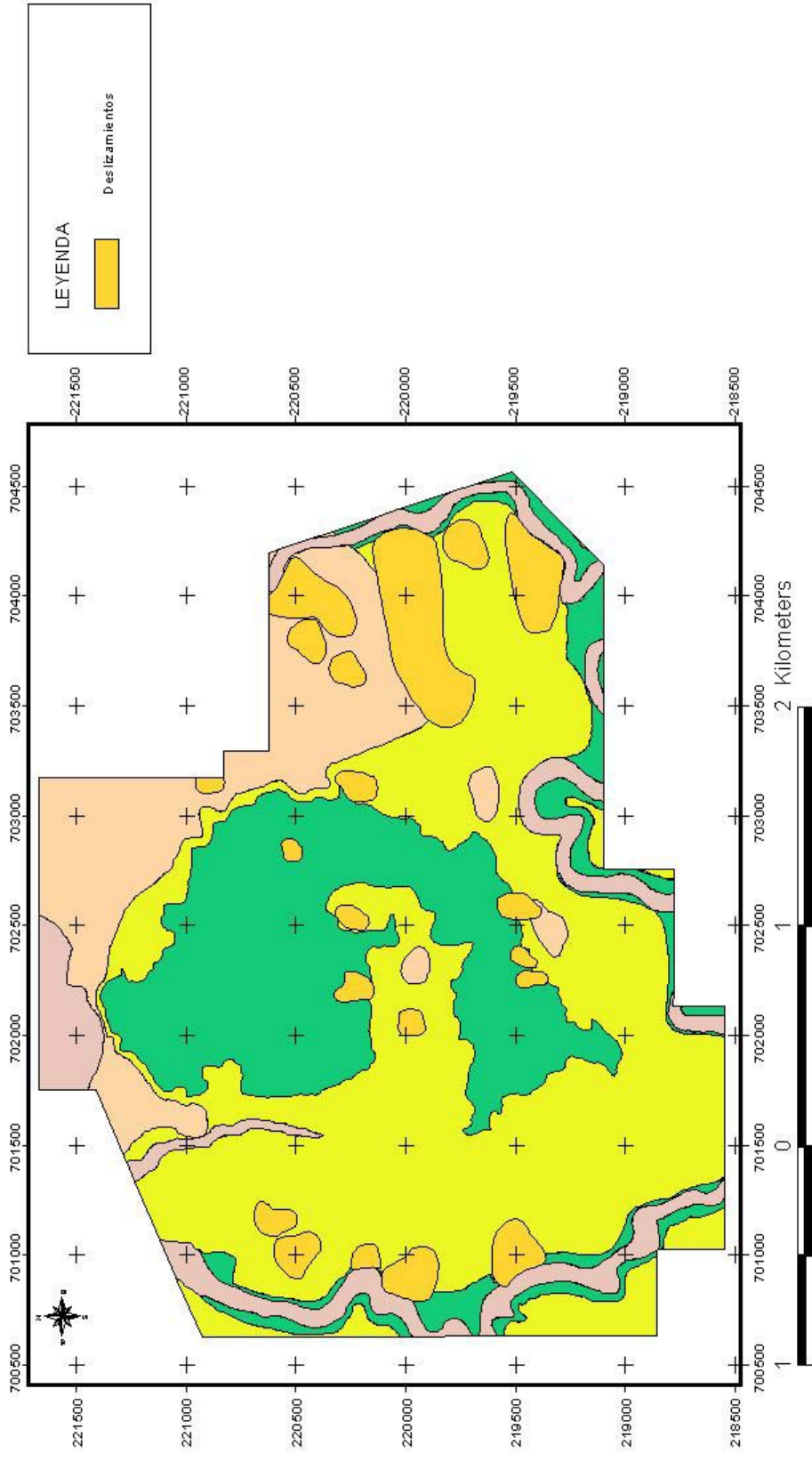


Figura 3.2. Superposición del plano de grupos lito-estructurales y el inventario de deslizamientos del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

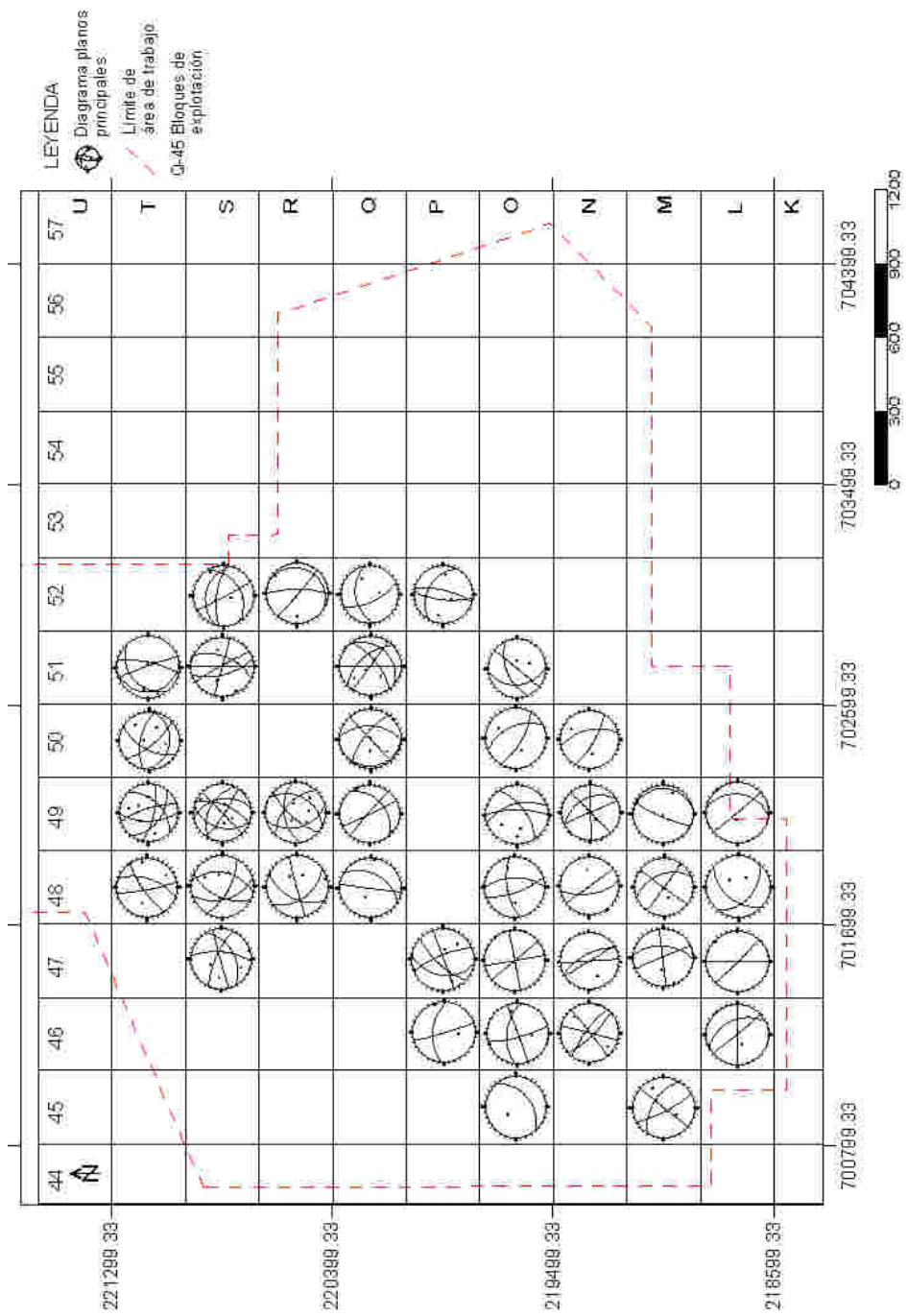


Figura 3.3. Plano de diagramas de planos principales del agrietamiento en el yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

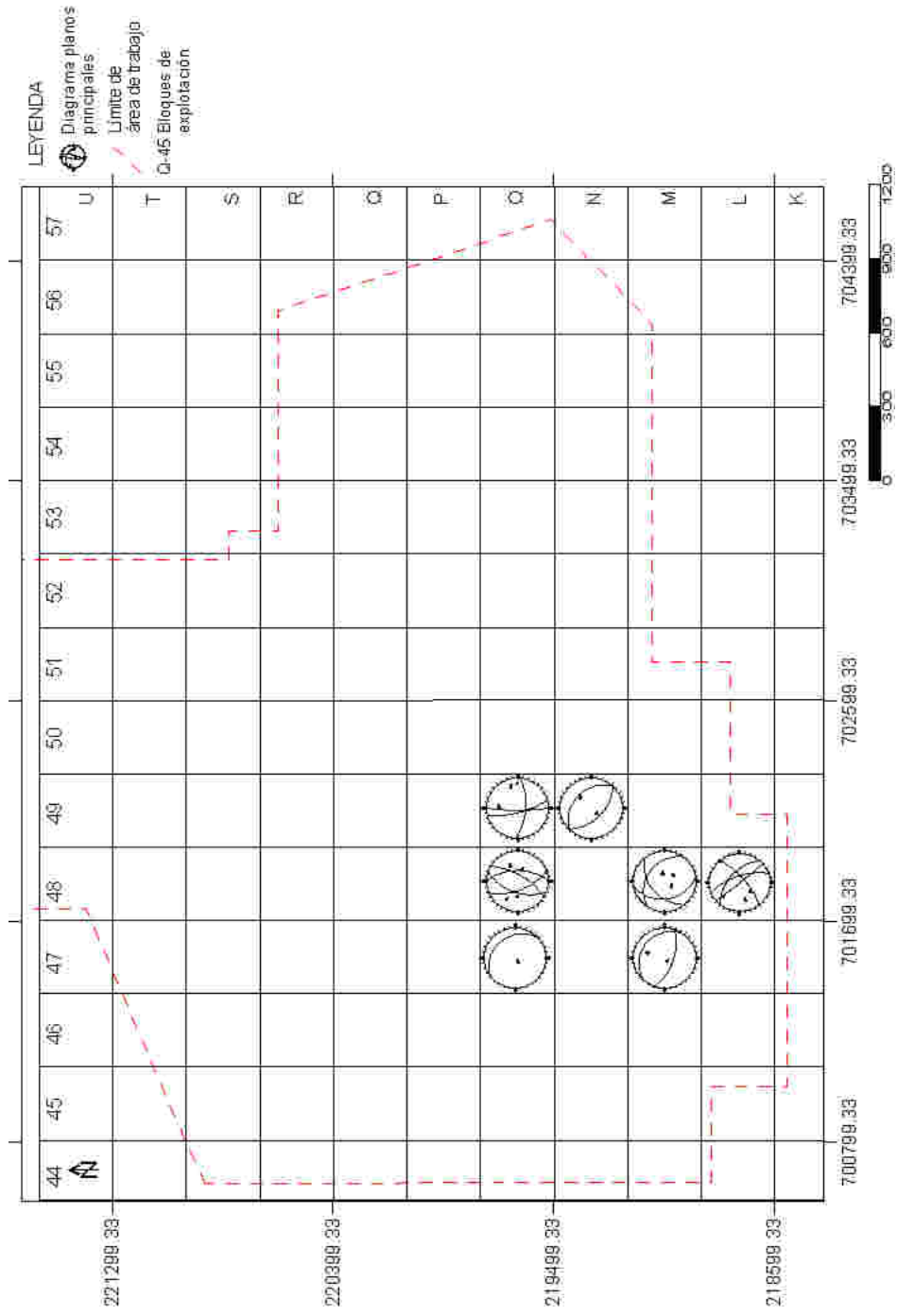


Figura 3.4. Plano de diagramas de planos principales de las fallas cartografiadas en el substrato rocoso del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

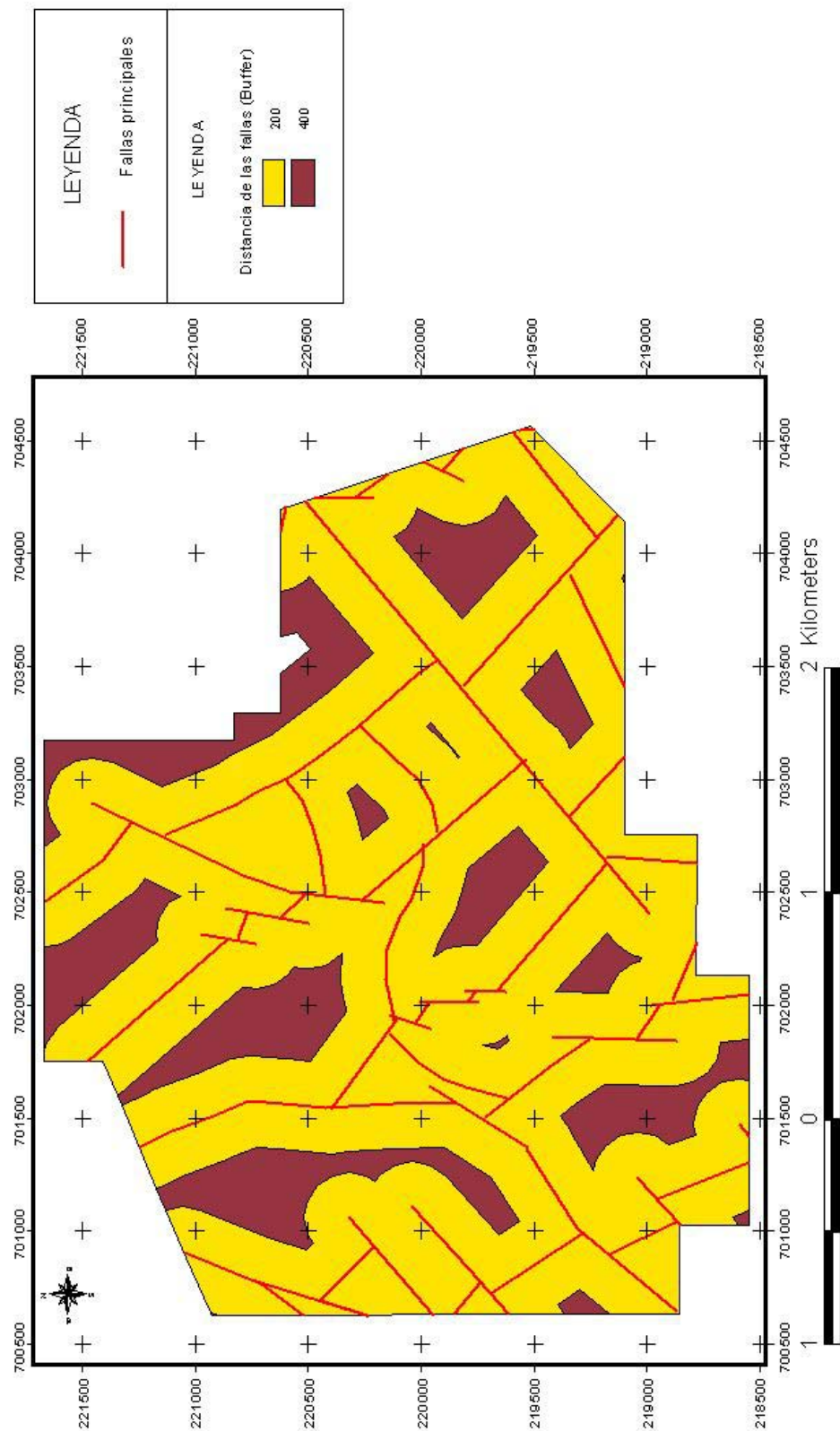


Figura 3.5. Plano de distancia (buffer) a las fallas principales presentes en el yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

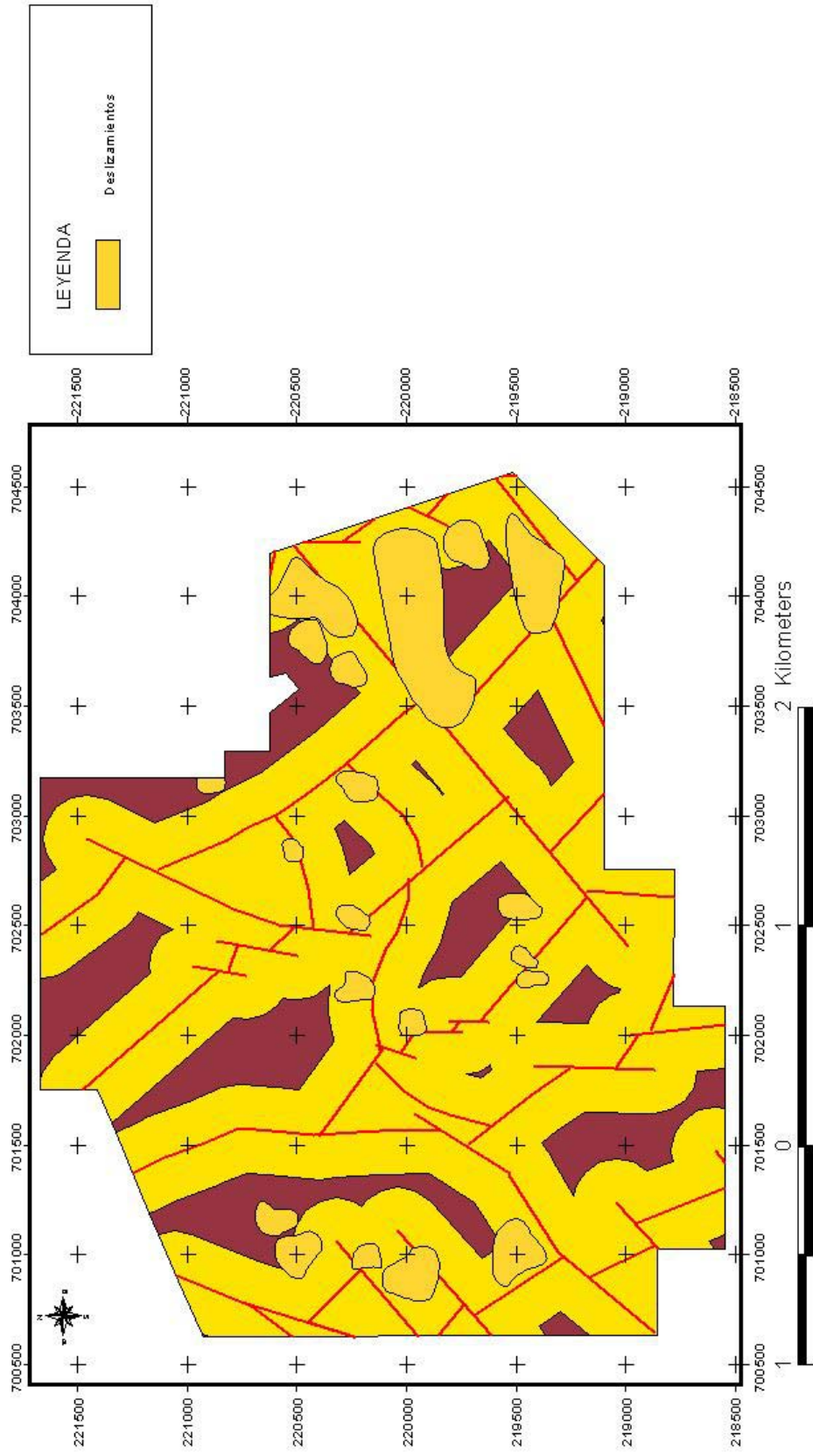


Figura 3.6. Superposición del plano de buffer y el inventario de deslizamientos del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

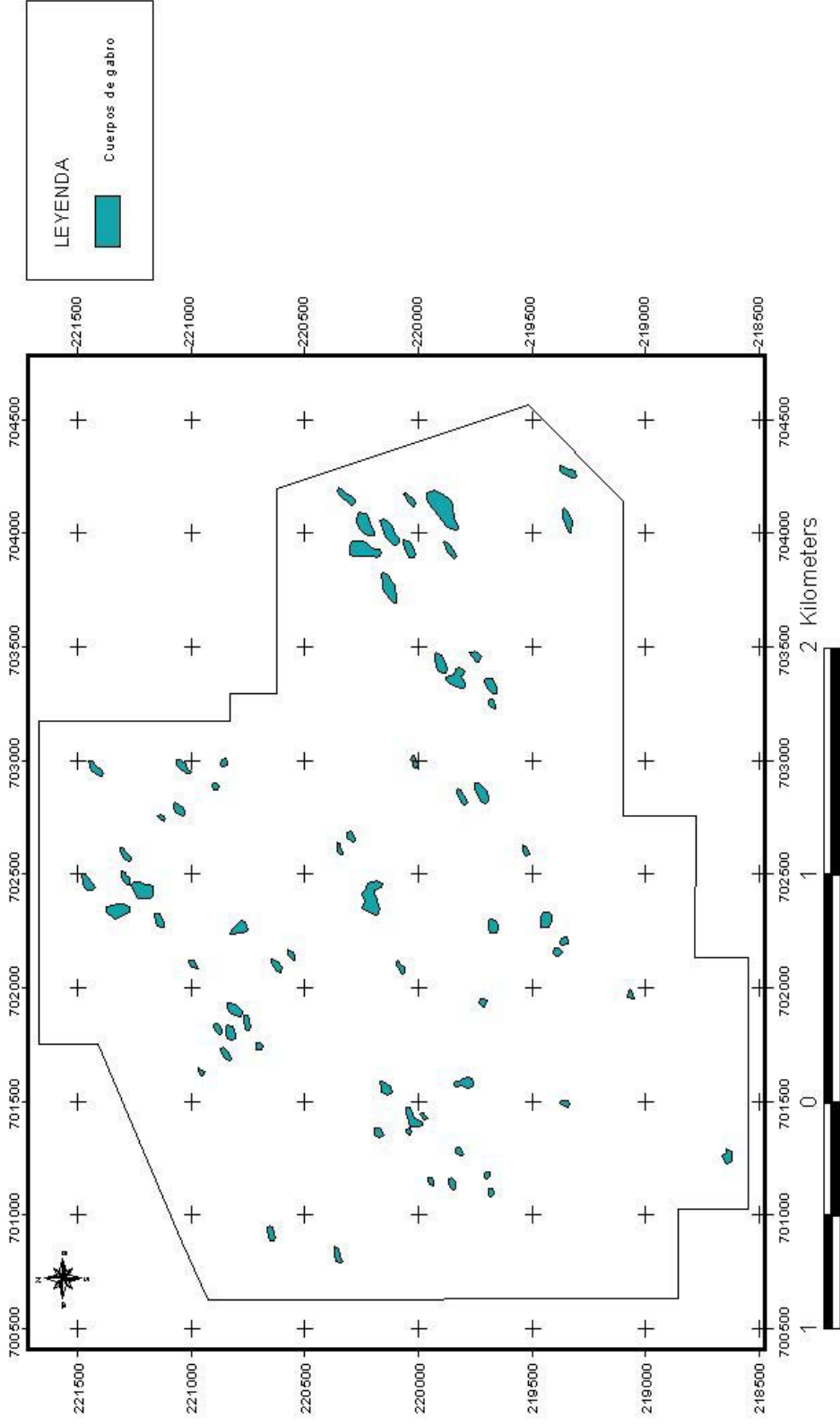


Figura 3.8. Plano de cuerpos de gabro presentes en el substrato rocoso del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

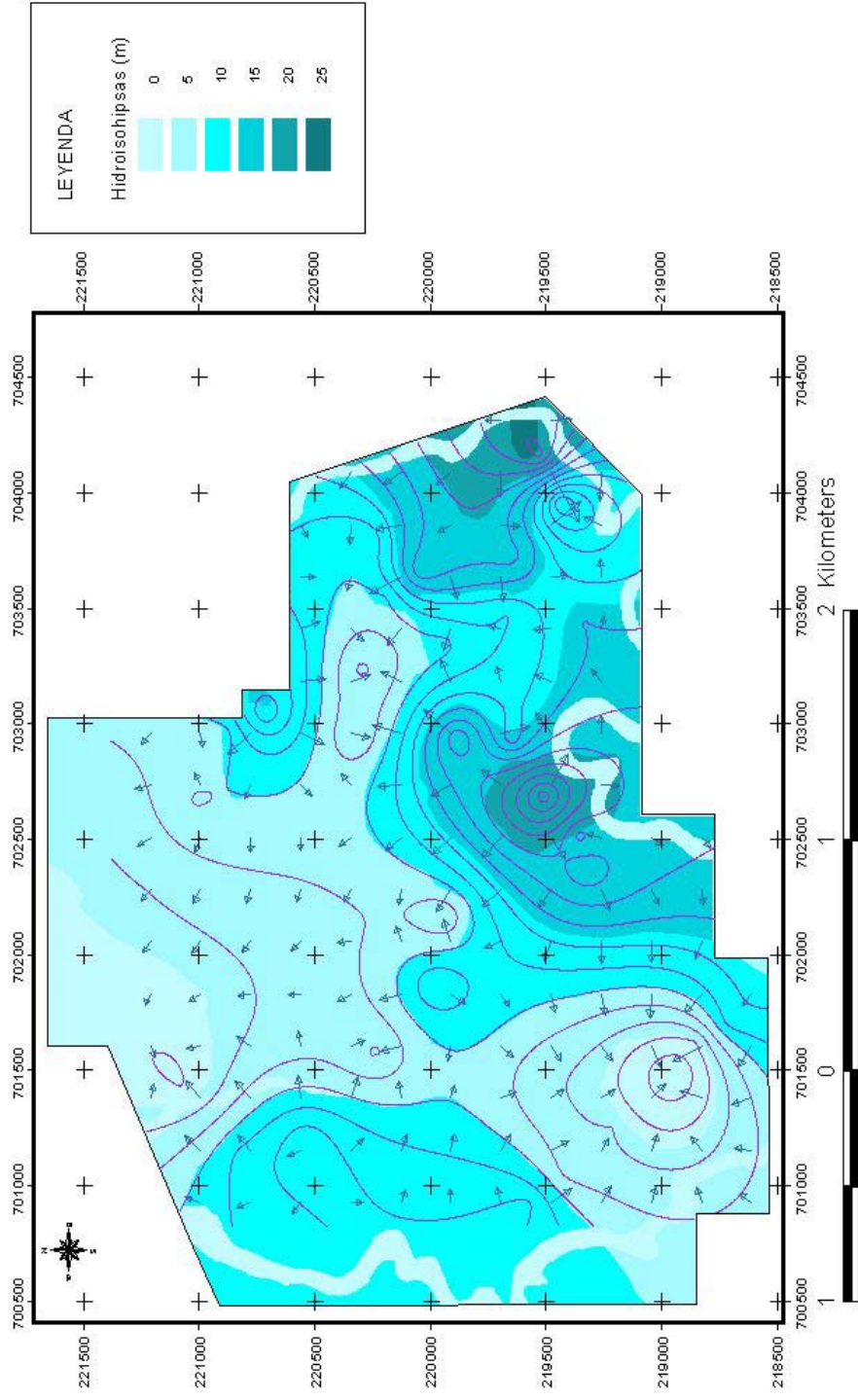


Figura 3.9. Plano de hidroisohipsas y dirección de flujos subterráneos en el yacimiento Punta Gorda. (Escala original 1:2 000).

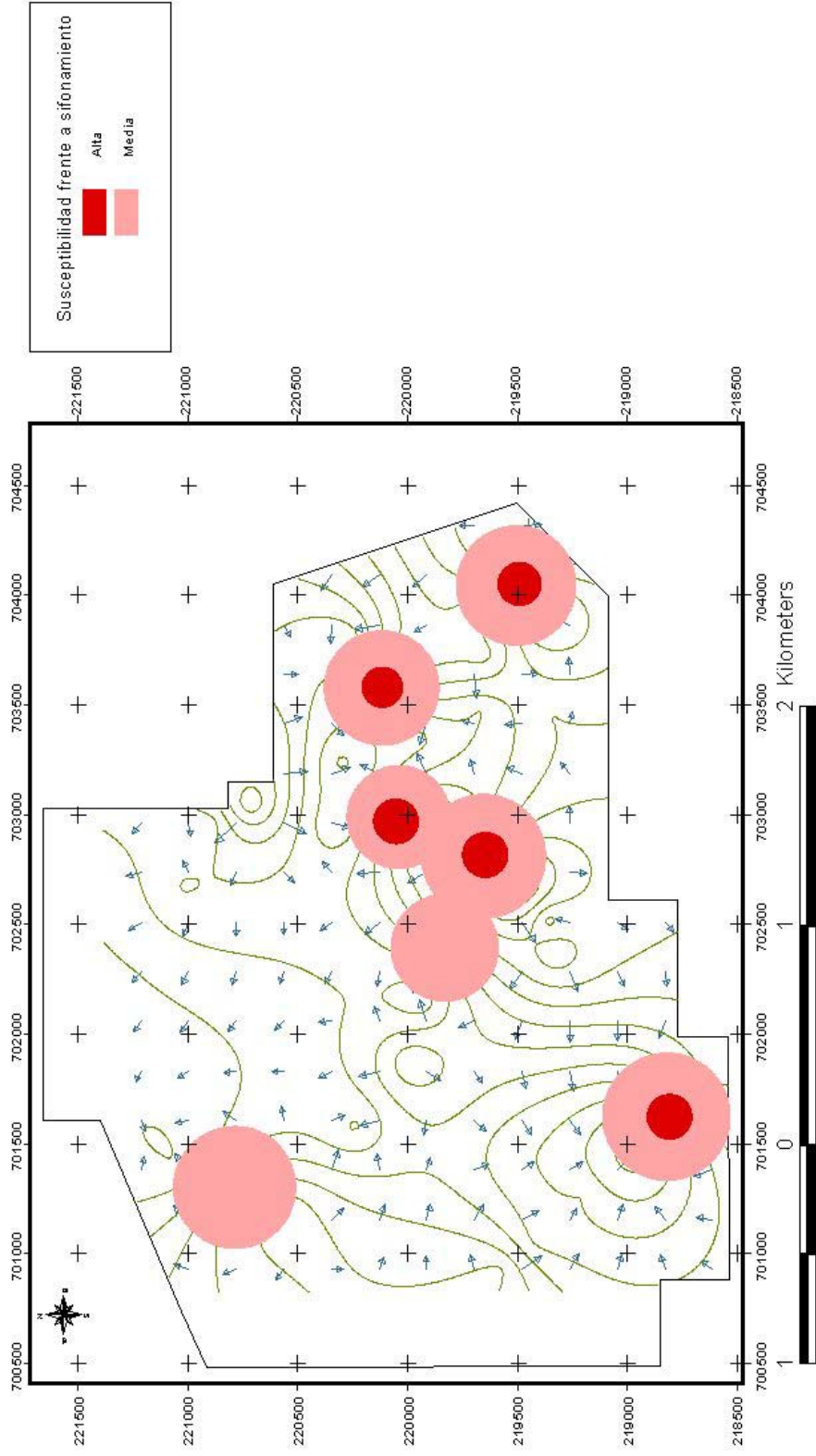


Figura 3.10. Plano de susceptibilidad del terreno al desarrollo de sifonamiento en el yacimiento Punta Gorda. (Escala original 1:2 000).

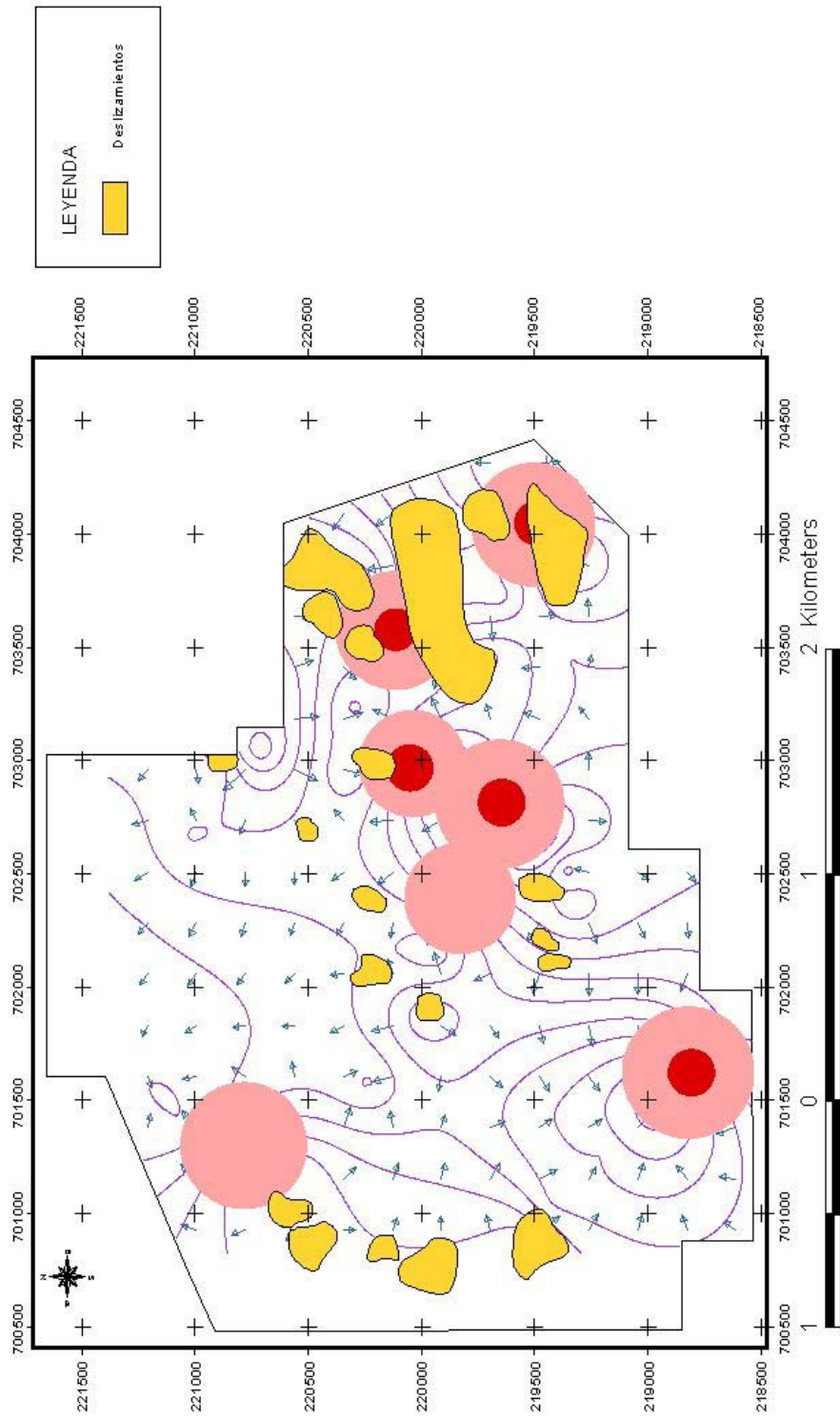


Figura 3.11. Superposición del plano de susceptibilidad a sifonamiento y el inventario de movimientos del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

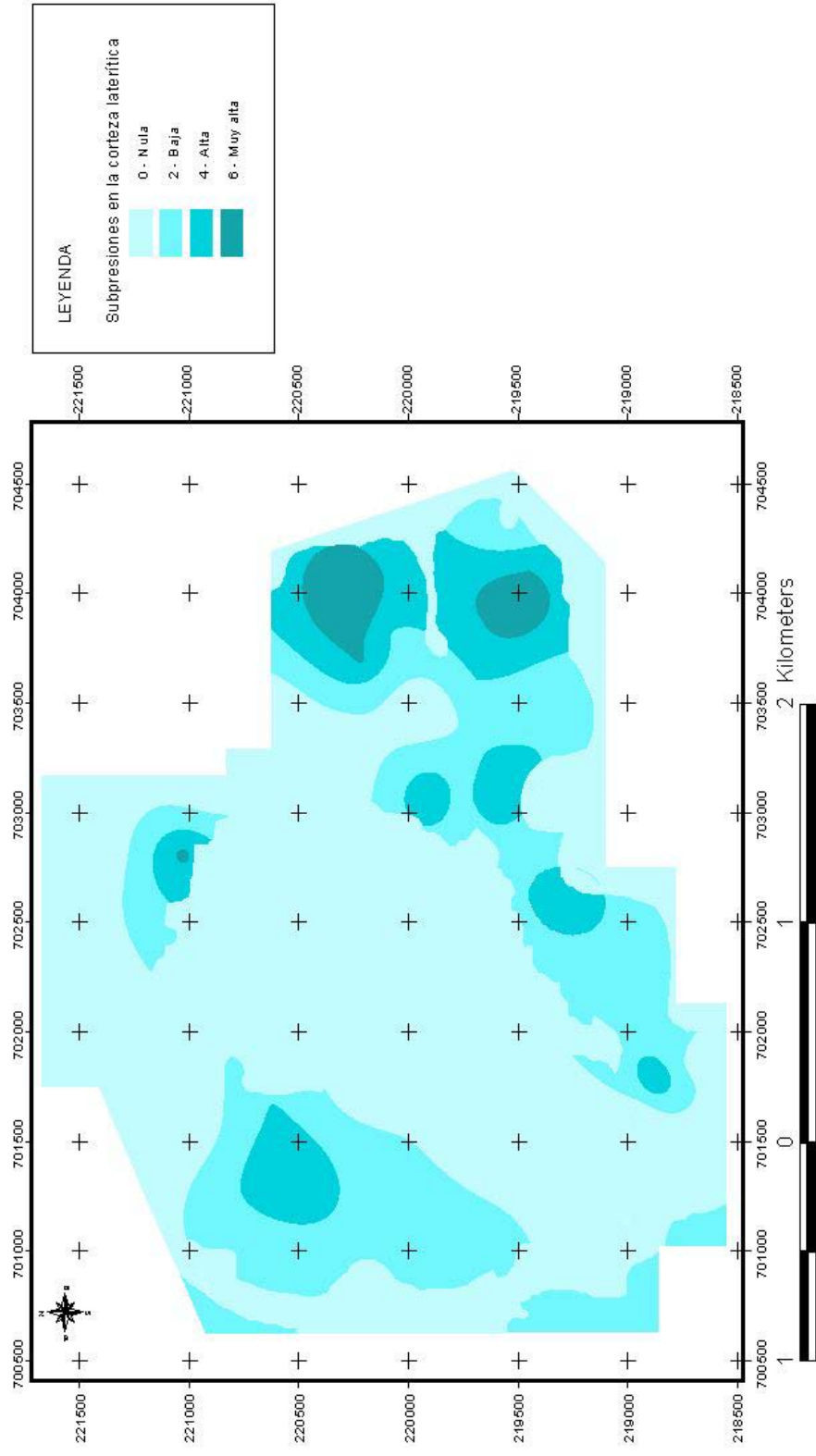


Figura 3.12. Plano de subpresiones de la corteza laterítica del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

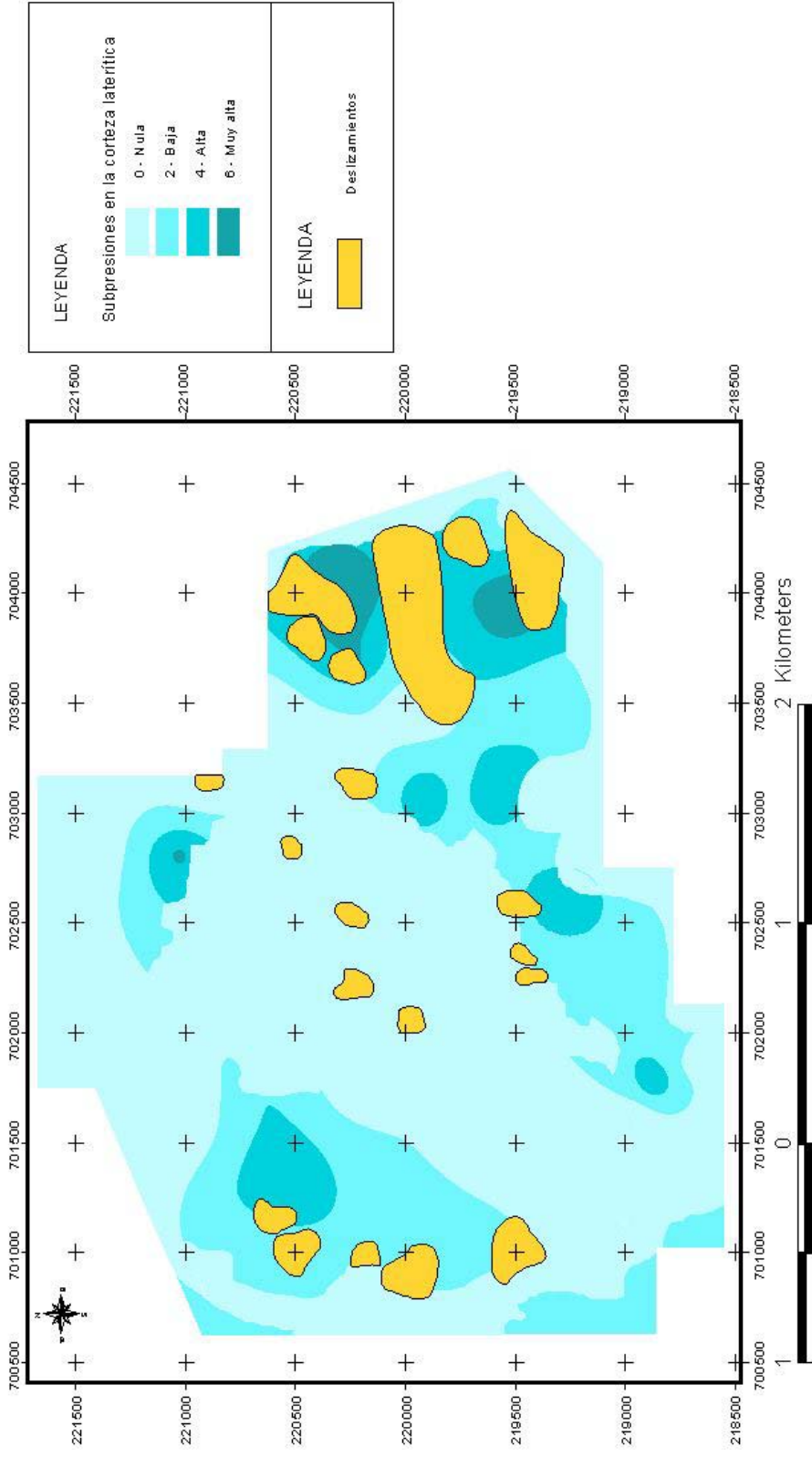


Figura 3.13. Superposición del plano de subpresiones y el inventario de movimientos del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

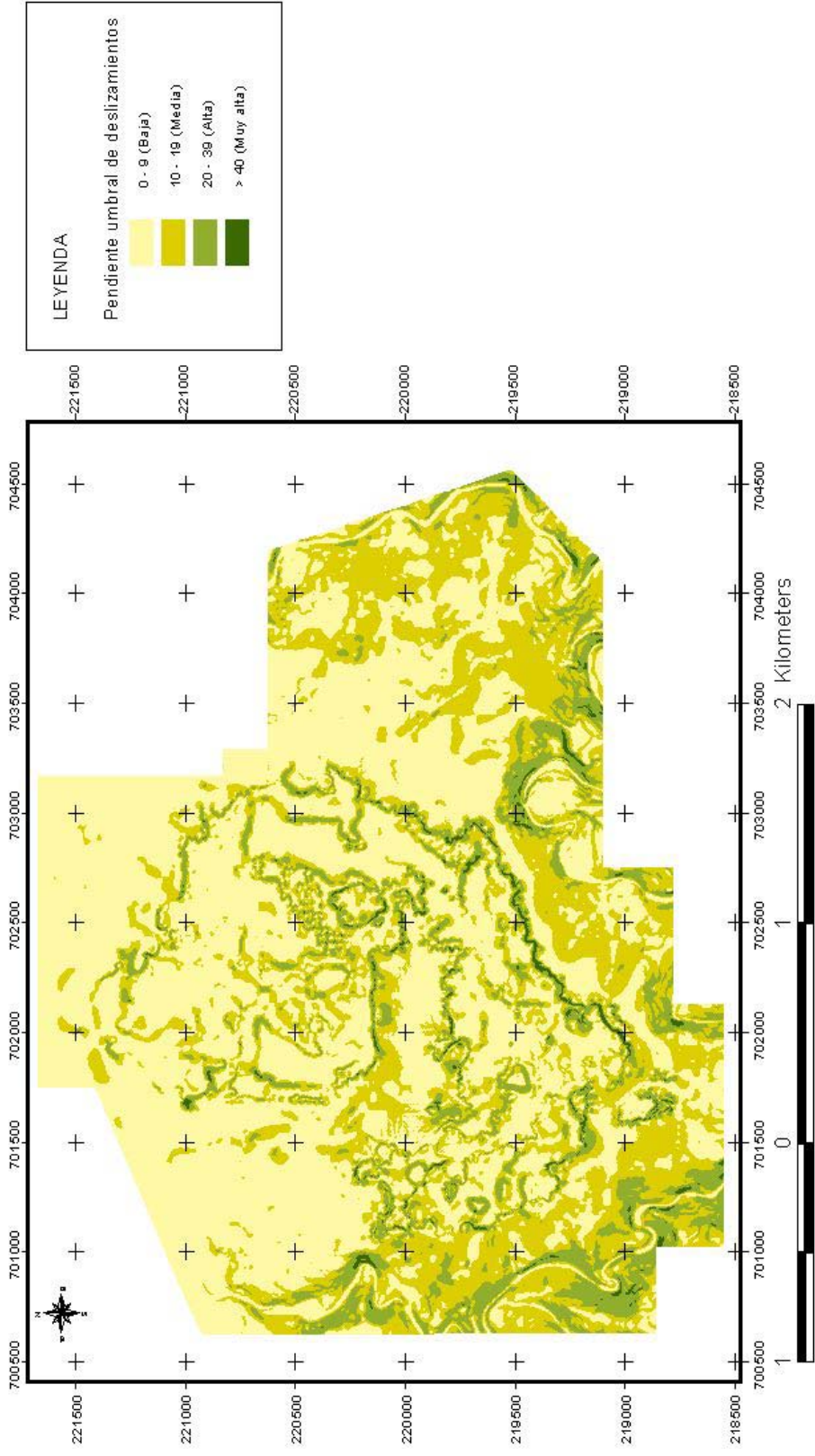


Figura 3.14. Plano de pendiente umbral de deslizamientos del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

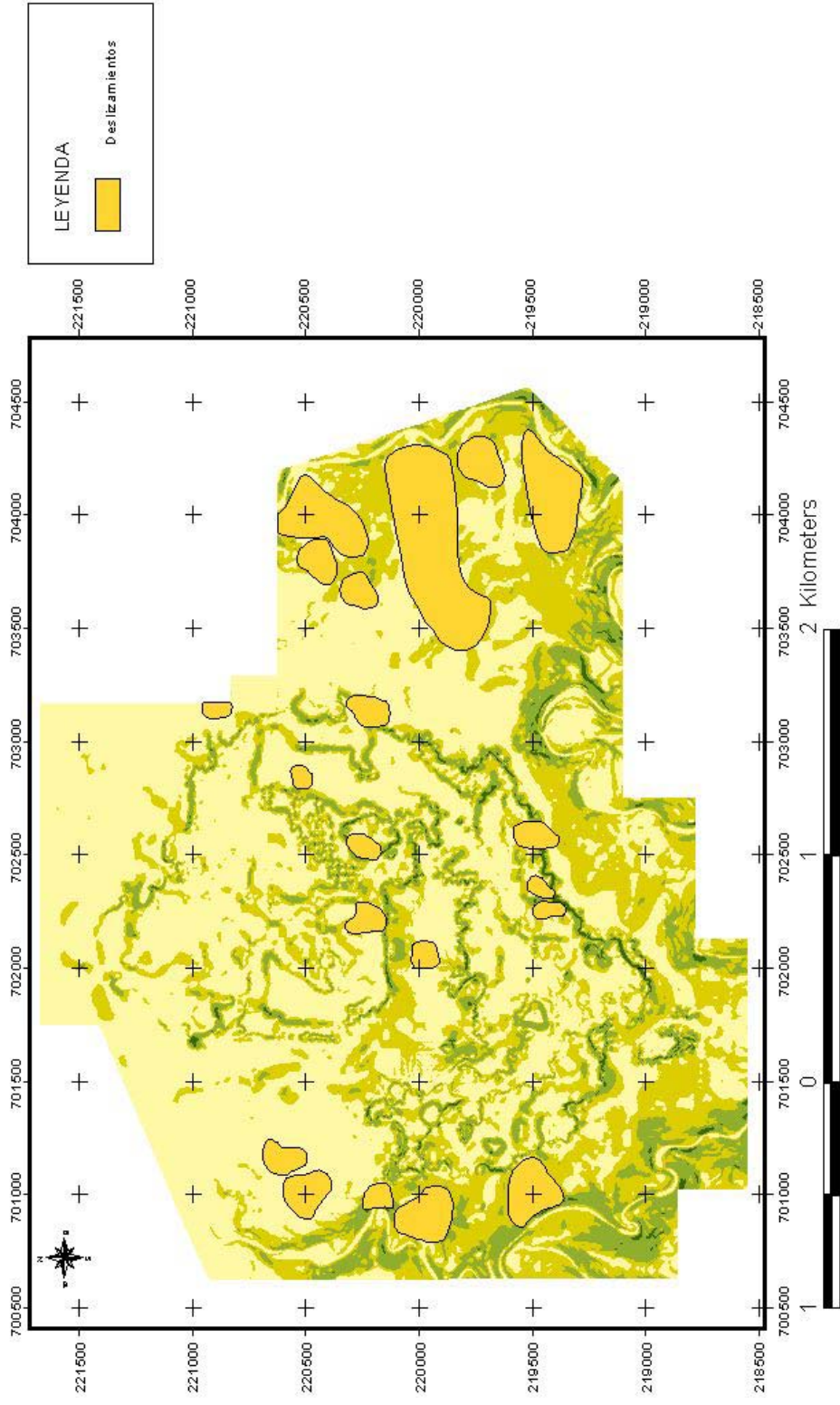


Figura 3.15. Superposición del plano de pendiente y el inventario de deslizamientos del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

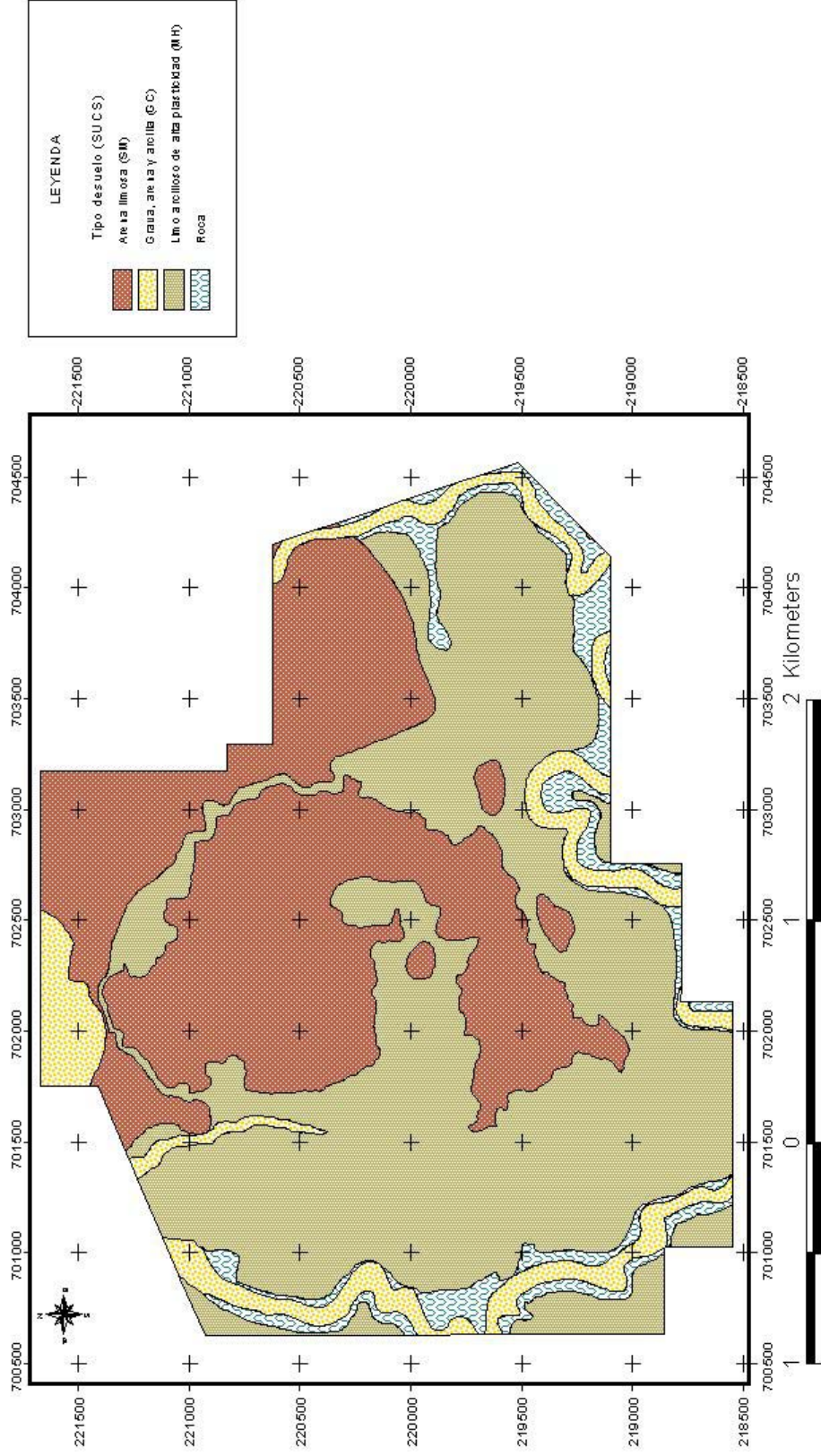


Figura 3.16. Plano de tipo de suelo (SUCS) del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

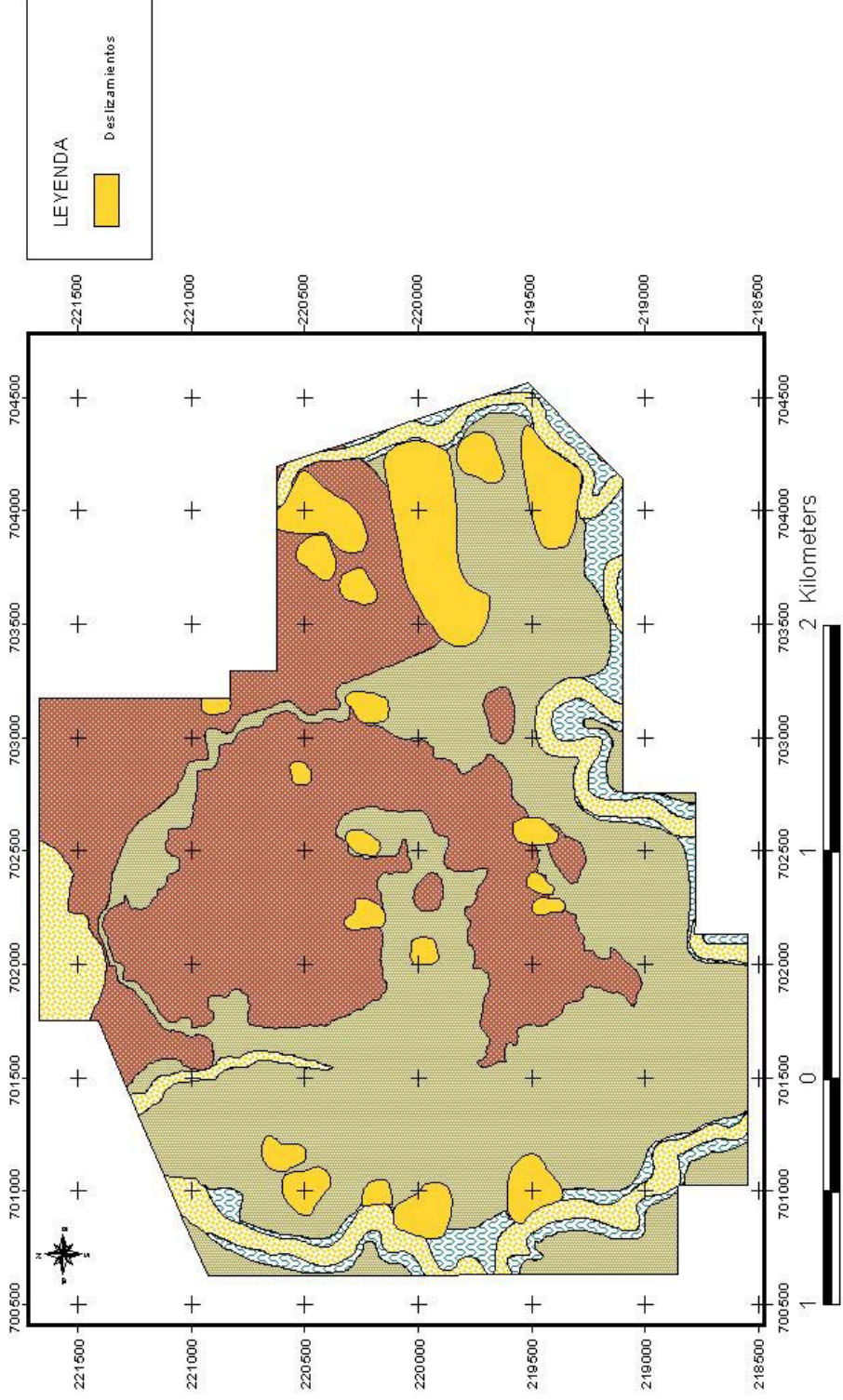


Figura 3.17. Superposición del plano de tipo de suelo y el inventario de deslizamientos del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

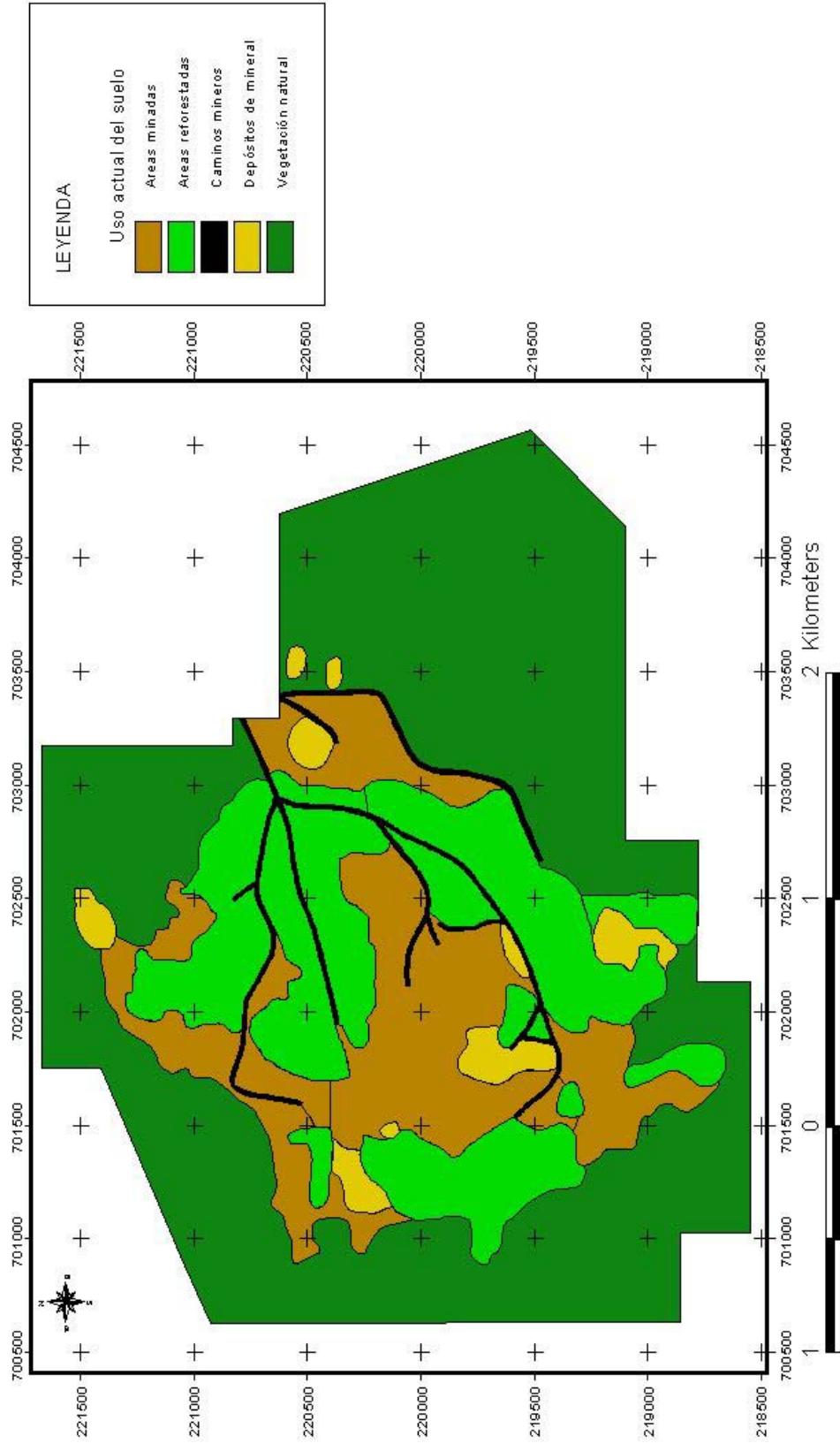


Figura 3.18. Plano de uso actual del suelo del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

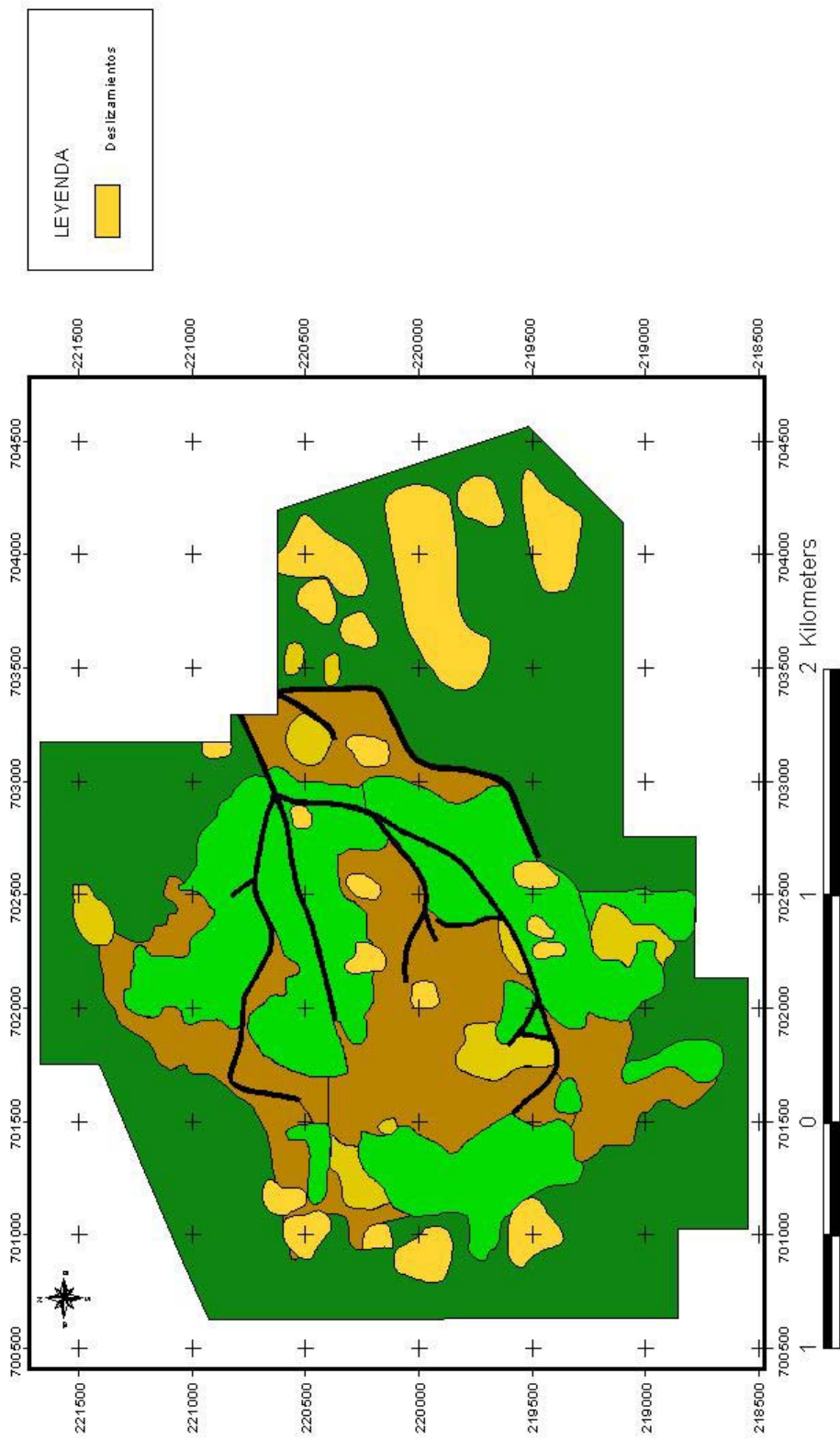


Figura 3.19. Superposición del plano de uso de suelo y el inventario de deslizamientos del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000).

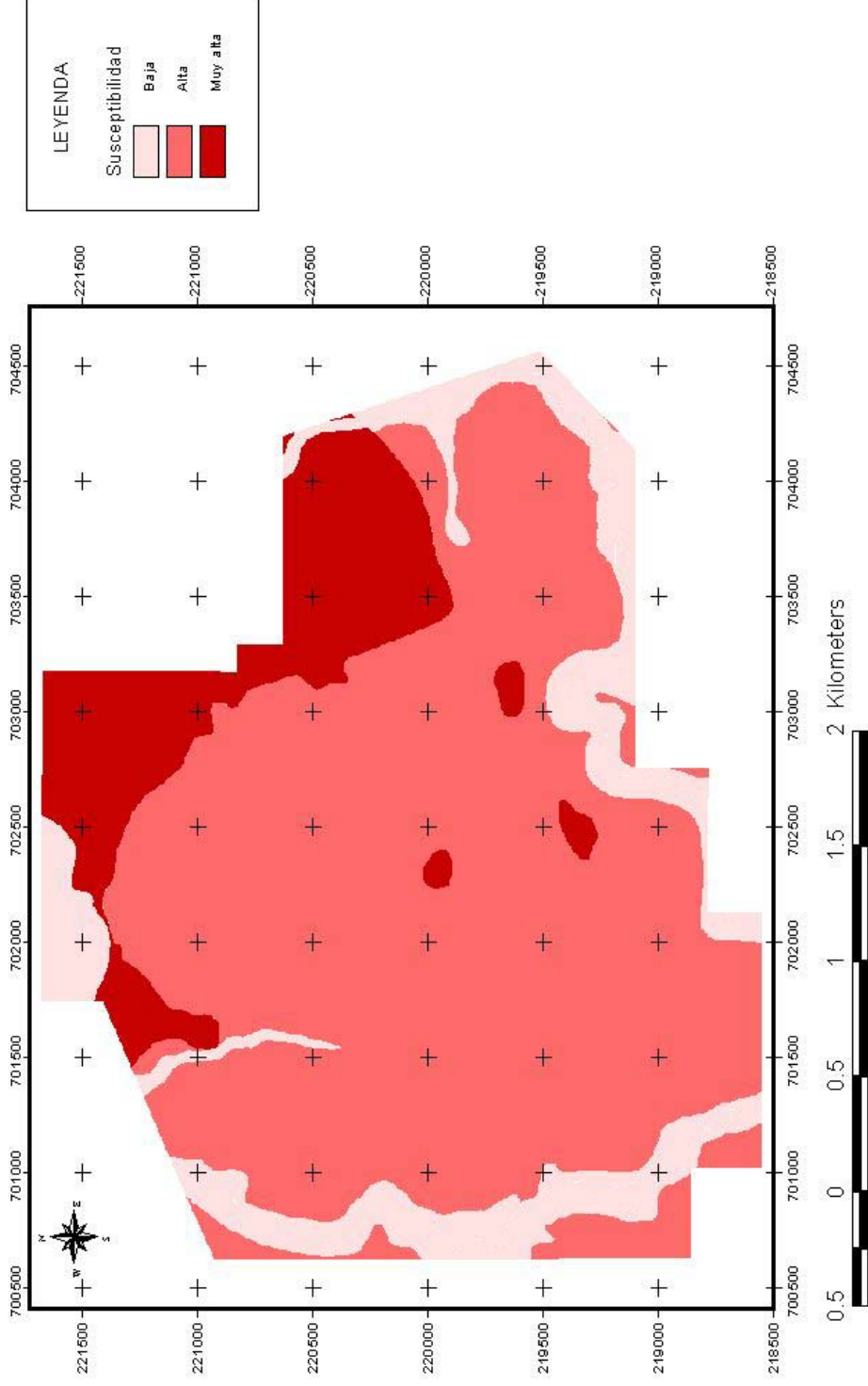


Figura 3.20. Plano de susceptibilidad a la rotura de las condiciones lito-estructurales en el yacimiento Punta Gorda. (Escala original 1:2 000. Formato raster, tamaño de píxel: 5x5 m).

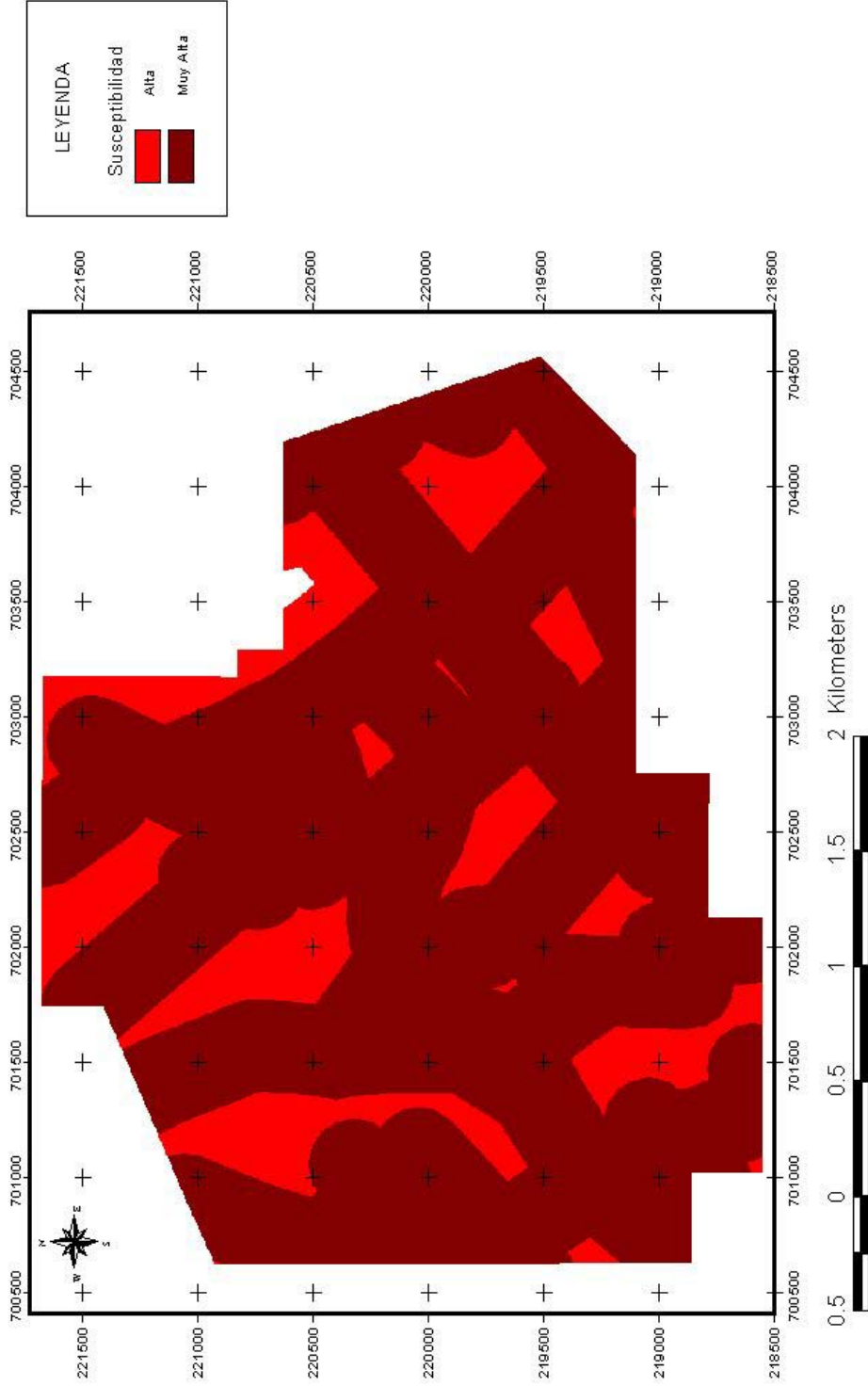


Figura 3.21 . Plano de susceptibilidad a la rotura por las condiciones tectónicas en el yacimiento Punta Gorda. (Escala original 1:2 000. Formato raster, tamaño de píxel: 5x5 m).

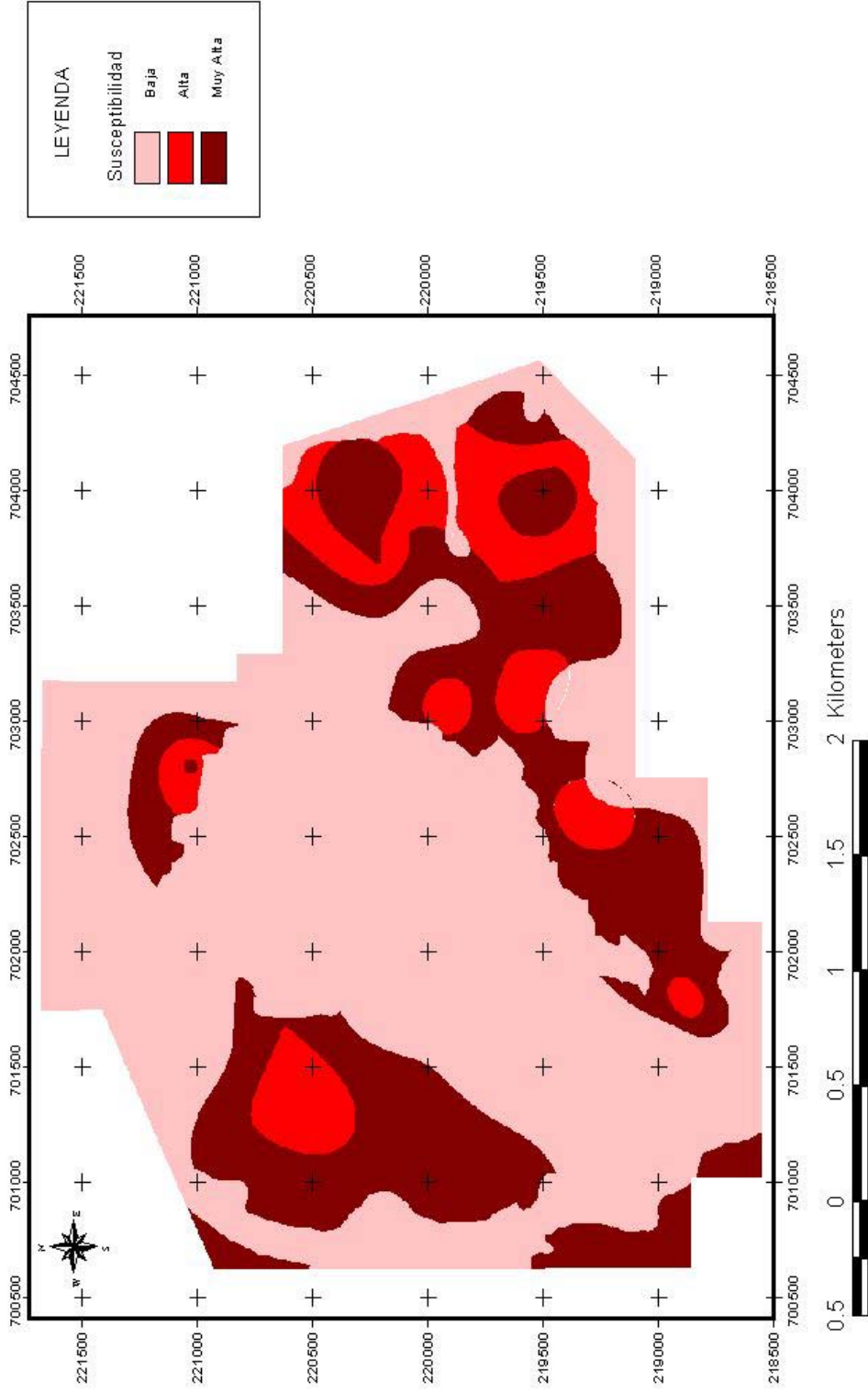


Figura 3.22. Plano de susceptibilidad a la rotura por las condiciones hidrogeológicas en el yacimiento Punta Gorda. (Escala original 1:2 000. Formato raster, Tamaño de píxel: 5x5 m).

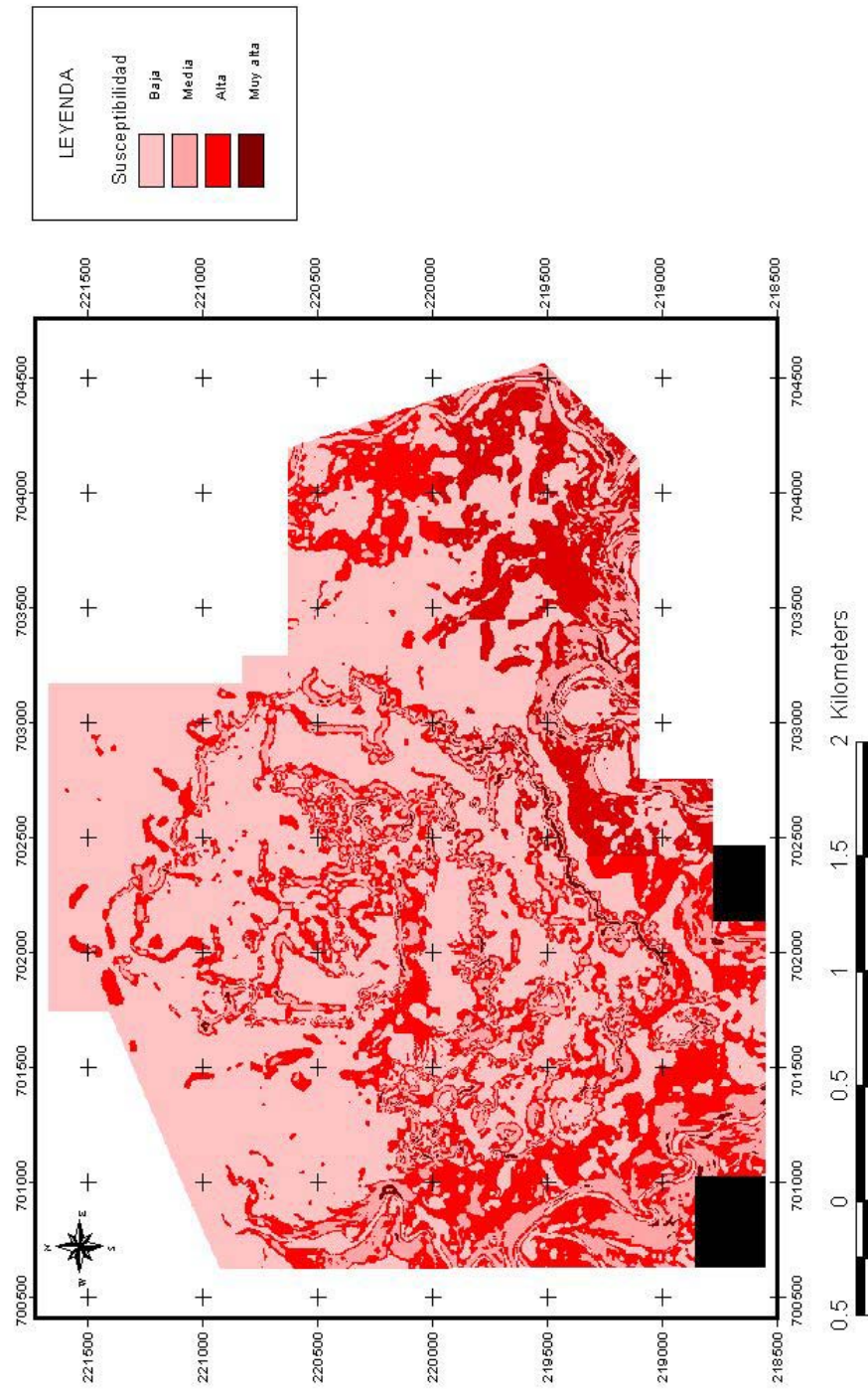


Figura 3.23. Plano de susceptibilidad a la rotura debido a la pendiente umbral de deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda. (Escala original 1:2 000. Formato raster, tamaño de píxel: 5x5 m).

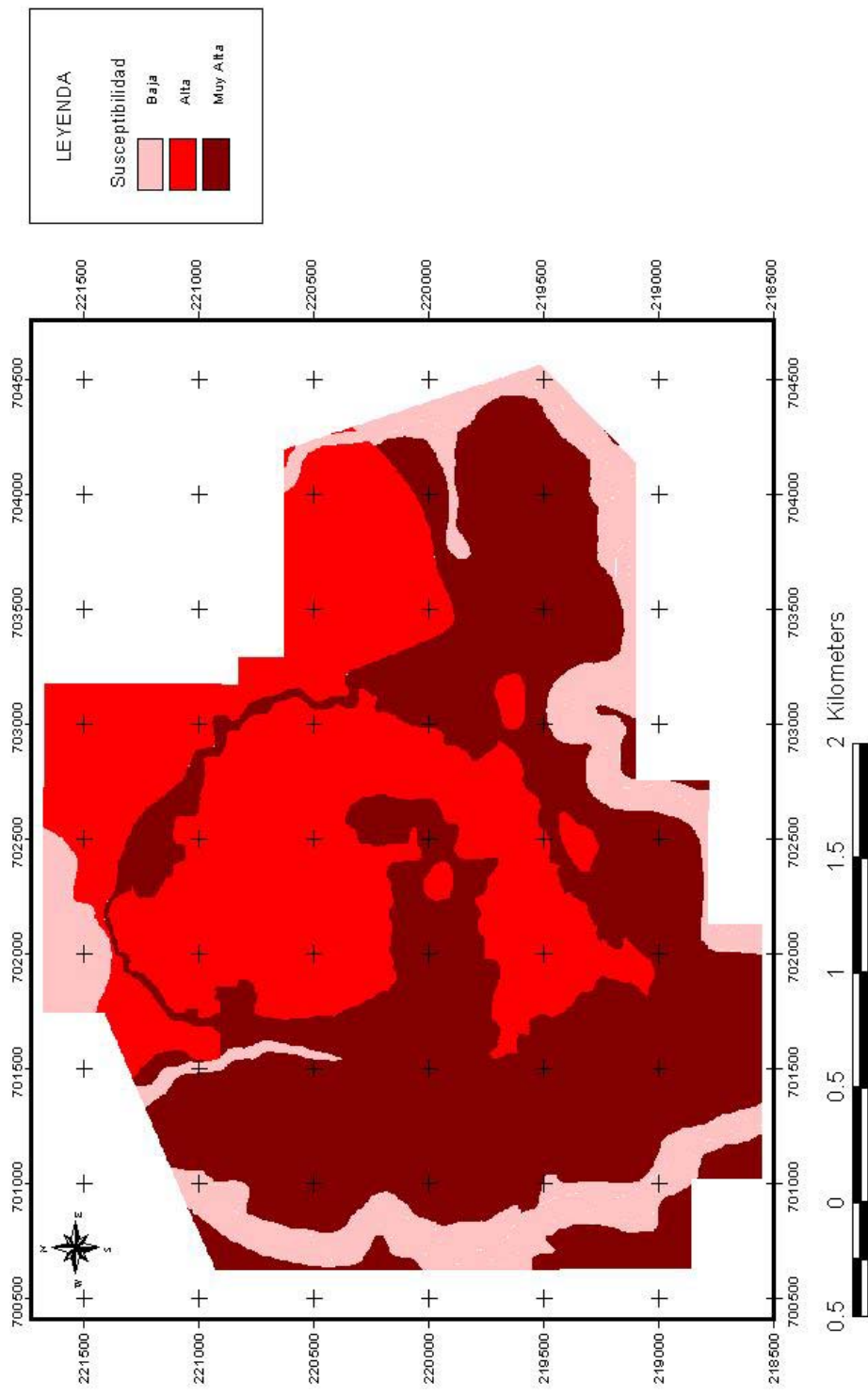


Figura 3.24. Plano de susceptibilidad a la rotura debido al tipo de suelo geotécnico en el yacimiento Punta Gorda. (Escala original 1:2 000. Formato raster, tamaño de píxel: 5x5 m).

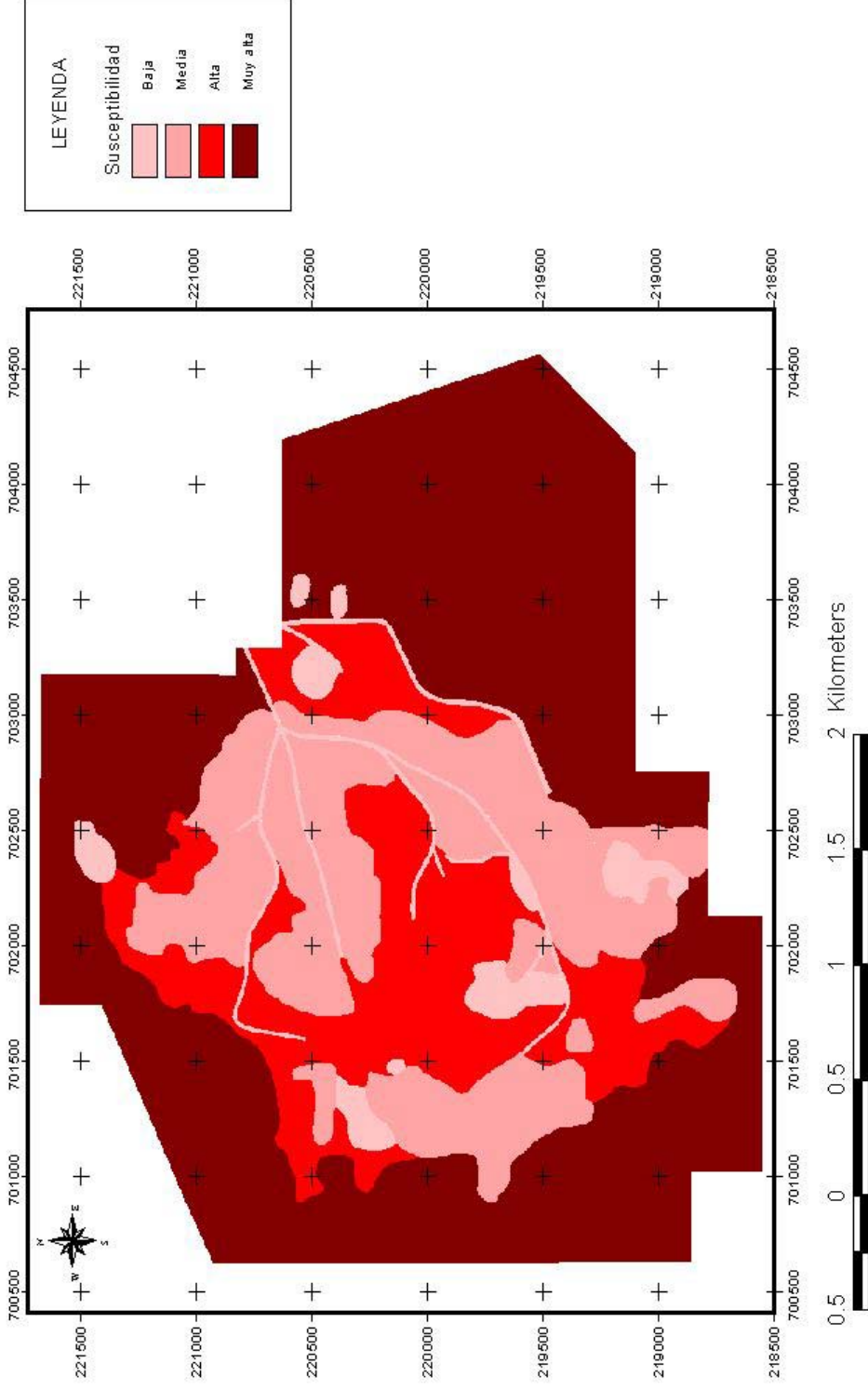


Figura 3.25. Plano de susceptibilidad a la rotura debido al uso de suelo en el yacimiento Punta Gorda. (Escala original 1:2 000. Formato raster, tamaño de píxel: 5x5 m).