



REPÚBLICA DE CUBA

**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ”**

**FACULTAD DE GEOLOGÍA - MINERÍA- INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD GEOTÉCNICA EN LA CANTERA
PARA ÁRIDOS RUBÉN RODRÍGUEZ**

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO ACADÉMICO DE MÁSTER EN
GEOLOGÍA
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA, MENCIÓN GEOTECNIA E HIDROGEOLOGÍA
9NA EDICIÓN**

Autor: Lisandro Marchante Yamacho.

Tutor: Dr. Rafael Guardado Lacaba.

Moa, 15 de julio de 2015

Declaración de autoría

Declaro ser el único autor del presente Trabajo de Diploma en opción al Título de Máster en Ciencias Geológicas. Reconociendo al Instituto Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” y por tanto al Departamento de Geología los derechos patrimoniales del mismo y con carácter exclusivo.

Para que así conste firmamos la misma a los _____ días del mes _____ del año 2015.

Ing. Lisandro de Jesús Marchante Yamacho

Firma del Autor

Dr.C. Rafael Guardado Lacaba

Firma del Tutor

Pensamientos

*... no hagas de los defectos una distancia, y si,
una aproximación...*

*... haz de los obstáculos escalones para aquello que
quieres alcanzar...*

Charles Chaplin.

Dedicatoria

A la Revolución Cubana, familia y esposa.

Agradecimientos

Muchas han sido las personas que, al tener conocimiento de la tarea sobre la realización de la presente investigación, se apresuraron a brindar su apoyo incondicional para coadyuvar a su feliz ejecución. Esta fue una ayuda aceptada en todos los casos y recibida con profunda gratitud.

Es difícil destacar ayudas concretas, pero no pueden quedar sin mención las atenciones que ha tenido con el autor el Dr. C. Rafael Guardado Lacaba, al transmitirme la hermosa virtud del conocimiento en una rama así de compleja como amplia que es sin dudas la Geotecnia.

Se hace necesario destacar aquellas personas que constituyeron al Consejo Científico, los cuales permitieron la oportunidad de cumplir uno de mis objetivos profesionales: convertirme en **Máster en Ciencias Geológicas**.

No puedo menospreciar al claustro de profesores que, con su profesionalidad superaron todas expectativas logrando elevar mis conocimientos académicos y culturales a un nivel superior; permitiendo observar al mundo que nos rodea desde una perspectiva mucho mejor desarrollada.

Personalmente no puedo permitir despreciar la ardua labor que han realizado quienes para mí son la fuente de toda la energía que brota mi actitud: *Mis queridos padres*.

A todos mis amigos, quienes con su apoyo supieron ser faro en los momentos sumamente oscuros y difíciles, durante el recorrido de este camino .

Por último, especial mención merece la dueña de mi corazón; mi amor del alma, Yanisleydis Gámes Salomón. Por aprender a caminar a mi lado bajo cualquier circunstancia.

A todos, absolutamente, desde lo más profundo de mi corazón.

Muchas Gracias.

Resumen

El presente trabajo investigativo titulado “**Evaluación de la susceptibilidad geotécnica en la Cantera para áridos Rubén Rodríguez**” consiste en esclarecer los indicadores geodinámicos para los cuales los frentes de explotación son inestables. Para ello es necesario hacer una evaluación de las rocas que constituyen el macizo rocoso desde el punto de vista hidrogeológico, geomorfológico, litológico, geotécnico y geomecánico. Para cada caso se determinaron variables como la permeabilidad, gradiente hidráulico, presiones hidrostáticas, filtración, pendiente, agrietamiento, resistencia a la compresión axial y triaxiales en campo y laboratorio, partiendo del uso de varios criterios como Barton-Choubey y el de Hoek-Brown, para determinar según el tipo de roca analizado en el yacimiento el factor de seguridad para lo cual es estable el talud mostrando cada resultado en mapas temáticos con el empleo del Argis para así determinar cuáles son las medidas preventivas más eficientes a tomar para que la producción de la Cantera Pilón y el resto de los yacimientos para áridos sean más eficaces. Arrojando resultados importantes como es el caso de una metodología para el estudio de la estabilidad de los taludes en canteras y el mapa de susceptibilidad geotécnica.

Abstract

The present investigating put a title to work ***Evaluación of susceptibility geotechnic at the Stone Pit for arid Rubén Rodríguez*** consists in explaining indicators geodynamic for which the fronts of exploitation are unstable. It is necessary to do an evaluation of the rocks that constitute the rocky mountain mass from the point of view hydrogeology, geomorphology, litology, geotechnical and geomechanic for it. They determined variables as permeability, hydraulic slope, hydrostatic pressures, leak, slope, cracking, Axial compression strength for each case and Triaxial at field and laboratory, departing of the use of several criterions like Barton-Choubey and the one belonging to Hoek- Brown, to determine according to the type of rock once the safety factor was examined at the deposit for which is stable the slope showing each result in thematic maps with the Argis's job stops that way determining which ones they are the most efficient preventive measures to take stops than the production of the Stone Pit Pilón and the rest of the deposits stops Arid be more efficacious. Yielding important results as geotechnical is the case of a methodology for the study of the stability of the slopes at stone pits and the map of susceptibility.

Tabla de contenidos

Declaración de autoría	II
Pensamientos	III
Dedicatoria.....	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Abstract.....	VII
Tabla de contenidos.....	VIII
Introducción	1
Capítulo 1. Marco teórico conceptual de la investigación.	10
1.1. Base teórica	10
1.2. Métodos de estimación de la susceptibilidad del terreno	18
1.3. Los Sistemas de Información Geográficos (SIG) en la cartografía de susceptibilidad.	23
1.4. Recuento histórico sobre los SIG.	24
1.5. Análisis histórico de la cartografía de susceptibilidad del terreno por el desarrollo de deslizamientos.	25
1.6. Recientes trabajos de cartografía por susceptibilidad del terreno frente al desarrollo de deslizamientos. ...	31
1.7. Tendencias actuales de la cartografía de susceptibilidad.	34
Capítulo 2. Caracterización de los escenarios ingeniero geológicos.	37
2.1. Generalidades.....	37
2.2. Evolución geológica de los yacimientos	39
2.3. Análisis de las condiciones geodinámicas en el escenario ingeniero geológico.	42
Conclusiones.....	45
Capítulo 3. Metodología para la reducción de riesgos por deslizamientos de taludes en la Cantera Rubén Vázquez.....	47
3.1. Introducción.....	47
3.2. Criterios de inestabilidad.	47
3.3. Factores condicionantes utilizados en el análisis de susceptibilidad.....	49
3.4. Inventario de deslizamientos.	50

3.5. Factor litológico.....	51
3.6. Factor estructural.....	52
3.7. Factor hidrogeológico.....	52
3.8. Factor geotécnico.....	54
3.9. Factor geomecánico.....	55
3.10. Análisis del factor de seguridad.....	60
3.11. Análisis de la calidad del macizo rocoso.....	63
3.12. Factor geomorfológico.....	63
3.13. Factor de uso de suelo.....	63
3.14. Metodología de valoración de la susceptibilidad a la rotura mediante el análisis estadístico.....	64
Conclusiones.....	69
Capítulo 4. Evaluación de la susceptibilidad del terreno por deslizamientos en taludes.....	69
4.1. Introducción.....	69
4.2. Descripción y cartografía de los yacimientos.....	69
4.3. Clasificación de los deslizamientos.....	73
4.4. Descripción de los factores que intervienen en el surgimiento de inestabilidades.....	76
4.5. Valoración y reclasificación de los planos de factores condicionantes.....	97
4.6. Descripción del plano de susceptibilidad.....	101
4.7. Medidas preventivas.....	102
Conclusiones.....	103
Conclusiones y recomendaciones.....	98
CONCLUSIONES.....	98
RECOMENDACIONES.....	99
Referencias bibliográficas.....	100

Introducción

Los mal llamados “Desastres Naturales”, constituyen hoy en día, uno de los principales problemas que amenazan la estabilidad y desarrollo de la especie humana en nuestro planeta; la razón es muy simple, no hemos logrado aún una convivencia inteligente con las fuerzas de la naturaleza.

Los fenómenos naturales como manifestación de procesos dinámicos que ocurren en la superficie terrestre, o los inducidos por la geodiversidad, pueden transformarse en desastres en la medida en que no conozcamos adecuadamente la amenaza que representan para nosotros estos eventos, así como la susceptibilidad que tiene el entorno ante éstos. (Guash, 1992). Muchos autores en las últimas décadas han profundizado en estos aspectos relacionados con los fenómenos naturales y desastres, concluyendo la mayoría de ellos que cada día el hombre es más responsable de las situaciones que se presentan; y que la terminología “Desastres Naturales”, que aún se utiliza, no debe ser interpretada como si los fenómenos fueran la causa o génesis del problema, sino en todo caso, constituyen un factor catalizador del proceso que culmina en el Desastre.(BURTON, 1968); (Campos, 2000); (Maskrey, 1994);(Cardona, 1996); (Cardona, 1999); (Lavell, 1996).

La mayoría de los científicos consideran la geología aplicada a la ingeniería como una de las ciencias de carácter geológico, orientada, en su aspecto aplicativo, a apreciar las condiciones de asimilación económica de territorios, incluidas la construcción y la explotación de obras, así como a considerar la influencia de tal asimilación sobre el medio geológico.

Además de la característica cualitativa de las condiciones de construcción o de explotación de un determinado yacimiento, la geología aplicada a la ingeniería ha de proporcionar la confirmación cuantitativa de la elegida variante de emplazamiento y la estimación de la estabilidad de la edificación o de un talud en el Frente de Explotación en una determinada cantera.

La mecánica de los suelos y rocas representa una de las partes de la mecánica. Su destino principal consiste, como señalaba V. A. Florín, en la obtención de valores

numéricos de los desplazamientos verticales y horizontales de las construcciones, en la evaluación numérica de la estabilidad y la resistencia de las bases de estas últimas, así como de los taludes naturales y artificiales. Donde la solución de estos problemas se resuelven aplicando métodos matemáticos que permiten representar los resultados en forma cuantitativa.

Al mismo tiempo, la mecánica de los suelos y rocas utiliza para los cálculos los datos obtenidos por métodos técnico-geológicos, mediante la esquematización de estos datos con arreglo a las posibilidades de distintos esquemas de cálculo. Para la resolución de sus problemas, la geología aplicada a la ingeniería examina el mismo objeto de una forma mucho más detallada.

La presente investigación se realiza en el entorno que forma parte la política ambiental de la Empresa de Servicios Mineros-Geológicos EXPLOMAT y la Empresa Materiales de Construcción Holguín, de aplicar el conocimiento teórico en la resolución de problemas prácticos en el medio del cual se desarrollan.

Como consecuencia de las motivaciones económicas de desarrollo en los países, los procesos industriales han generado un desequilibrio ambiental que se expresa principalmente un cambio climático global, por lo que 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 el proceso de desarrollo económico ha generado un cierto grado de vulnerabilidad, aumentando los riesgos derivados de las distintas actividades socioeconómicas. Bajo estas condiciones geoambientales, los deslizamientos constituyen un peligro geológico. Por lo general estos tienen lugar en zonas montañosas de difícil acceso, así como en zonas industriales de desarrollo minero en las cuales dicho proceso no se realiza de la forma requerida. El presente trabajo titulado: ***“Evaluación de la susceptibilidad geotécnica en la Cantera para áridos Rubén Rodríguez”*** pretende constituir con sus resultados una herramienta para contribuir a la disminución y prevención de pérdidas humanas y económicas, así como servir de apoyo para una mejor planificación de cualquier estrategia futura en dicho yacimiento.

La amplia difusión y desarrollo de los diversos procesos y fenómenos geológicos marcan la necesidad de proteger los territorios, la vida y actividad humana contra su manifestación espontánea, nociva, peligrosa y, a veces, catastróficas, así como de

pronosticarlo. La geodinámica aplicada a la ingeniería, que es la parte más complicada y a su vez interesante de la geología aplicada a la ingeniería, estudia y soluciona los problemas y cuestiones vinculados con dichos procesos y fenómenos. Tales como la construcción de obras de ingeniería en condiciones geológicas especiales, elaborar los fundamentos teóricos de protección de los territorios y pronosticar los procesos y fenómenos geológicos.(Lomtadze, 1977). A raíz de lo abordado surge:

Problema científico.

Necesidad de conocer y establecer los indicadores geotécnicos que contribuyen a la estabilidad del macizo rocoso para la explotación racional de las canteras y la estabilidad de los taludes en ellas.

Objeto.

La presente investigación se enmarca en la cantera de materiales de construcción Rubén Rodríguez del municipio Mayarí, provincia de Holguín.

Objetivos generales.

Valorar el comportamiento geotécnico en la “cantera de piedra” del municipio Mayarí, provincia de Holguín y su incidencia en la estabilidad de explotación, caracterizando las condiciones ingeniero geológicos e implementando un sistema de indicadores que permitan un estudio de la estabilidad en los cortes y el medio.

Objetivos específicos

- ✓ Elaborar un procedimiento geotécnico de evaluación de las rocas en las canteras de piedra como vías para alcanzar una estabilización de los cortes y bancos de explotación.
- ✓ Determinar la influencia del macizo rocoso y los grupos lito-estructurales, condiciones estructurales y geotécnicas, el uso actual y su incidencia en el surgimiento y desarrollo de deslizamientos.
- ✓ Obtener el mapa de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en las canteras de piedras para materiales de construcción en la provincia de Holguín.

Hipótesis.

De conocerse el comportamiento de las propiedades físico mecánicas y las causas de los diferentes tipos de fallas en los taludes de la cantera de piedra podemos alcanzar una mejor eficiencia en el proceso de explotación en el yacimiento y la estabilidad de los taludes en los frentes de canteras.

Novedad científica

- Se establece los patrones de voladuras a partir de los indicadores geodinámicos en los frentes de explotación de las canteras para materiales de construcción.
- Se crea una nueva metodología para investigaciones geotécnicas en las canteras para materiales de construcción. Procedimiento de estudio geotécnico en canteras de piedra, el cálculo y su estabilidad en la explotación responsable de macizo.
- Se genera un nuevo sistema de indicadores geodinámicos que inciden en la inestabilidad de las Canteras de materiales de construcción.
- Obtención de un mapa de susceptibilidad del terreno frente al desarrollo de deslizamientos con la aplicación de los Sistemas de Información Geográficas.

Tareas de investigación

Capítulo. 1. Marco teórico conceptual de la investigación.

- ✓ Base teórica.
- ✓ Métodos de estimación de la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de deslizamientos.
- ✓ Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la cartografía de la susceptibilidad por deslizamientos.
- ✓ La Cartografía de susceptibilidad por deslizamientos en Cuba.

Capítulo. 2. Caracterización de los escenarios ingeniero geológico.

- ✓ Análisis de la evolución geográfica y climática de los objetos de estudios.
- ✓ Análisis de la evolución geológica en los yacimientos estudiados.
- ✓ Análisis de las condiciones geodinámicas en el escenario ingeniero geológico.

Capítulo. 3. Metodología para la reducción de riesgos por deslizamientos de taludes en la Cantera Rubén Rodríguez del municipio Mayarí en la provincia Holguín.

- ✓ Criterios de inestabilidad.
- ✓ Factores condicionantes a la susceptibilidad del terreno frente a deslizamientos.
- ✓ Metodología para una valoración de la susceptibilidad del terreno por el desarrollo de deslizamientos.

Capítulo. 4. Evaluación de la susceptibilidad del terreno por deslizamientos en taludes.

- ✓ Descripción y cartografía de los deslizamientos.
- ✓ Clasificación de los deslizamientos.
- ✓ Descripción de los factores que intervienen en el surgimiento de inestabilidades.
- ✓ Valoración y reclasificación de los planos de factores condicionantes.
- ✓ Descripción del plano de susceptibilidad.

Para la elaboración de esta investigación se emplearon diferentes tipos de métodos (C. Homero Fuente, 2005), tales como **métodos conceptuales**: en el momento donde se hace alusión conceptos significativos en el tratamiento de la temática abordada durante la investigación. Presente en el Capítulo I además de la parte introductoria de esta tesis. **Método histórico-lógico**: se concreta en el Capítulo I al estudiar el origen e historicidad de los desastres y en el Capítulo III con el estudio de los escenarios y la formulación de la Metodología. **Método de Observación**: la observación, la medición directa del objeto de estudio y del comportamiento de sus elementos componentes, unido a la experiencia personal, facilitó recuperar la información y profundizar en el problema planteado. **Método de análisis y síntesis**: resultó un método valioso para el dimensionamiento del objeto de estudio y la base de los capítulos dos y tres, para lograr a partir del análisis de situaciones una buena caracterización del medio geólogo-geotécnico y sintetizar en una metodología de investigación. **Método de inducción y deducción**: está presente al abordar los capítulos tres y cuatro, en el enfoque de los estudios de escenarios y en la evaluación de los resultados de las intervenciones especialmente en el ámbito geotécnico. **Método de campo**: fueron realizados mediciones de grietas así como descripciones geológicas en los macizos rocosos estudiados, en los cuales, se ubicaron geográfica mediante GPS y se tomaron fotografías y muestras también. Durante el **método de laboratorio**: se sometieron todas las muestras a ensayos mecánicos y físicos, este método se muestra en el capítulo IV. En el último capítulo y en el capítulo II se aplica **métodos de modelos geológicos**: el cual es tratado donde se reúnen todos los

datos obtenidos y se confeccionan mapas geológicos, geotécnicos y de susceptibilidad del terreno. **Métodos matemáticos:** presente en el Capítulo IV en el momento de efectuar los distintos cálculos para encontrar variables definitorias en la estabilidad de un determinado Talud.

Para cometer el diseño de las canteras es necesario contar con un volumen de información que caractericen el macizo rocoso y su comportamiento en el tiempo para tomar decisiones en el diseño de los proyectos de explotación con la finalidad de garantizar la estabilidad en los frentes de explotación y racionalizar la economía de su explotación.

Estructura y contenido de la tesis

La tesis cuenta con cuatro capítulos, todos ellos en correspondencia con los objetivos planteados.

Capítulo 1. Se ofrece una fundamentación teórica y conceptual, del estado del arte el cual nos permite obtener un conocimiento de los diferentes enfoques que inciden en la explotación racional de las canteras empleando indicadores geomecánicos que contribuyen al cálculo de taludes con la finalidad de alcanzar la estabilidad de los mismos y al mismo tiempo nos permiten establecer criterios de estabilidad.

Capítulo 2. Además de conocer la evolución histórica de la Geología, se brinda la caracterización geomecánica de las diferentes canteras que se encuentra en explotación en la provincia de Holguín enfatizándose en las condiciones ingeniero geológica y geotécnicas del medio geológico.

Capítulo 3. Se desarrolla un procedimiento que nos permite establecer los elementos metodológicos fundamentales y necesarios para el conocimiento y determinación de los diferentes indicadores geomecánicos que intervienen en la estabilidad del macizo rocoso y de las rocas que los componen.

Capítulo 4. En este capítulo aparecen la validación de la metodología propuesta y la interpretación de los datos obtenidos en campo y laboratorio así como los distintos cálculos de estabilidad de los taludes en los frentes de canteras estudiados en esta investigación.

Con los logros obtenidos en esta investigación hemos de catalogar que ha tenido incidencias en varios renglones de vital importancia para el desarrollo sostenible, y a

la vez, sustentables en nuestro país. Manteniendo como norte los lineamientos aprobados en el Sexto Congreso del PCC en abril de 2011 en La Habana. Estos impactos se mencionan a continuación teniendo una estrecha y marcada relación uno con otro.

Impactos económicos

El conocimiento del medio geológico y geotécnico permite tener en cuenta los parámetros geodinámicos para los cuales son estables los taludes que conforman los macizos rocosos en los Frentes de Explotación en las Canteras contribuyendo a racionalizar los recursos imprescindibles para la concretación de las misiones y objetivos de una entidad estatal.

Por ejemplo, ¿qué sucedería si además de ejecutar las voladuras planificadas se realizaran voladuras secundarias que no son necesarias incluirlas en la planificación? Durante la realización del proceso de voladura la empresa de EXPLOMAT incurre un gasto por importaciones de 20 000 Dólares mensuales en explosivos y medios para una Empresa Estatal Socialista de Base. A este gasto se le suma el consumo de combustible que se incurre en el proceso de barrenación y el salario de todos los implicados. Incurriendo de forma negativa en el cumplimiento del Plan Productivo de la Empresa ya mencionada; al sobregirarse cada uno de los indicadores mencionados esta empresa ¿estaría cumpliendo con los lineamientos aprobados en el VI Congreso Del PCC? La respuesta de estas interrogantes está implícita en el conocimiento del medio geológico y de esta forma las labores mineras sean concretas y mucho más racionales.

Otro aporte económico es el capital ingresado por la venta de esta investigación como Proyecto, pues teniendo en cuenta el período que abarca la investigación así como los trabajos ejecutados para la conclusión de la misma. Según (Precios, 2005), asciende a 31 860.34 pesos en Moneda Nacional.

Impacto ambiental

En Cuba, los problemas ambientales no son tan significativos como el resto del mundo, pero sí está claro que ha ido en franco ascenso, producto al crecimiento económico que no ha tenido en cuenta de forma adecuada la protección del medio ambiente

Además, la interdependencia economía-ecología tiene una dimensión global, transnacional, lo que obliga llevar a cabo un conjunto de actuaciones que no pueden ser aisladas ni locales.

El Medio Ambiente es fuente de recursos que abastece al ser humano de materias primas y energía que necesita para su desarrollo sobre el planeta. Ahora bien, sólo una parte de estos recursos es renovable y se requiere, por tanto, un tratamiento cuidadoso para evitar que un uso anárquico de aquellos nos conduzca a una situación irreversible.

Las acciones humanas afectan de manera ostensible a multitudes de ecosistemas, modificando con ello la evolución natural del área dañada.

Puede que todo el problema radique en una educación medio ambiental deficiente a todos los niveles (Novo, 1988). No debe ceñirse el esfuerzo didáctico, únicamente a los profesionales dedicados a temas de este tipo, sino que se debería crear un ambiente educativo desde el medio escolar hasta la vida profesional y social en cualquiera de sus aristas, buscando una integración de lo ambiental en la enseñanza técnica y profesional de toda índole.

Dentro de este marco se encuentra Explomat, una Empresa dedicada a prestar servicios mineros-geológicos en nuestro país y más allá de sus fronteras, además de realizar proyectos geológicos y mineros para una explotación de los yacimientos no metálicos de manera racional, también se encarga de ejercer el arranque de las materias primas en nuestras canteras a partir de voladuras, que en conjunto a la barrenación constituye un proceso que impacta negativamente el medio ambiente. Pues, el completamiento de su ejecución trae a la atmósfera un alto contenido de polvo y en el momento de la voladura de gases tóxicos, así como otros daños como es la propagación de ondas sísmicas a través del medio geológico provocando así nuevas grietas y fallas y de esta manera la destrucción de la morfología del terreno.

El alcance ambiental de la tesis consiste en lograr los objetivos trazados para lograr una solución al problema planteado. Ya que persiguen mitigar o minimizar estos problemas ambientales, que afectan tanto a la humanidad como el entorno natural, al eliminar todas aquellas voladuras secundarias que se realizan porque el proceso primario dejó piedras sobre medida, repiés o simplemente el tiro quedó colgado. Con la eliminación de estos focos contaminantes se contribuye a una integración

paisajística de los yacimientos al entorno. Recuperación gradual de los ecosistemas del área y la protección de las reservas almacenadas para su futura explotación.

Impacto social

Poner en práctica la presente investigación trae consigo el incremento de la calidad de vida de las comunidades del entorno, además de una mitigación de riesgos que amenazan la comunidad del entorno, a la vez define la tecnología para mitigar los riesgos por deslizamientos en los distintos niveles de explotación que existen en las canteras investigadas.

Para quienes se encuentran en estrecha relación también es una satisfacción que todos los técnicos que contribuyen a una explotación racional de estos recursos apliquen en buena medida los conocimientos geológicos puestos de manifiesto en cada cantera del territorio, pues, el cumplimiento de la producción se abarata, la calidad de salud de estos obreros aumenta al igual que su salario al tener en cuenta que el sistema de pago está directamente relacionado con el sobre cumplimiento del plan productivo.

Impacto tecnológico

Todo capital humano que tenga a su favor el conocimiento en este caso el dominio geológico para la explotación racional de los recursos naturales obtiene en mayor medida a una mejor eficiencia en los resultados alcanzados. Pues al conocer el medio geológico donde labora sabe cuáles son los recursos tecnológicos que se debe usar y para la obtención del producto liberado. Además, dominará como emplearlos y garantizará una convivencia armoniosa con el medio ambiente más un uso adecuado de los equipos tecnológicos empleados.

Capítulo 1. Marco teórico conceptual de la investigación.

1.1. Base teórica

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. Autores como Crozier, 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.

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, calizas muy estratificadas, rocas muy agrietadas.)
- 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) ; (J., 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, 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:

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

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

Donde:

τ : esfuerzo de resistencia la 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: $\sigma' \text{ (presión efectiva)} = \sigma - \mu$

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, 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, 1976).

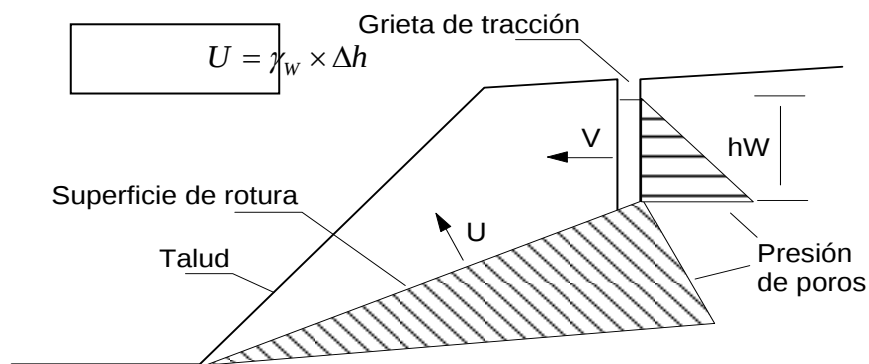


Figura 1.1. Presión de poros sobre una superficie de rotura potencial.

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].

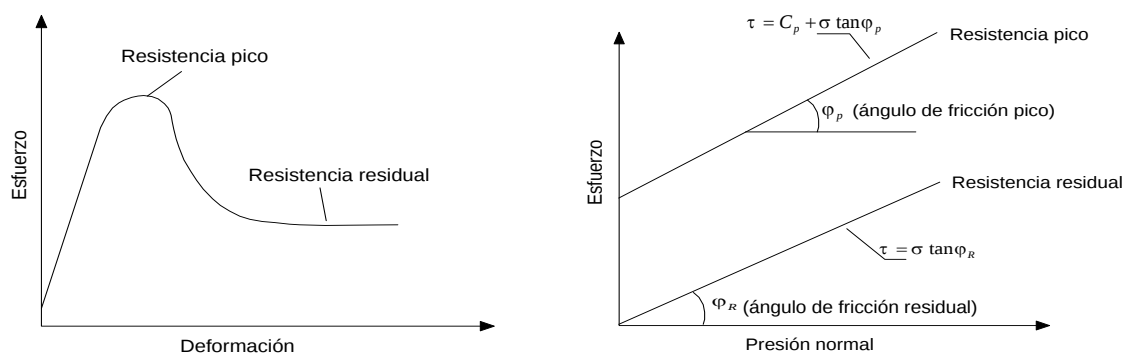


Figura 1.2. Diagrama de esfuerzo-deformación. Resistencia máxima y residual.

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.

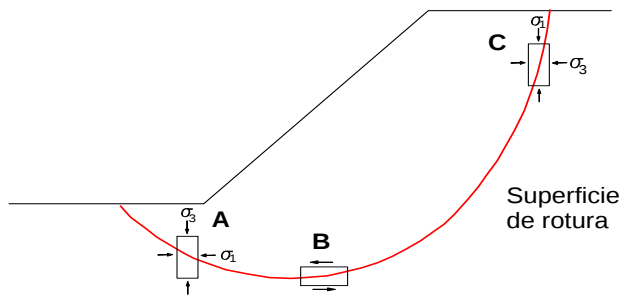


Figura 1.3. Dirección de esfuerzos principales en la rotura de un talud.

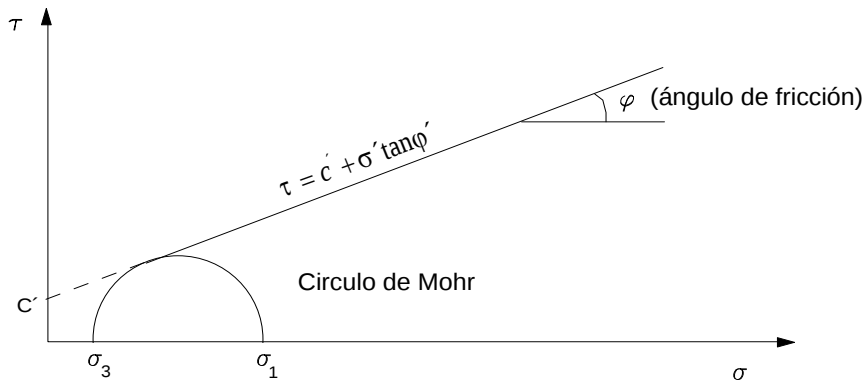


Figura 1.4. Envolvente de rotura y círculo de Mohr.

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], definido por la ecuación: $\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$

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 desencadenan miles de deslizamientos a lo largo de áreas de más de 100.000 km² (Keefer, 1984). Las actividades humanas alteran el equilibrio de las laderas debido a cargas estáticas, provocadas por construcciones de edificios, construcciones de taludes para vías de comunicación, explotaciones mineras y construcciones de presas. Asimismo los cambios en el recubrimiento vegetal como la tala de bosques,

la repoblación con especies alóctonas e incendios forestales también influyen en la estabilidad de las laderas.

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); (Virberg, 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).

1.2. 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); (Virberg, 1988); (Corominas, 1987); (Corominas, 1992); (Westen, 1993); (Westen, 1994); (Carrara, y otros, 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 en 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 (Westen, 1993). El método más usual se aplica para deslizamientos traslacionales utilizando el modelo de talud infinito (Ward, y otros, 1982); (Brass, y otros, 1989); (Vita-Finzi, 1991). Estos métodos generalmente requieren el uso de modelos de simulación del agua subterránea (Okimura, y otros, 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, y otros, 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, 1977); (Stevenson, 1997); (Bozi, 1984). Estos métodos permiten la regionalización o estudio a escala regional y son adecuados para aplicaciones en el campo de los sistemas expertos (Carrara, y otros, 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, y otros, 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, 1993); (Chung, 1994). Los resultados se interpretan en términos de probabilidad según el teorema de Bayes (Morgan, 1968); (Chung, 1994), certeza (Heckerman, 1986); (Luzi, 1995), según conjuntos difusos (Zadeh, 1978)(Zadeh, 1965); (Mahdivfar, 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, y otros, 1972) considerado como el primer análisis cuantitativo de susceptibilidad a deslizamientos y su

modificado (Irigaray, 1990), el modelo del valor de información (K.L Yin, 1988); (Kobashi, 1991); (Irigaray, 1995), el modelo de mensaje lógico (Runqiu, 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, y otros, 1995); (Dhokal, y otros, 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 (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 (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, 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 (Rangers, y otros, 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); (Rangers, y otros, 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) (Rangers, y otros, 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 (Rangers, y otros, 1992). Los métodos estadísticos de análisis de susceptibilidad son apropiados para esta escala (Mulder, 1991); (Dhakal, y otros, 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)

(Rangers, y otros, 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, 1990); (Carrara, y otros, 1991); (Niemann, y otros, 1991); (López, 1991); (Westen, 1993); (Naranjo, y otros, 1994); (Carrara, y otros, 1995); (Chung, y otros, 1995); (Nagaranjan, y otros, 1998); (Borga, y otros, 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.

1.3. Los Sistemas de Información Geográficos (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 (Cebrian, 1986); (Burrough, 1988); (Bracken, 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 *ráster*, 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 (Westen, 1994).

1.4. 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, y otros, 1978), (Carrara, y otros, 1978); (Huma, 1978) y (Radbruch-Hall, y otros, 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, y otros, 1989), y ejemplos de análisis estadístico multivariante se pueden encontrar en (Carrara, 1983 a); (Carrara, 1983b); (Carrara, 1988) 1988) y (Bernknopf, y otros, 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, y otros, 1992); (Azate, 1992); (López, 1991); (Choubey, y otros, 1990); (Carrara, y otros, 1990); (Carrara, y otros, 1991); (Chacon, y otros, 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 *ráster*). 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, y otros, 1991), (Carrara, y otros, 1995); (Niemann, y otros, 1991); (Campus, y otros, 2000); (Dhakal, y otros, 2000); (Feizna, 2000); (J.A.Zêzere, y otros, 2000); (Thurston, 2000), análisis para modelizar distancias recorridas por caída de bloques (Westen, y otros, 1990) y análisis para definir la susceptibilidad de alcance por deslizamientos de tipo *debrisflow* (Michel-Leiva, y otros, 2000).

El uso de un SIG también permite reconstruir la topografía previa al deslizamiento como han demostrado (Thurston, 2000). Es posible además, realizar la zonificación del peligro de desplazamiento de un gran deslizamiento, llevado a cabo en China por (Wu, y otros, 2000), utilizando un Sistema de Análisis de Información (Yin, 1987); (Yin, 1988). También los modelos determinísticos han experimentado un auge utilizando SIG (Brass, y otros, 1989); (Vita-Finzi, 1991); (Hammond, y otros, 1992); (Luzi, 1995); (Pergalini, y otros, 1996); (Leroi, 1996). (Lee, y otros, 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.

1.5. Análisis histórico de la cartografía de susceptibilidad del terreno por el desarrollo de deslizamientos.

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, 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. (W.Rodríguez, y otros, 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, 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 aero-geofísicos 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, y otros, 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.

(Ulloa, y otros, 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, y otros, 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, y otros, 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 desastrepotencial, 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, y otros, 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, 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, y otros, 2005) 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, y otros, 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, 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, y otros, 2005) presentan un mapa susceptibilidad a los deslizamientos de Cuba a escala 1:250 000, donde precisan las áreas más propensas a este fenómeno a lo largo del territorio nacional, utilizando como factores condicionantes la pendiente del relieve topográfico, composición de las rocas y/o suelos, condiciones tectónicas, el efecto antrópico (densidad de población y densidad de carreteras y caminos) y el régimen de precipitaciones. (Racamora, 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, 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, y otros, 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, 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, solo que esta evaluación 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, 1998), 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 (Departamento 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, 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, 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.

1.6. Recientes trabajos de cartografía por susceptibilidad del terreno frente al desarrollo de deslizamientos.

(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 ráster (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, y otros, 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, y otros, 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, 2004), realiza una investigación sobre los factores efectivos en la ocurrencia de deslizamientos. Para esto hace uso de mapas tales como MDE, pendiente, pluviometría, litología, uso del suelo, distancia de las carreteras, de las fallas y de la red hidrográfica. Cada factor fue analizado con respecto al mapa de deslizamientos. El método utilizado para determinar el peso de las clases de cada factor está basado en el análisis probabilístico condicional.

(Morton, y otros, 2003), presentan un trabajo sobre un mapa preliminar de susceptibilidad a deslizamientos donde analizan varios factores como la pluviometría, las 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 biomasa 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 otros, 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.

(Chang, y otros, 2005), presentan un análisis de amenaza de deslizamientos en Hong Kong empleando datos históricos de deslizamientos acoplados 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.

(Shinha, y otros, 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, parte de aguas, carreteras, alineamientos tectónicos y el relieve. Los mapas se trabajaron en formato ráster 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.

1.7. 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, y otros, 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, y otros,

1996). En las últimas décadas diversos autores han utilizado imágenes de sensores remotos (LANDSAT I, SPOT, etc.) para identificar movimientos de masa (Scanvich, y otros, 1990), aunque en todos estos casos los deslizamientos no son reconocidos individualmente a partir de las imágenes, sino 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, y otros, 1982).

Reconstrucción de la topografía previa al deslizamiento: (Thurston, 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. 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 otros, 1995); (Siriwardane, y otros, 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, y otros, 1996) en dos deslizamientos de Suiza y Francia. (Vulliet, y otros, 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.

Capítulo 2. Caracterización de los escenarios ingeniero geológicos.

2.1. Generalidades

La Empresa de Materiales de Construcción perteneciente a la provincia de Holguín es concesionaria de cinco yacimientos no metálicos. Este trabajo se centra en solo uno de ellos: Yacimiento Pílon el cual se ubica en el municipio Mayarí en la provincia de Holguín, al este del poblado de Mayarí a unos 7 Km y a 1 Km de la carretera Mayarí - Nicaro. Como lo demuestra la Figura 2.1.

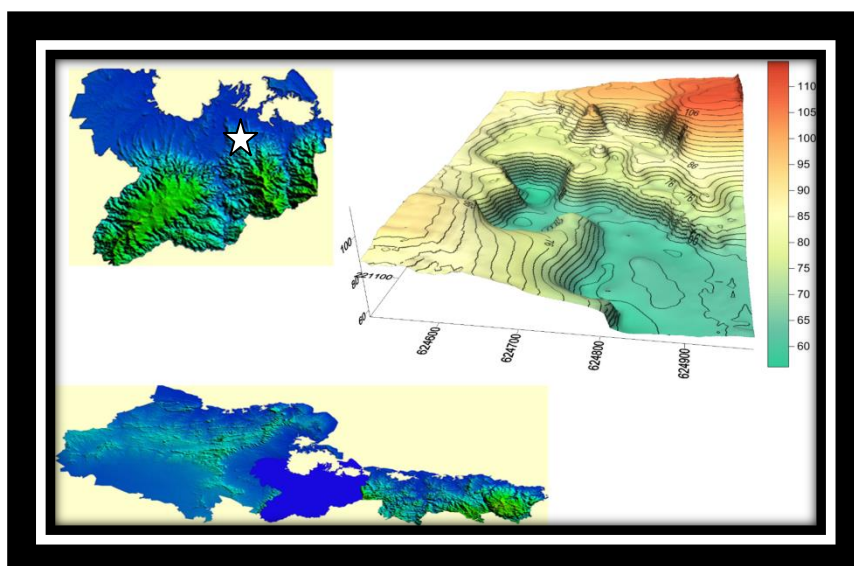


Figura 2.1. Ubicación geográfica de la Cantera "Rubén Vázquez".

La cantera Rubén Rodríguez o Pílon como también se le conoce presenta un relieve original el cual fue modificado por las acciones de explotación, actualmente son niveles de explanación que interceptan los frentes de explotación aproximadamente en las cotas 60, 70 y 80 m. La máxima elevación está al SE con 137.6 m de altura. Se puede considerar como de colinas suaves, cuyas cotas absolutas oscilan desde + 100 la mayor y + 25 las menores, ubicándose en las inmediaciones del Grupo montañoso Nipe-Sierra Cristal. (Anexo 1. Foto 1).

El Yacimiento está limitado por dos arroyos; uno al Norte que corre en dirección E-W y el otro al Sur Sureste. Ambos tributan sus aguas al arroyo El Polo que a su vez es tributario de los ríos Ceiba y Mayarí.

El clima en esta parte geográfica se comporta como sigue según datos de la Estación meteorológica Punta Lucrecia, el clima es tropical, con verano relativamente húmedo, formando parte de las llanuras y alturas con humedecimiento estacional relativamente estable, alta evaporación, altas temperaturas y vientos variables con influencia estacional.

La temperatura media anual del aire oscila entre 24 y 26° C, con variaciones en verano (26 – 28° C) e invierno (22 - 24° C). Entre 100 y 150 días del año las temperaturas se mantienen por debajo de los 25° C.

Las precipitaciones medias anuales en el territorio oscilan entre los 1000 y 1200 mm, con promedio más elevados en el período Mayo – Octubre, mientras que los más bajos se presentan de Noviembre hasta Abril. Los rasgos de bienestar térmico varían en dependencia de la estación del año de ligeramente frío en invierno (16 – 18° C) y confortable en verano (18 – 22° C). La dirección del viento predominante es del Este, con valores máximos de 54 Km/h.

La economía de la región, se sustenta en la minería (yacimientos ferro níquelíferos) y en cultivos varios y frutos menores. La ciudad de Mayarí, cabecera del municipio, basa su economía en la actividad de servicios y en la industria ligera fundamentalmente. Los cultivos de la zona son fundamentalmente frutos menores y potreros, los bosques están más o menos desarrollados. Se componen de árboles maderables y arbustos.

En la actualidad el municipio ha intensificado el movimiento agropecuario especialmente en la siembra y cosecha de granos como por ejemplo arroz, frijoles, maní y por otra parte de Nim; este último para convertirlo con la ayuda de una Fábrica de procesamientos químicos situada en la zona de Guaro en herbicidas más otros químicos que ayudan al buen crecimiento de las plantas.

2.2. Evolución geológica de los yacimientos

✓ Evolución geológica regional.

Cuba está situada en el extremo noroccidental del Mar Caribe, justo a la entrada del Golfo de México, formando parte de las Antillas Mayores. El archipiélago cubano es de origen volcánico, aunque actualmente constituye un cinturón plegado acrecionado al margen meridional de la Placa Norteamericana. Las características geológicas del territorio cubano son el resultado de una historia muy compleja, representada por una serie de secuencias y estructuras relacionadas estrechamente a la evolución del Caribe Occidental. En respuesta a este contexto se encuentra la provincia de Holguín en nuestro territorio nacional. La geología en la parte oriental de la provincia se vincula 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 sobre corrimiento, en el borde pasivo de la Plataforma de Bahamas. Mientras que para la zona occidental de la mencionada provincia prevalecen cuencas sedimentarias y en algunos casos calcáreas, debido a la poca actividad tectónica desarrollada en esta porción geográfica. Destacando la intrusión granodiorítica que se extiende desde la provincia de Camagüey hasta Las Tunas con los extremos más orientales en la ciudad de Holguín y el municipio de Gibara. Bajo este escenario se encuentra la cantera Pílon.

✓ Evolución geológica del yacimiento.

• Cantera Pílon

El basamento geológico donde está comprendida la cantera Rubén Vázquez en la localidad de Pílon, pertenece a la Fm Bitirí. (Oligoceno superior – Mioceno inferior parte baja), corresponden a una secuencia de composición carbonatada que se distribuye formando una faja estrecha encorvada irregularmente de disposición sinoide, cuyos afloramientos se extienden desde las cercanías de Jiguaní hasta Nicaro, bordeando por su parte meridional al segmento Norte de la estructura Bahía de Nipe-Guacanayabo. (Anexo 1. Figura 1)

Está constituida por calizas organodetríticas color blanco, aunque su coloración varía desde amarillento a un carmelita claro, de granos medios a finos, bien

estratificados con alteraciones de estratos medios [10-20 cms] con estratos gruesos. Las calizas se encuentran muy carsificadas superiormente y pueden contener inclusiones de origen tobáceo, se intemperizan con tonos grisáceos y carmelitosos.

Yace discordantemente sobre las formaciones Charco Redondo, Mucaral y San Luis. Es cubierta discordantemente por la Fm. Río Jagüeyes y la cobertura aluvial cuaternaria. Lateralmente transicional a las calizas algáceas de la Fm. Camazán.

En el área de estudio se determinaron las siguientes capas:

Capa 1: Caliza estratificada de color blanco crema con tonalidades amarillentas. Posee resistencia media, es compacta, de grano fino y en los planos de estratificación a veces se observa un material arcilloso carbonatado, de color gris verdoso. Constituye la secuencia inferior del corte estratigráfico del yacimiento.

Capa 2: Caliza organodetrítica de color blanco crema hasta rosado claro, presenta oquedades cársticas de diferentes dimensiones, y grietas rellenas de óxidos de hierro y de calcita. Exhibe una estructura masiva, en gran parte con textura brechosa y de resistencia media; es la variedad más extendida en el yacimiento, que ocasionalmente se presenta recrystalizada y marmolizada. La resistencia a la compresión de las calizas de esta capa disminuye en ocasiones, debido a roturas de las muestras por planos de agrietamiento durante el proceso de ensayo.

Capa 3: Caliza organógena de color blanco rosáceo, con manchas amarillentas, presenta abundantes restos fósiles de corales y conchas de bivalvos. Se observa muy porosa con abundantes oquedades cársticas; generalmente es masiva y de resistencia baja. En algunos intervalos se alterna con una caliza margosa al parecer estratificada.

Las serpentinitas conforman el basamento de la secuencia carbonatada, con relaciones tectónicas evidentes entre ellas. Éstas poseen un color verdoso, están agrietadas y muchas veces rellenas de calcita.

- **Intemperismo**

Se presenta muy extendido, como resultado de la meteorización se forman los suelos finos de colores blanco (corteza eluvial) y rojizo (suelos tipo rendzina roja).

- Carso

Su manifestación es extensa tanto superficial como subterráneo.

El carso superficial en las condiciones actuales se distribuye solo en zonas que no han sido explotadas y se manifiesta como diente de perro o lapiés, aunque se observan huellas de carsificación en forma de pequeñas oquedades.

Durante la documentación en los recorridos efectuados se pudo constatar el gran desarrollo que presenta el carso en profundidad. Oquedades cársticas de diferentes dimensiones dan paso a macro estructuras como la determinada en la cala 1 (10.50 a 17.70 m, estando rellena hasta los 14.10 m), según (Iglesias, y otros, 2010) además en varias zonas del yacimiento son visibles cavernas de grandes dimensiones, desarrollándose fundamentalmente en la zona central de la cantera adyacente a la zona del Bloque Medido I. (Figura 2.2)



Figura 2.2. Cavernosidad en el Frente de Explotación al Norte y Este respectivamente en la cota 50.

Tectónica

Hacia la zona Este y Norte del yacimiento, estas rocas contactan tectónicamente con cuerpos de serpentinitas, en los cuales se observan zonas de intensa brechosidad y agrietamiento en ambas litologías (Figura 2.3). Los ángulos de inclinación en los contactos se encuentran próximos a 30° .

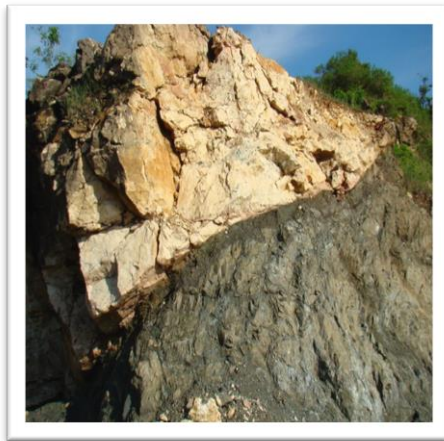


Figura 2.3. Contacto entre las calizas de la Fm Bitirí (encima) y las serpentinitas (debajo), ambas fuertemente tectonizadas.

2.3. Análisis de las condiciones geodinámicas en el escenario ingeniero geológico.

- ***Agrietamiento.***

En el estudio del agrietamiento se midieron un total de 2860 elementos de yacencia entre 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.

Al realizar mediciones estructurales en el yacimiento Pilón, se obtienen como resultado la presencia de varias estructuras. Las primarias están representadas por los estratos de las rocas carbonatadas, con yacencia horizontal o sub-horizontales y un ligero buzamiento hacia el sureste. Los elementos de yacencia tienen un valor de $118^{\circ}/06^{\circ}$.

Las estructuras secundarias están representadas por tres familias de grietas (Tabla 2.2), que presentan altos buzamientos superiores a 45° , como es el caso de la familia 2, y verticales o sub-verticales, como el caso de las familias 1 y 3 (Figura 2.4). La intercepción de estas familias con las superficies de los estratos le confiere una estructura en bloques al yacimiento; su tamaño está condicionado al espaciamiento de las grietas y la potencia de las capas. En relación a los rumbos de las estructuras, existe un predominio de direcciones norte-sur (Figura 2.5).

Tabla 2.2 Yacencia de estructuras en el yacimiento Pilón.

Estructura	Familia de grieta	Acimut de buzamiento	Buzamiento
Estratos	-	118	6
Grietas	1	68	85
Grietas	2	86	59
Grietas	3	193	90

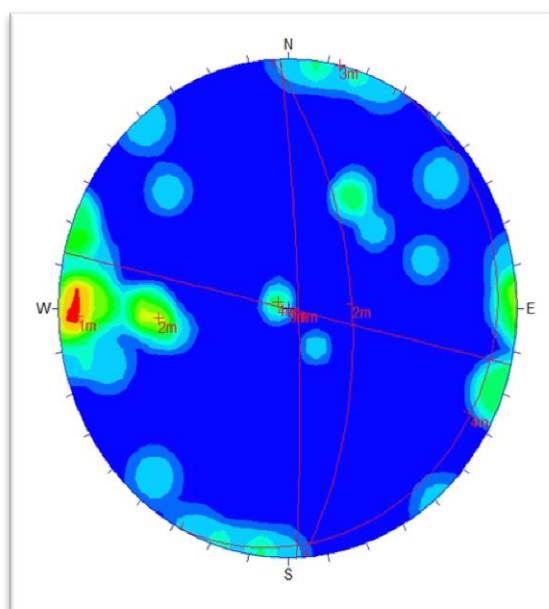


Figura 2.4. Diagrama de contorno y planos del agrietamiento en el Yacimiento Pilón.

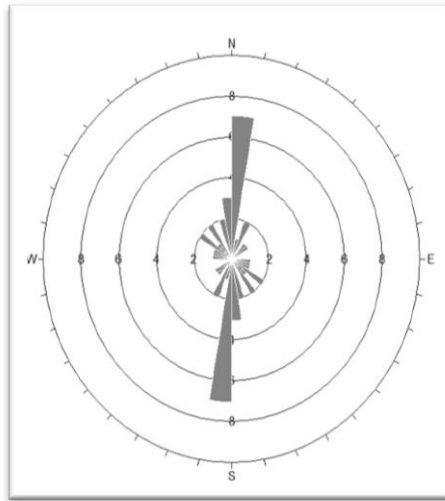


Figura 2.5 Diagrama de rosetas del agrietamiento en el Yacimiento Pilón.

- *Procesos geodinámicos y antrópicos.*

a) Meteorización.

Es el fenómeno físico-geológico más importante en el área de estudio. Está vinculado con las arcillas que rellenan las cavernas existentes. 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 los Frentes de Explotación, están condicionados por las características estructurales del macizo rocoso, aunque en las zonas de desarrollo minero, las condiciones geotécnicas de los materiales inciden con más fuerza sobre el tipo de movimiento. Las propias condiciones creadas como alta humedad, granulometría muy fina, altos contenidos de minerales arcillosos, baja permeabilidad, así como la intensa actividad sismo-tectónica en el área 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 Pílon. Es un proceso que se ha visto incrementado por la actividad antrópicas, vinculada a la minería a cielo abierto y a la deforestación. La erosión laminar, que se desarrolla sobre la superficie de las rocas y el suelo formado en la parte más alta de la cantera arrastra las partículas fundamentalmente hacia la zona este-sureste del yacimiento, donde el relieve es menos elevado, además de dirigirse hacia los cauces de los drenes naturales representados por el río La Ceiba.

d) Actividad antrópicas.

La actividad antrópicas desarrollada en el yacimiento está 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 los materiales útiles, 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. 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 de los yacimientos, caracterizadas por la presencia, en superficie de agrietamiento relíctico, grietas rellenas con arcillas formadas por descomposición gracias a la disolución de las calizas, y en menor grado por minerales carbonatados, y por la presencia de un substrato cavernoso, se convierten en factores condicionales para el desarrollo procesos erosivos y de deslizamientos.

- ✓ El mecanismo de rotura propuesto a pesar de ser el más idóneo no está en correspondencia con la complejidad geológica imperante en los frentes de explotación en cada Yacimiento. Según el estudio de agrietamiento realizado en ambas canteras evidencian que a pesar que estas rocas se fragmentan en bloques dependiendo del espaciamiento entre las familias de grietas y la potencia de las capas, el rumbo del eje central de las voladuras es paralelo al rumbo del agrietamiento. Sucediendo una fuga de los gases en el momento de la explosión y por tanto ocurre una mala ejecución del proceso barrenación-voladura.

Capítulo 3. Metodología para la reducción de riesgos por deslizamientos de taludes en la Cantera Rubén Vázquez.

3.1. 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 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.

3.2. Criterios de inestabilidad.

Cada superficie de rotura 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, 1976); (Lomtatze, 1977). En este caso el factor de seguridad será menos que uno, es decir:

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

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, des compactar, 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 micro sísmico y sísmico, etc.

Tomando como base los elementos citados anteriormente y la experiencia manifiesta sobre el conocimiento de los deslizamientos en las áreas donde se encuentran ubicadas las canteras, 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:

- La base de los taludes y las laderas está constituido por un sub estrato rocoso impermeable compuesto por Calizas órgano-detritico, y en la mayor parte por arcillas formado por disolución de la propia caliza.
- Las arcillas, 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 sub-presiones en la corteza y presencia de intercalaciones de arcillas formadas a partir de la descomposición de rocas carbonatadas, se deben manifestar roturas o inestabilidades.

3.3. 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 Empresa de Materiales Construcción Holguín, 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 más o menos susceptibles al desarrollo de deslizamientos, a cada uno se le asigna un valor o significado, por su influencia de favorecer o reducir la posibilidad de rotura de los taludes y laderas, en función de la cantidad de área ocupada por deslizamientos en las clases de cada factor. Por el tamaño del área de cada yacimiento (1.00 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), (Almaguer, 2005a), (Almaguer, 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 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LA ROTURA	Internos	Características intrínsecas	Factor litológico	Grupos lito-estructurales
			Factor tectónico	Fallas, grietas, diques
		Características extrínsecas	Factor geotécnico	Propiedades físico- mecánicas, tipo de suelo, factor de seguridad.
			Factor geomorfológico	Pendiente umbral de deslizamientos
	Externos	Factor hidrogeológico		Sub-presión de los suelos residuales, nivel freático, gradiente crítico.
		Factor de uso actual del suelo		Uso de suelo

3.4. Inventario de deslizamientos.

El inventario se confeccionó a partir de varias campañas de reconocimiento, a escala 1: 2 000, ejecutadas en el 2014, en las cuales se describieron todos los deslizamientos desarrollados en el área del yacimiento Pilón. Para esto se recorrieron las áreas minadas y no minadas, las áreas reforestadas. Para perfeccionar el cartografiado de los movimientos, fundamentalmente los de mayor extensión, se utilizó la técnica de interpretación foto geológica 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 alongadas.
- 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 2, tabla 1].

3.5. 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 [Anexo 2 tabla 2]. Los yacimientos se clasificaron en tres clases de grupos lito-estructurales: roca debilitada químicamente representado por rocas detríticas y arcillas; roca con apariencia de suelo con estructura de la roca original representada por calizas órgano-detríticas; rocas intensamente agrietadas.

3.6. Factor estructural.

Las estructuras seleccionadas para el análisis de este factor fueron las grietas y fallas. Las grietas fueron medidas en todo el yacimiento. Además de obtener los elementos de yacencia (1 165 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.

La información de las fallas se obtuvo de varias investigaciones realizadas en el área, reconocimiento de campo, análisis foto geológico 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. Las aglomeraciones 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.

Los resultados estructurales alcanzados sirvieron para implementar el GSI (Geological Strength Index) con el fin de determinar el factor de seguridad de los taludes evaluados en el yacimiento a partir de las ventajas que este método nos brinda.

3.7. 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 supresiones en las zonas carsificadas del yacimiento Pilón.

Para el análisis del nivel de aguas subterráneas se confeccionó el plano de hidroisohipsas del yacimiento Pilón 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 calizas y de las cavernas que se encuentran rellenas de arcillas.

Un fenómeno muy relacionado con el comportamiento hidráulico del suelo y común en el área de estudio, es el encarcavamiento, que es la formación de aberturas o conductos debido a la disolución interna de rocas carbonatadas en este caso de calizas en sentido contrario a la dirección de los flujos de aguas subterráneos. En este proceso juega un papel decisivo el gradiente crítico, definido como el valor máximo del gradiente en un suelo saturado, por encima del cual se produce sifonamiento, (Sowers, 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 sub-presión presente en las arcillas que rellenan las cavernas, 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).

3.8. 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, y otros, 2001), mediante la aplicación de tres métodos:

1. Método de Denisov o Coeficiente de subsidencia.

$$KD = \frac{e_{LL}}{e}$$

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

2. Método del Código Soviético de Construcción.

$$KS = \frac{e - e_{LL}}{1 + e}$$

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:

$$e_{LL}: \text{relación de vacíos en el límite líquido. } e_{LL} = \frac{PER}{PE_{ALL}} - 1$$

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 otros no, bajo las condiciones naturales en que se encuentran.

3.9. Factor geomecánico.

Las propiedades de los macizos rocosos que influyen más directamente en el diseño de las voladuras son:

- ✓ Resistencia dinámica de las rocas.
- ✓ Litologías y potencias de los estratos en formaciones sedimentarias.
- ✓ Espaciamiento y orientación de las discontinuidades.
- ✓ Tipos de relleno y apertura de las discontinuidades.

La determinación de estos parámetros por métodos directos, o de laboratorio, resulta muy difícil y costosa, ya que las muestras ensayadas no suelen incluir las

discontinuidades y los cambios litológicos dentro de un macizo rocoso dado. Para obtener una muestra representativa sería necesario que tuviera unas dimensiones diez veces mayores que la distancia media entre las discontinuidades. Es por ello, que en la actualidad la caracterización de un macizo rocoso se aplica más como siguen a continuación:

- ✓ Sondeos con recuperación de testigo y ensayos geomecánicos en laboratorios.
- ✓ Estudios estructurales de los sistemas de fallas.
- ✓ Perfiles sísmicos de refracción. (Geofísica).
- ✓ Digrañas geofísicas de sondeos de investigación.
- ✓ Digrañas geofísicas en barrenos.
- ✓ Toma de datos y tratamiento durante la perforación de los barrenos de producción.
- ✓ Caracterización geológica de los frentes de explotación y ensayos geomecánicos in situ.

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 otros no, bajo las condiciones naturales en que se encuentran.

En el presente trabajo se determinó el comportamiento tensional en el yacimiento como sigue:

Se usó el Criterio de (Barton-Choubey, 1976) así como el criterio de rotura de Hoek-Brown generalizado (Hoek, y otros, 2002) cuyas expresiones se relacionan a continuación:

- ✓ Criterio de (Barton-Choubey, 1976)

$$\tau = \sigma' * \tan(JRC * \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'} \right) + \phi_r$$

Dónde:

JRC: Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad. Perfiles tipo para estimar el coeficiente de rugosidad. (Vallejo, 2002) Anexo 2. Figura 2.1.

JCS: resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad. Se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\log_{10} JCS = 0.00088 * \gamma f * r + 1.01$$

r : Número de rebote del martillo de geólogo cerca del plano de grieta o falla.

τ : Resistencia al corte tangencial. MPa

σ' : Resistencia al corte compresión. MPa

ϕr : Ángulo de rozamiento residual. El cual se obtiene a partir de la siguiente expresión: grados centígrados.

$$\phi r = (\phi b - 20) + 20 \frac{r}{R}$$

R : Número de rebote del martillo de Smith en la roca sana.

ϕb : Ángulo de fricción básico. Se obtiene a partir de tablas. Cuadro 3.13. Valores típicos de C y ϕb para rocas intactas. (Vallejo, 2002). El valor de la cohesión (C) se obtiene a partir de la representación gráfica de la envolvente Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial respectivamente. Como lo describe Protodyakonov M. modificado por el autor.

✓ El criterio de rotura de Hoek- Brown generalizado. (Hoek, y otros, 1988)

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad [1]$$

σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de rotura

σ_{ci} es la resistencia a compresión uniaxial del material intacto,

m y s son las constantes del material, donde

$s = 1$ para roca intacta.

donde m_b es un valor reducido de la constante del material m_i y está dado por:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad [2]$$

El valor de m_i se determina por tablas. Ver Anexo 2 figura 2.2

s y a son constantes del macizo rocoso dadas por las siguientes relaciones:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad [3]$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad [4]$$

D es un factor que depende sobre todo del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados. En la última sección de este capítulo se dan las pautas para la selección de D.

La determinación de valor apropiado de σ'_{3max} será utilizado en dependencia de cada situación específica.

Para estudios de problemas tales como el hundimiento de bloques en minas se recomienda que no se intente relacionar los parámetros de Mohr-Coulomb y de (Hoek, 1990) y que la determinación de las propiedades del material y análisis subyacente se basen sólo en uno de estos criterios.

Estudios similares en taludes, usando el análisis de rotura circular de Bishop para un amplio rango de geometrías de taludes y propiedades de macizo rocoso, dan:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91} \quad [5]$$

siendo H la altura del talud.

Donde:

σ'_{cm} : resistencia del macizo rocoso, y se determina por la siguiente ecuación:

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad [6]$$

con c y ϕ determinadas para el intervalo de esfuerzos.

Y por la siguiente ecuación de no conocerse estos parámetros:

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] (m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad [7]$$

La experiencia en el diseño de taludes en grandes minerías a cielo abierto ha mostrado que el criterio de Hoek-Brown para macizos rocosos in situ no alterados ($D=0$) da lugar a parámetros de resistencia del macizo rocoso consideradas optimistas. Los efectos de los intensos daños de las voladuras, así como de la relación de esfuerzos debido a la retirada del estéril de recubrimiento, provocan una alteración del macizo rocoso. Para estos macizos rocosos es más apropiado considerar propiedades “alteradas” del macizo, es decir $D = 1$ en las ecuaciones 2 y 3.

(Loring, y otros, 2001) muestran que factores tales como el confinamiento lateral producido por los diferentes radios de curvatura de los taludes (en planta) comparados con su altura también tienen su influencia sobre el grado de alteración.

✓ Criterio de reconocimiento estructural. GSI (Geological Strength Index)

Con la aparición del criterio de rotura de Hoek & Brown el uso del RMR ya no es adecuado, sobre todo para el caso de rocas débiles, y se introduce de esta forma la clasificación geomecánica GSI (Hoek, 1994); (Hoek, y otros, 2002)). El GSI es un sistema para la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo.

Las observaciones se basan en la apariencia del macizo a nivel de estructura y a nivel de condición de la superficie. A nivel de estructura se tiene en cuenta el nivel de alteración que sufren las rocas, la unión que existe entre ellas, que viene dada por las

formas y aristas que presentan, así como de su cohesión. Para las condiciones de la superficie, se tiene en cuenta si ésta alterada, si ha sufrido erosión o tipo de textura presenta, y el tipo de recubrimiento existente.

Una vez realizadas las observaciones se escoge en la tabla que se muestra en Anexo 2. Tabla 3 la situación que más se acerca a la realidad del macizo a estudio, obteniendo de esta forma, el valor del GSI.

Tal y como se observa en la Tabla 3 del referido anexo 2 los valores del GSI varían desde 1 hasta 100. Los valores cercanos al 1 corresponden a las situaciones del macizo rocoso de menor calidad, es decir con la superficie muy erosionada, con arcilla blanda en las juntas, y con una estructura poco resistente debido a las formas redondas, y a la gran cantidad de fragmentación que sufre el macizo. Por el contrario, valores de GSI cercanos a 100, implican macizos de gran calidad, ya que significa una estructura marcada por una pequeña fragmentación en la que abundan las formas prismáticas y superficies rugosas sin erosión.

3.10. 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 con substrato rocoso formado por rocas margosas muy debilitadas estructuralmente, rocas que transicionan de abajo hacia arriba de blandas a semiduras y en la parte superior un horizonte de mayor permeabilidad donde la resistencia de las rocas son mayores. La superficie de rotura se considera en el contacto Caliza organógenas-Calizas organodetríticas-Calizas margosas, según las observaciones de campo en la región de estudio, 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 y otros, 1978; Dos Santos y otros, 2005). De acuerdo al modelo, el factor de seguridad (FS) se obtiene por la ecuación siguiente:

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

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.

3.11. Análisis de la calidad del macizo rocoso.

Para lograr obtener una aproximación de la calidad en que se encuentra el macizo rocoso se utilizaron principalmente los índices RQD (Rock Quelite Designation) y RMR (Rock Mass Rating).

El índice RQD fue estimado a partir del parámetro J_v (*número total de discontinuidades por metro cúbico*) según la expresión empírica de (Palmstrom, 1975): $RQD = 115 - 3.3 \cdot J_v$, donde:

$J_v = \sum_0^n f_n$; f_n se considera como la frecuencia de aparición de cada sistema de familias de grietas, el cual se determina por el análisis de la estadística descriptiva del espaciamiento con que se presentan las grietas, tomando como F_1, F_2, F_n el valor de la media, para cada sistema de familias.

3.12. 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.

3.13. 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. 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.

3.14. 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. 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, y otros, 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):

$$V_c = \left[\frac{1}{G_i} \left(\frac{X_i}{Y_i} \times \frac{X}{Y} \right) + \sum \left(\frac{X_n}{Y_n} \times \frac{X}{Y} \right) \right] \times 1000$$

Donde:

V_c: valor de la clase analizada.

X_i: área ocupada por deslizamientos en la clase lito-estructural.

Y_i: área de la clase del grupo lito-estructural.

G_i: área ocupada por cuerpos de Calizas organógenas 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 Pílon de poseer en el macizo rocoso que da lugar a los taludes de cada frente de explotación diferentes litologías, 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 ráster con tamaño de celda de 5x5 m [figura 3.2] y la posterior reclasificación de cada plano temático mediante el análisis de clúster, que es una técnica estadística multi-variada, 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 2. Figura 3], donde se presenta la estructura del SIG implementado y el orden lógico de los procedimientos para la obtención del plano final de susceptibilidad. La cual está constituida de tres etapas fundamentales. En la primera de ellas se obtiene toda la información preliminar que sirve como base, dígame de informes, publicaciones, textos, en fin toda una serie de trabajos precedentes que guarden relación con el tema de investigación. Posteriormente será reconocida en el campo objeto de estudio a partir de

los reconocimientos litológicos, estructuras del macizo rocoso tales como fallas, grietas, foliaciones, cavernosidad. Se tuvo en cuenta la geomorfología en cuanto a la pendiente de los taludes, y en aspecto geotécnico se consideró importante las propiedades físico-mecánicas de las rocas existentes en el yacimiento, el factor de seguridad y el tipo del suelo. En esta parte del trabajo se analizó la incidencia de la Hidrogeología en dos aspectos: la sub presiones y la permeabilidad de las rocas. Determinando este análisis se concluye con plano de inventarios por deslizamiento al dar paso a la segunda etapa de la investigación que es el procesamiento de toda la información recopilada a partir de su digitalización e implementación del SIG. En la cual se preparó y se montó en ARGIS v-10.0 los mapas temáticos correspondientes a planos lito-estructural, planos de falla, plano de pendientes, plano de hidrogeología y el plano de deslizamiento, para así procesar e interpretar los datos estructurales, obtener el diagrama de contorno y planos principales de las diferentes estructuras además de procesar e interpretar las propiedades físico-mecánicas de las rocas. Con este compendio de resultados se aplica un método estadístico para valorar los factores y así seleccionar el modelo más adecuado para la evaluación de la susceptibilidad por deslizamiento una vez calculado los mecanismos y tipologías de movimientos presentes en el yacimiento así como el Factor de Seguridad para el yacimiento en cuestión.

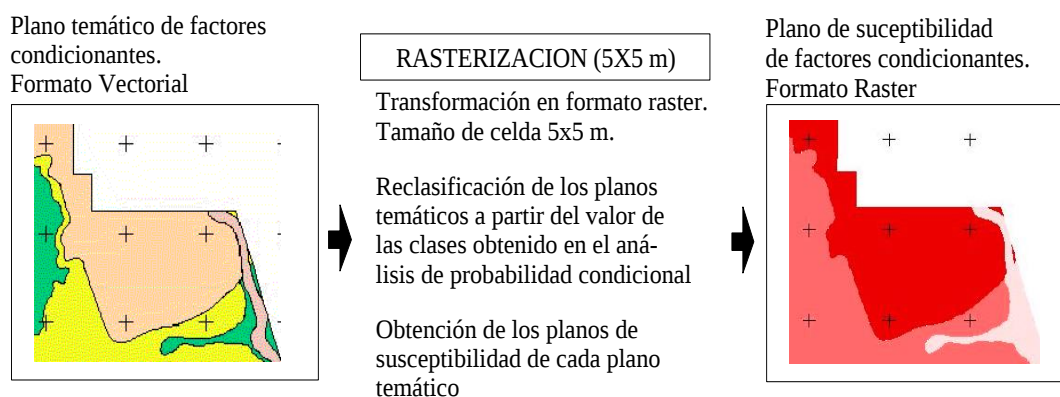


Figura 3.2. Proceso de rasterización y reclasificación para la obtención de planos de susceptibilidad de factores condicionantes. (Vicente González José L.- Behm Chang Virginia, 2008).

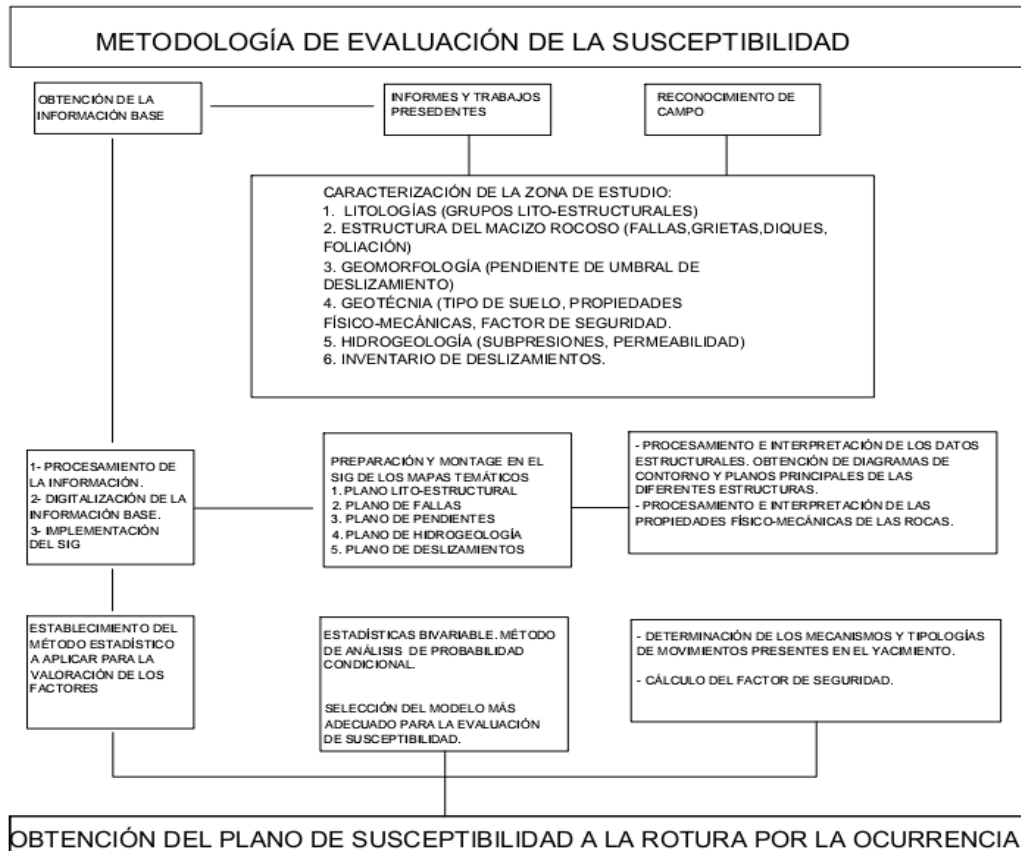


Figura 3.3. Metodología empleada en la evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura.

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 sub-presiones creadas en el piso de la Cantera, 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.

Capítulo 4. Evaluación de la susceptibilidad del terreno por deslizamientos en taludes.

4.1. 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); (Virberg, 1988); (Corominas, 1987) y (Corominas, 1992); (Westen, 1993) y (Westen, 1994); (Carrara, y otros, 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 de piedra Pilón.

4.2. Descripción y cartografía de los yacimientos.

Los primeros trabajos realizados, con vista al análisis de la susceptibilidad del terreno, fueron de reconocimiento de las áreas en cada yacimiento para ubicar y

caracterizar los posibles deslizamientos y crear el plano de inventario [Anexo 3. Figura 1]. A continuación se presenta una síntesis de las características de los movimientos efectuados y futuros:

- *Deslizamiento 1.*

Ocupa un área de 1 804 m², la dirección del movimiento es hacia el este. Tiene longitud máxima de 150 m y ancho de 12 m. La corona del deslizamiento se encuentra en el nivel de explotación 2 afectando al nivel 1 de explotación. Se desarrolla donde predominan las calizas organógenas. El escarpe principal coincide con zona de supresiones moderadas (2 m) de las arcillas que rellenan las avernas que colindan cerca del deslizamiento. Se encuentra a 70 m de una falla de dirección E48°W.

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

- *Deslizamiento 2.*

Abarca un área de 2 395 km² y la dirección del movimiento es hacia el noroeste. Tiene longitud máxima de 63 m y ancho de 38 m y se encuentra en el primer nivel de explotación. Se desarrolla en la zona de contacto entre las calizas organógenas y las calizas organodetríticas. El movimiento ocurrió en zona de supresiones moderadas (2 m) por parte de las arcillas que permanecen ocultas en las cavernas secundantes.

Tipología: presenta componente de rotura en forma de cuña por la intersección de dos familias de grietas: 222°/89° y 248°/40°.

- *Deslizamiento 3.*

Su dimensión puede abarcar un área de 3 441 m² siendo la dirección de movimientos hacia el oeste. Para una longitud máxima de 60 m y ancho máximo de 57 m. Se encuentra en el escalón de explotación 3, afectando los tres escalones desarrollados en el yacimiento. Se desarrolla en las calizas organógenas. Los

materiales a desplazarse llegan hasta piso inferior. El escarpe se encuentra a 100 m de una falla de dirección noreste-suroeste.

Tipología: componente de rotura bloque por familia de grietas $228^0/40^0$ y $116^0/22^0$.

- *Deslizamiento 4.*

Presenta un área de $2\,321\text{ m}^2$ y la dirección del movimiento es hacia el noreste. Tiene longitud máxima de 83 m y ancho máximo de 28 m. Se encuentra en la zona limítrofe de los bloques I-B y II-B. Se desarrolla sobre la capa 2 descrita en el capítulo 2. El escarpe se desarrolló sobre una falla normal con dirección del segmento este-oeste.

Tipología: por bloque con componente planar, la dirección del movimiento de la masa está controlada por la familia de grietas $61^0/47^0$ y $326^0/28^0$.

- *Deslizamiento 5.*

Presenta un área de $9\,705\text{ m}^2$ y la dirección del movimiento es hacia el noroeste. Tiene longitud máxima de 100 m y ancho máximo de 97 m. La corona se encuentra sobre el escalón de explotación 3. Se desarrolla en calizas organodetríticas. El borde derecho del escarpe coincide con valores altos de supresiones (4 m) en las cavernas rellenas por arcillas. 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: $222^0/89^0$ y $248^0/40^0$.

- *Deslizamiento 6.*

Ocupa un área de $6\,182\text{ m}^2$, la dirección del movimiento es hacia el este. Tiene longitud máxima de 269 m y ancho de 23 m. La corona del deslizamiento se encuentra en el nivel de explotación 2 afectando al nivel 1 de explotación. Se desarrolla donde predominan las calizas organógenas. El escarpe principal coincide con zona de supresiones moderadas (2 m) de las arcillas que rellenan las cavernas que colindan cerca del deslizamiento.

Tipología: presenta un gran componente de deslizamiento planar, con presencia de familia de grietas ($218^0/35^0$) en sentido aproximado de la dirección del movimiento. La corona presenta forma triangular por la intersección de dos familias de grietas: $135^0/87^0$ y $243^0/89^0$.

- *Posible Deslizamiento 1.*

Presenta un área de $4\,828\text{ m}^2$ y la dirección del movimiento es hacia el nore-noreste. Tiene longitud máxima de 86 m y ancho máximo de 56 m. Se encuentra en la zona limítrofe de los bloques I-B y II-B. Se desarrolla sobre la capa 2 descrita en el capítulo 2.

Tipología: por bloque con componente planar, la dirección del movimiento de la masa está controlada por la familia de grietas $61^0/47^0$ y $326^0/28^0$.

- *Posible Deslizamiento 2.*

Presenta un área de $1\,633\text{ m}^2$ y la dirección del movimiento es hacia el nore-noreste. Tiene longitud máxima de 43 m y ancho máximo de 38 m. Se encuentra en el bloque II-B. Se desarrolla sobre la capa 1 descrita anteriormente.

Tipología: presenta componente de rotura en forma de cuña por la intersección de dos familias de grietas: $212^0/85^0$ y $268^0/40^0$.

- *Posible Deslizamiento 3.*

Presenta un área de $1\,282\text{ m}^2$ y la dirección del movimiento es hacia el nore-noreste. Tiene longitud máxima de 71 m y ancho máximo de 18 m. Se encuentra en el bloque I-B. Se desarrolla en la zona de contacto entre la capa 2 y la capa 3 descrita en el capítulo anterior.

Tipología: por bloque con componente planar, la dirección del movimiento de la masa está controlada por la familia de grietas $75^0/47^0$ y $326^0/28^0$.

4.3. Clasificación de los deslizamientos.

Los movimientos de laderas y taludes, desarrollados en las áreas de los yacimientos, son fenómenos asociados al mecanismo de rotura del macizo rocoso que constituyen los yacimientos 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 cálculo más 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 las canteras investigadas 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), (Lomtadze, 1977), (Hutchinson, 1988), (WP/WLI, 1993), y (Cruden, y otros, 1996).

Mecanismos y tipologías de fenómenos gravitacionales en laderas y taludes en el yacimiento:

1. Mecanismos relacionados con caída libre de la roca.

- Desprendimientos de rocas. En los yacimientos 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 el yacimiento Pílon en toda la franja oeste y norte. En ocasiones en laderas formadas por las calizas organógenas y órgano detríticas, intensamente agrietadas, tiene lugar los fenómenos de derrumbes asociados con la alteración del material rocoso (formación de cavernas)

- Vuelcos. Estos mecanismos tienen lugar en aquellas laderas o cortes de masas de rocas 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 el tercer escalón de explotación donde se unen los bloques I-B y II-B, en las cuales existen sistemas de grietas paralelas a la ladera o talud a través de las cuales se infiltran las aguas superficiales rompiendo el equilibrio del sistema. Además, se ha reportado este tipo de movimiento en el yacimiento Los Caliches en las cuales se manifiesta agrietamiento reelectico o tensionar el cuál realiza la misma función que en la roca. (anexo 3 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 a aquellos que se producen a través de una única superficie plana u ondulada. En el área de estudio se manifiestan en la caliza organógenas que corresponden al yacimiento Pilón 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 sobre corrimiento en la cual se manifiesta un intenso cizallamiento con espesores mayores de 1m. Este tipo de movimiento también se produce en suelos residuales o re-depositadas (margas-calizas margosas), 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 4.1]. Las condiciones determinadas por (Hoek y otros, 1977) para la ocurrencia de este tipo de rotura se ponen de manifiesto en el yacimiento Pilón:

- 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 10 grados.
- los límites laterales de la masa deslizante producen una resistencia al deslizamiento despreciable.
- Deslizamientos combinados. En este tipo de movimiento se conjugan normalmente dos mecanismos; en el caso de las áreas del yacimiento se pueden combinar movimientos traslacionales y vuelco, rotacionales y traslacional. Siempre el primer mecanismo predomina sobre el segundo.

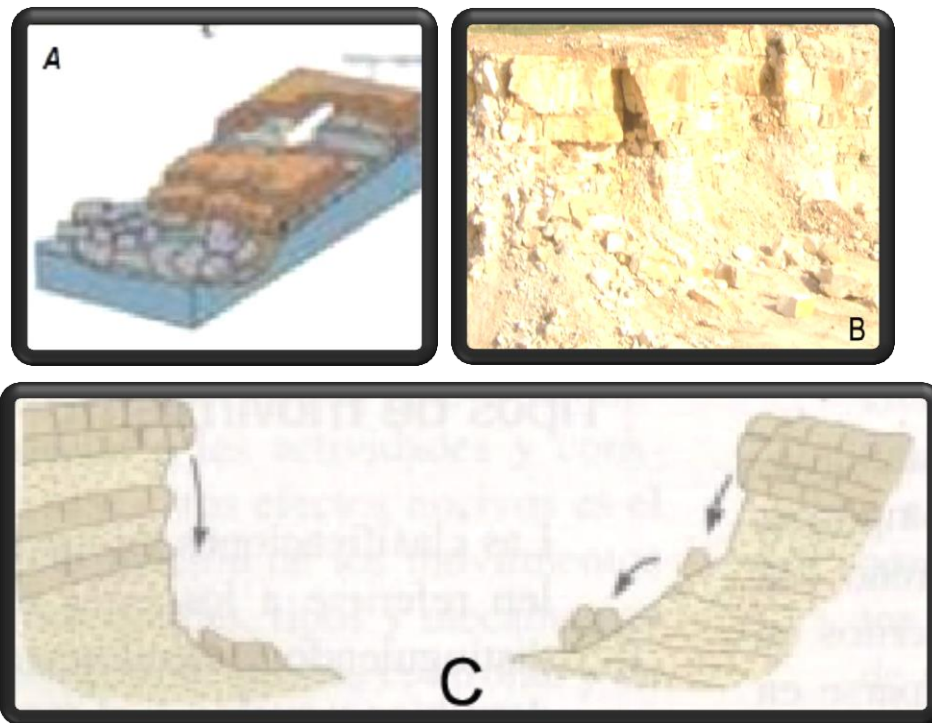


Figura 4.1. Deslizamiento traslacional desarrollado en el yacimiento Pilón. Fig. A. Esquema de un deslizamiento rotacional. [Modificado por (Varnes, 1984)]. Fig. B. Vista frontal: a la izquierda, un deslizamiento traslacional en el Yacimiento Pilón y hacia a la derecha se muestran deslizamientos por desprendimientos. [Foto del autor], Fig. C. esquema de un deslizamiento por desprendimiento. [Figura 4.12, pág. 624, (Vallejo, 2002)].

4.4. 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 tres grupos lito-estructurales principales, [Anexo 3 (foto 2)] los cuales por orden de predominio son: roca con apariencia de suelo con estructura de la roca original (calizas margosas: 48,2 %), roca con apariencia de suelo con estructura sedimentaria (calizas organodetríticas: 35,1 %) [Anexo 3 (foto 3)], roca debilitada tectónicamente (rocas calizas organógenas: 26,7 %), [Anexo 3 (figura 2)].

Del análisis realizado de cada una de las litologías, y la comparación del plano correspondiente con el inventario de deslizamientos [anexo 3 (figura 3) y tabla 4.1], las más afectadas son las calizas margosas ($0,456 \text{ Km}^2$) lo que representa un 52,7 % del área total ocupada por deslizamientos, en segundo lugar las calizas organógenas ($0,21 \text{ Km}^2$) y las calizas organodetríticas ($0,18 \text{ Km}^2$) lo que representa un 25,6 y 21,7 % respectivamente.

Tabla 4.1. Caracterización de los grupos lito-estructurales en relación al desarrollo de deslizamientos en ambos yacimientos.

Grupo lito-estructural	Litologías	Yacimiento	Área (Km ²)	% de área total	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
Roca debilitada tectónicamente	calizas organógenas	Pilón	0,267	26,7	0,21	25,6
Roca con apariencia de suelo con estructura de la roca original	Calizas margosas	Pilón	0,482	48,2	0,456	52,70
Roca con apariencia de suelo con estructuras sedimentaria	Calizas organodetríticas	Pilón	0,351	35,1	0,188	21,78

✓ 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 3 (figura 4)], clasificado en 6 clases: 0m, 5m, 10m, 15m, 20, y 25m. Los niveles más bajos se distribuyen hacia el norte y sur del área de forma puntual dibujando imaginariamente una línea recta en sentido suroeste-noreste. Los niveles más profundos están distribuidos en la región central del yacimiento, con cierta tendencia hacia el este y oeste de la cantera.

Comparando el plano del nivel freático con el inventario de deslizamientos [tabla 4.2] 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 de 15m el 23,3% y en el nivel 10m se reporta el mayor porcentaje de área ocupada por deslizamientos, 57,9%. [Anexo 3 (figura 5)]

Tabla 4.2. 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 calizas organodetríticas es de 0,4071, para el horizonte de las calizas margosas es de 0,7640 y para las calizas organógenas 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 3 (figura 5)].

De acuerdo al plano correspondiente [Anexo 3 (figura 5)], se observa que el área de susceptibilidad alta, frente a sifonamiento, se ubica desde suroeste a noreste obedeciendo una línea recta en esta dirección, desarrollándose los mayores movimientos. Las zonas de media susceptibilidad se distribuyen al norte, estos dos últimos con menor desarrollo.

✓ Influencia de las presiones hidrostáticas sobre los deslizamientos.

Para el análisis de la influencia de las condiciones hidrogeológicas sobre el desarrollo de los deslizamientos se confeccionó un plano de supresiones en la cantera Pílon [anexo 3(figura 6)], a partir de los datos de la profundidad de alumbramiento del agua subterránea. Las presiones nulas, se distribuyen en la parte central del yacimiento en forma de una franja estrecha en dirección este-oeste, expandiéndose en toda la porción oriental del mismo. Los valores de presiones medios y altos se observan en el centro 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 4.3. Caracterización del plano de supresiones en la cantera Pílon en relación al desarrollo de deslizamientos.

Clases de Supresiones (m)	Descripción	Área(Km ²)	% del área total	Área ocupada por deslizamientos	% del área ocupada por deslizamientos	total por
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	
≥ 6	Muy alta	0,2144	2,450	0,1528	17,628	44,589

En la tabla 4.3 se muestran los resultados del análisis conjunto entre el plano de supresiones y el inventario de deslizamientos [anexo 3 (figura 7)]. 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 2 metros de profundidad (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 de los yacimientos estudiados. Las clases utilizadas en el análisis, se tomaron en base a las pendientes medidas en los trabajos de reconocimiento en las áreas de trabajo. El plano, muestra los rangos de pendientes umbrales de deslizamiento con seis intervalos: 50-59 (Baja), 60-79 (Media), 80-89 (Alta), >90 (Muy Alta) [anexo 3 (figura 8)].

Como se muestra en la tabla 4.4 y en correspondencia con el [anexo 3 (figura 9)], la clase en la cual se desarrollan más movimientos es entre 60 y 79 y mayores de 90⁰, con un total de 5 fenómenos ya ocurridos, dejando las condiciones creadas para la ocurrencia de otros tres corrimientos por vuelcos, lo que representa el 62.5% del total para los que ya ocurrieron, mientras los posibles deslizamientos representan un 37.5 %. En las dos clases mencionadas, se desarrollan el 100% de todos los deslizamientos inventariados, dentro de los cuales, se encuentran los de mayor extensión ocurridos en las áreas afectadas por la actividad minera debido a la influencia de las grandes

pendientes sobre el desarrollo de deslizamientos, y el incorrecto cálculo del pasaporte de voladura, sobre todo en la determinación de la red óptima de barrenación. No obstante, un 20% de los deslizamientos, se desarrollan fuera de las áreas mineras, debido a la modificación del terreno por la actividad minera y el efecto de las ondas sísmicas generadas en el momento de la realización de las voladuras, pero son los movimientos desarrollados de menor extensión en cuanto a su área.

Tabla 4.4. Caracterización del plano de pendiente umbral en relación al desarrollo de deslizamientos.

Yacimiento Pilón						
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
<70°	-	-	-	-	-	-
71°-75°	-	-	-	-	-	--
76°-80°	Baja	0,02	7,6	25	60	10,2
81° – 85°	Muy alta	0,18	5,8	25	240	40,68
86° – 90°	Baja	0,04	2; 4	25	80	13,55
> 90°	Muy alta	0,13	1; 3	25	210	35,60

✓ Análisis de las condiciones ingeniero-geológicas en el Yacimiento Pilón.

Para el análisis de los macizos rocosos en cada yacimiento 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, y la determinación de tres horizontes ingeniero-geológicos, anexo 3 [figura 10], los cuales se

describen a continuación en una secuencia cronológica de la base del talud hasta el borde superior.

Capa 1: Caliza organógena, color blanco rosáceo, con manchas amarillentas, presenta abundantes restos fósiles de corales, conchas de bivalvos, se observa muy porosa con abundantes oquedades cársticas, es generalmente masiva, de resistencia baja. En algunos intervalos se alterna con una caliza margosa, se encuentra muy estratificada hacia su base. [Anexo 3 (foto3), tabla 4.5].

Tabla 4.5. Valores promedios de sus propiedades físicas y mecánicas:

Parámetros	U/M	Valor promedio	Valor máximo	Valor mínimo
Peso específico de los sólidos (γ_s)	Kn/m ³	26.6	26.7	26.5
Peso específico húmedo (γ_f)		21.4	21.7	20.9
Peso específico seco (γ_d)		20.8	21.5	20.3
Peso específico saturado (γ_{sat})		23.0	23.4	22.7
Peso específico sumergido (γ')		13.0	13.4	12.7
Humedad (w)	%	2.5	3.7	1.0
Porosidad (n)		23	22.0	24.1
Absorción		5.5	6.3	4.6
Saturación		29	34	24
Resistencia a la compresión axial estado seco	Mpa	13.1	17.6	9.8
Resistencia a la compresión axial estado saturado		9.3	12.1	7.1
Coeficiente de ablandamiento		0.71	0.73	0.69

Capa 2: Caliza organodetrítica de color blanco crema hasta rosado claro, presenta oquedades cársticas de diferentes dimensiones, fisuras y grietas rellenas de óxidos de hierro y en ocasiones de calcita, se presenta masiva, en gran parte con textura brechosa, es de resistencia media. Es la variedad más extendida en el yacimiento, ocasionalmente se presenta recristalizada y marmolizada. Anexo 3 (fotos 4), tabla 4.6].

Tabla 4.6. Valores promedios de las propiedades físicas de las rocas que constituyen la capa 2.

Parámetros	U/M	Valor promedio	Valor máximo	Valor mínimo
Peso específico de los sólidos (γ_s)	kN/m ³	26.6	27.1	26.4
Peso específico húmedo (γ_f)		24.4	25.6	22.8
Peso específico seco (γ_d)		24.3	25.5	22.6
Peso específico saturado (γ_{sat})		25.1	26.0	24.3
Peso específico sumergido (γ')		15.1	16.0	14.3
Humedad (w)	%	0.6	1.6	0.1
Porosidad (n)		9	13	5
Absorción		1.7	3.6	0.3
Saturación (S)		15	34	4
Resistencia a la compresión axial estado seco (q_u)	Mpa	25.8	40.4	13.9
Resistencia a la compresión axial estado saturado(q_u)		22.9	34.4	11.3
Coefficiente de ablandamiento (Ca)		0.89	0.98	0.78

Capa 3: Caliza margosas, color blanco crema, presenta tonalidades amarillentas, son rocas de resistencia media, compactas, de grano fino, en los planos de estratificación a veces se observa un material arcilloso carbonatado de color gris verdoso. Constituye la secuencia inferior del corte estratigráfico del yacimiento.

Tabla 4.7. Valores promedios de las propiedades físicas de las rocas que constituyen la capa 3.

Parámetros	U/M	Valor promedio	Valor máximo	Valor mínimo
Peso específico de los sólidos (γ_s)	Kn/m ³	26.9		
Peso específico húmedo (γ_f)		24.3	24.8	23.5
Peso específico seco (γ_d)		24.1	24.5	23.2
Peso específico saturado (γ_{sat})		25.1	25.4	24.6
Peso específico sumergido (γ')		15.1	15.4	14.6
Humedad (w)	%	11	13	9
Porosidad (n)		11	14	9
Absorción		1.4	2.2	0.8
Saturación		24	35	11
Resistencia a la compresión axial estado seco	Mpa	19.9	21.5	17.5
Resistencia a la compresión axial estado saturado		18.3	20.7	15.5
Coeficiente de ablandamiento		0.92	0.96	0.88

Teniendo en cuenta lo analizado hasta el momento la humedad tiende a aumentar con el grado de alteración de la roca, evidenciando que en todo el macizo rocoso el contenido de humedad es alto dado al grado de alterabilidad presente en las rocas del yacimiento Pilón, esto es debido al gran porcentaje de minerales arcillosos presentes en la parte inferior del corte, que le confieren a los taludes 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, en cada horizonte el peso específico se mantiene estable sin mucha variabilidad, dado por la concentración de óxidos e hidróxidos de hierro.

Del análisis se tiene que el 100% de los deslizamientos se desarrollan en las capas 2 y 3. Áreas ocupadas por las calizas organodetríticas y calizas organógenas muy estratificadas. Anexo 3 [figura 11].

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

- *Influencia del agrietamiento del macizo rocoso.*

Como se ha descrito anteriormente, el agrietamiento juega un papel decisivo en el desarrollo de los movimientos en los yacimientos mencionados, influyendo sobre todo, en los mecanismos y tipologías de las roturas. A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir de las mediciones de los elementos de yacencia, los cuales nos brindan las 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.

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 4.2]. 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 4.3].

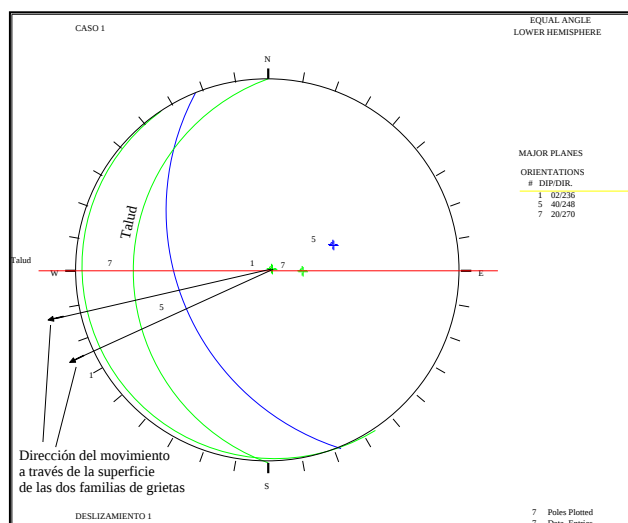


Figura 4.2. Diagrama de planos principales de grietas y ladera. Análisis tipológico de movimientos en el caso de estudio 1.

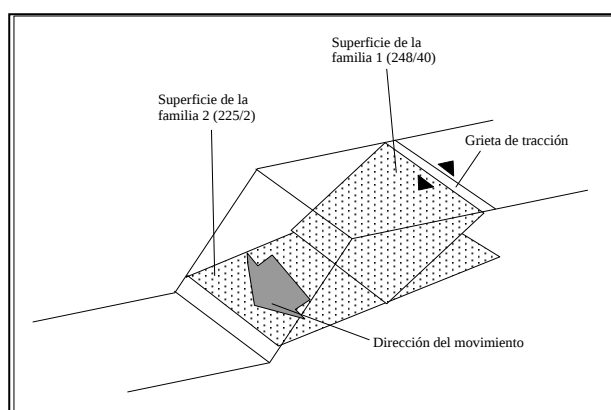


Figura 4.3. Representación gráfica del movimiento planar. Posición relativa de las familias de grietas y la ladera.

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 4.4]. 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 4.5].

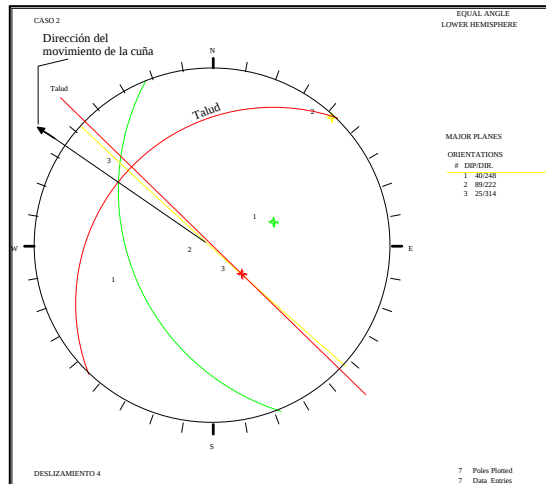


Figura 4.4. Diagrama de planos principales de grietas y ladera. Análisis tipológico de movimientos en el caso de estudio 2.

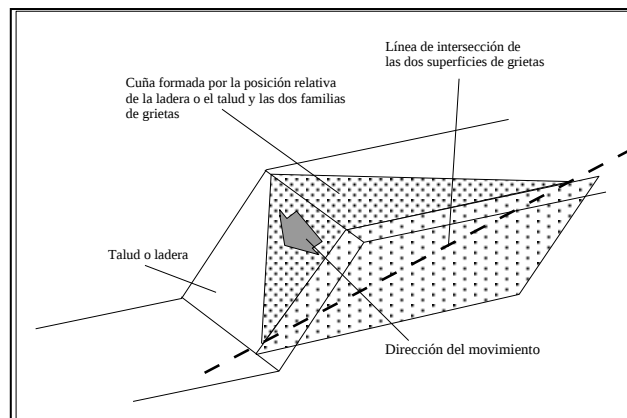


Figura 4.5. Representación gráfica de la rotura por cuña. Posición relativa de las familias de grietas y la ladera.

Al evaluar la estabilidad de los deslizamientos es preciso tener en cuenta todas unas series de causas, factores a su formación y condiciones que favorecen para su desarrollo. Por ejemplo desde el punto de vista estructural el área se encuentra muy dañada, al representar varias familias de grietas, muchas de estas se encuentran rellenas por minerales arcillosos más otros como drusas de cuarzo y calcita. En todos los casos las grietas presentan a pequeña escala una rugosidad lisa, y a mediana escala: plana, indicando que la masa rocosa es propicia al deslizamiento a favor del

plano de dislocación, en otros casos ocurre a favor de los planos de fallas, además de presentar estratificaciones que buzcan con 2^0 se obtuvieron observaciones macroscópicas de los distintos frentes de explotación, las cuales dejan en evidencia un alto grado de alteración y destrucción de las rocas allí presente, clasificándolas como rocas completamente alteradas y en algunos sectores formando ya suelos residuales. Cuantitativamente se presenta el [anexo 4 (tabla 1)] en esta base de datos se relaciona los elementos de yacencia medidos en el campo. Estos datos se introdujeron en el Dips 5, el cual nos da una idea de cómo se presenta estructuralmente el lugar.

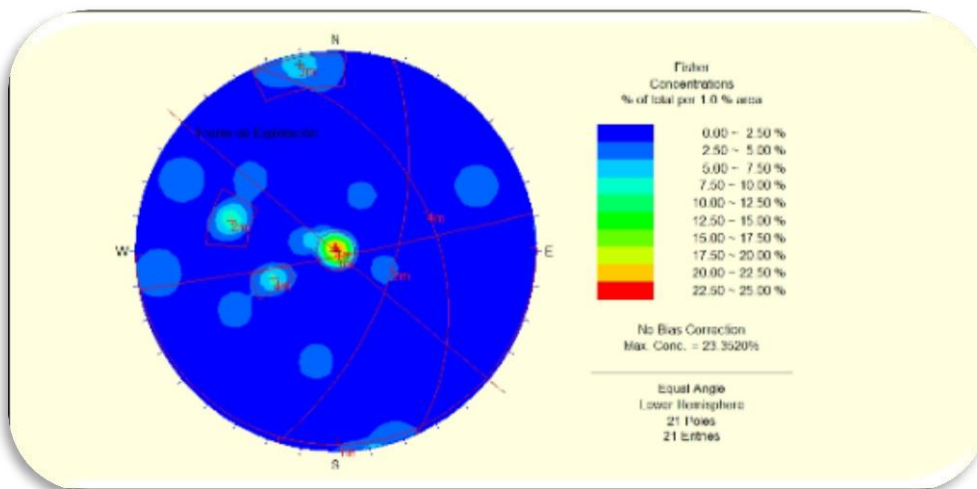


Figura 4.6. Principales familias de grietas.

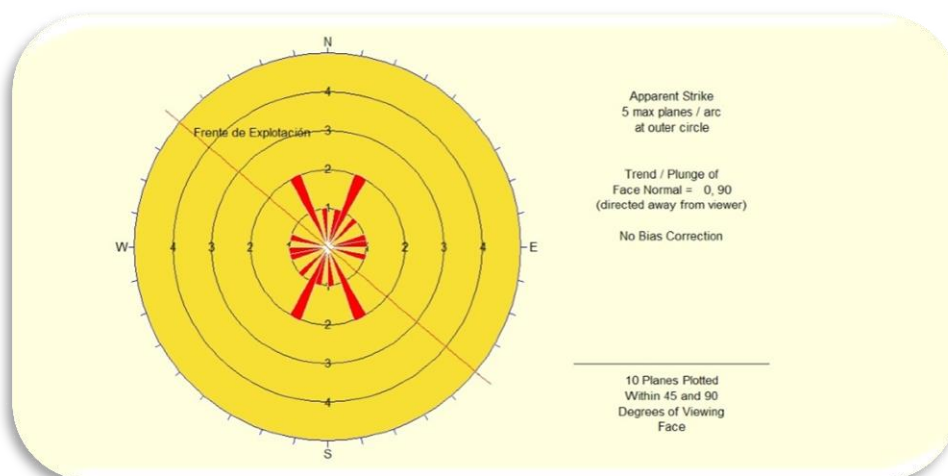


Fig. 4.7 Orientación por el rumbo de las grietas medidas en campo.

Las figuras 4.6 y 4.7 son el resultado de la fusión de los casos de estudios analizados anteriormente pudiéndose determinar que los planos de debilidad de las rocas presentan tres direcciones: una de ellas orientada Este-Oeste, la segunda: Nordeste-Sureste y por último Noroeste-Sureste. Siendo las dos últimas mencionadas las más importantes, ya que son las que monitorean los esfuerzos inducidos en las rocas allí presentes, el primer grupo solo son un grupo de grietas originadas por la acción de los otros grupos mencionados más arriba, en todos los sistemas el número de familia de grietas llegan hasta dos familias por cada sistema. Esta consecuencia tiene como efecto que los esfuerzos que actúan en la roca están dirigidos en sentido paralelo al frente de explotación. Estas figuras nos demuestran además que dos de los planos de discontinuidad presentan cierta inclinación respecto al acimut de buzamiento intersecándose entre ellos formando una cuña que puede alcanzar hasta tres metros de dimensiones partiendo que el espaciamiento entre las grietas para ambos casos han tomado valores de hasta 4 metros entre ellas y su continuidad sobrepasan los 10 metros en algunos casos. Para el tercer grupo de grietas estas se disponen de manera horizontal y perpendicular a las otras dos familias de grietas mencionadas anteriormente.

✓ Estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso con el empleo del GIS en el Yacimiento Pilón.

Las observaciones realizadas se basan en la apariencia del macizo rocoso a nivel de estructura y a nivel de condición de la superficie. A nivel de estructura se tiene en cuenta el nivel de alteración que sufren las rocas, la unión que existe entre ellas, que viene dada por las formas y aristas que presentan, así como de su cohesión. Para las condiciones de la superficie, se tiene en cuenta si éste se encuentra alterado, si ha sufrido erosión o tipo de textura presente, y el tipo de recubrimiento existente.

Por ejemplo la capa constituida por las calizas organógenas presentan un GSI= 55. Debido a que se presenta muy inter-bloqueada formando muchos bloques pequeños cuyas grietas en ocasiones presentan arcillas, para el caso de capa que se constituye por las calizas organodetríticas estas presentan valores de GSI iguales a 30 respectivamente. Se debe por presentarse con una blocosidad abundante y persistente llegando a formar detritos pequeños y grandes provocados por las intersecciones de las grietas formadas en más de una dirección vista anteriormente en este mismo acápite. Mientras que en la tercera capa constituidas por las calizas margosas el valor del GSI oscila entre 20, ya que se constituye por detritos prácticamente desintegrados por la propia brechosidad ocasionada por el intenso agrietamiento en varias direcciones, en las cuales se mezclan pedazos de rocas angulares con otros algo redondeados, influenciados por la presencia de humedad ocasionando el ablandamiento de la roca y su posterior destrucción.

En correspondencia con el (Anexo 2. Tabla 3) se obtiene una visión más clara de las correlaciones entre cada capa existente en el yacimiento y el valor dado de GSI. Cuyo valor servirá como dato importante para determinar las tensiones del macizo rocoso en el propio yacimiento utilizando el criterio de (Hoek, y otros, 1988).

✓ Análisis de las condiciones geomecánicas en el Yacimiento Pilón.

Una vez conocido las características estructurales del frente de explotación así como las propiedades físicas, se analiza el comportamiento tensional del macizo rocoso en el yacimiento. Para ello se usó el criterio de (Barton-Choubey, 1976) y (Hoek, y otros, 1988).

Al aplicar el primero de los criterios se obtiene el valor de la cohesión (C) a partir de la representación gráfica de la envolvente Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial respectivamente. Como lo describe Protodyakonov M. modificado por el autor. Figura 4.8

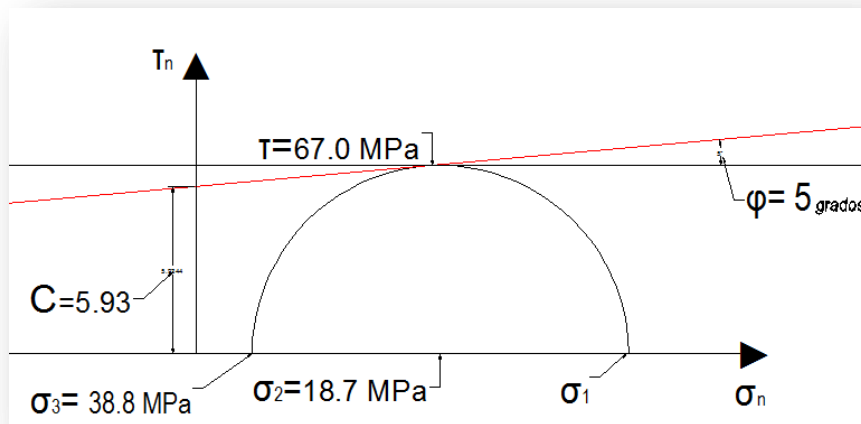


Figura 4.8. Representación gráfica de la envolvente Mohr-Coulomb, en el gráfico se muestra las tensiones máximas y la cohesión en las calizas organodetríticas.

Al obtener la figura anterior se deduce que para los valores tensionales de tracción obtenidas de 9.3 MPa, los límites superiores de la tensión normal son de 38.8 MPa y de las tensiones tangenciales son de 67.0 MPa. El dominio elástico viene representado por la envolvente. Por lo que los puntos del macizo cuyo estado tensional se encuentran por debajo de esta envolvente se encuentran en un estado elástico, mientras que si estos valores durante el tiempo superan los límites antes mencionados se encuentran en un estado de rotura.

La información de los elementos de yacencia del agrietamiento se utilizó en el análisis de los mecanismos y tipologías de movimientos de masas. Estos elementos nos permitieron comparar la posición relativa de las familias de grietas del macizo con respecto a la dirección e inclinación de las laderas y taludes.

En la tabla que a continuación se presenta establece los datos necesarios para la obtención de las resistencias al corte en el macizo rocoso estudiado.

Tabla 4.8 Parámetros Geodinámicos de las rocas analizadas

LITOLOGÍAS	PARÁMETROS GEODINÁMICOS POR EL CRITERIO BARTON-CHOUBEY							
	JRC	JCS	<i>R</i>	<i>r</i>	ϕr	ϕ	σ_{max}'	τ_{max}
Calizas <i>organodetríticas</i>	9	0.01007	3.5	1.25	17.14	4.89	38.8	67.0
Calizas <i>organógenas</i>	9	0.01265	5	2.35	20.64	18.2	43.21	75.0

Mientras que con el empleo del segundo criterio propuesto se contrajeron los resultados que se muestran a continuación:

Tabla 4.9 Parámetros Geodinámicos de las rocas analizadas

LITOLOGÍAS	PARÁMETROS GEODINÁMICOS POR EL CRITERIO DE HOEK-BROWN							
	GSI	<i>a</i>	<i>s</i>	<i>M_b</i>	σ_{ci}	σ'_{cm}	<i>D</i>	$\sigma'_{3 \text{ máx}}$
Calizas <i>organodetríticas</i>	30	1.29	$8.57 \cdot 10^{-6}$	0.07	25.8	16.00	1	38.39
Calizas <i>organógenas</i>	55	1.01	$5.53 \cdot 10^{-3}$	0.80	13.1	6.20	1	49.87

Calizas margosas	20	1.40	$1.62 \cdot 10^{-6}$	0.02	19.9	4.15	1	58.63
-------------------------	----	------	----------------------	------	------	------	---	--------------

Las calizas como han sido destruidas por el intenso agrietamiento, erosionadas y diluidas por el agua descomponiéndose casi en su totalidad, cambiando su composición y estructura finalmente, en las tablas expuesta con anterioridad se recogen los principales parámetros físico-mecánicos para cada tipo de roca presente en el talud del Frente de Explotación.

Con el propósito de conocer el factor de seguridad que representan las rocas del Yacimiento Pílon a partir de los parámetros de estabilidad determinados con anterioridad y de las propiedades físico-mecánicas, se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 4.10. Relación de los tipos de rocas y los parámetros geodinámicos en función del Factor de Seguridad. (FS).

LITOLOGÍAS	PARÁMETROS GEODINÁMICOS								
	γ_d	γ_f	w	C	ϕ_r	ϕ	σ_{max}'	τ_{max}	FS
Calizas organodetríticas	9	0.01007	3.5	5.93	17.14	4.89	38.8	67.0	0.25
Calizas organógenas	9	0.01265	5	8.45	20.64	18.2	43.21	75.0	0.85

✓ Análisis de la calidad del macizo rocoso.

Partiendo de la ecuación del apartado 3.11 del capítulo anterior y tomando los valores de la estadística descriptiva (valores de la media, *Tabla 4.11*), determinado para cada familia de grietas se calculó el RQD.

Tabla 4.11. Valores de la media para cada sistema de familia de grietas presentes en cada tipo de roca.

Tipos de Rocas	F1	F2	F3	F4	F5	Total
Caliza organógena	14.07	16.75	14.48	17.5	18.88	81,68
Caliza organodetríticas	22.13	13.22	17.42			52,77
Caliza Margosa Dura	14.73	12.91	14.25	14.25		56,14

Cálculo del RQD en Calizas organógenas

$$\begin{aligned}
 RQD &= 115 - 3.3 * J_v & J_v &= f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 \\
 RQD &= 115 - 3.3 * 81.6 & J_v &= 14.07 + 16.75 + 14.48 + 17.5 + 18.88 \\
 RQD &= 154.6 & J_v &= 81.6
 \end{aligned}$$

Cálculo del RQD en Calizas organodetríticas

$$\begin{aligned}
 RQD &= 115 - 3.3 * J_v & J_v &= f_1 + f_2 + f_3 \\
 RQD &= 115 - 3.3 * 52.77 & J_v &= 22.13 + 13.22 + 17.42 \\
 RQD &= 59.14 & J_v &= 52.77
 \end{aligned}$$

Cálculo del RQD en Calizas margosas

$$\begin{aligned}
 RQD &= 115 - 3.3 * J_v & J_v &= f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \\
 RQD &= 115 - 3.3 * 56.14 & J_v &= 14.73 + 12.91 + 14.25 + 14.25 \\
 RQD &= 70.26 & J_v &= 56.14
 \end{aligned}$$

Según los valores obtenidos de J_v y RQD, utilizando la clasificación del ISRM (1981), (Anexo 3.Tabla 3) se dio una valoración del tamaño de los bloques y calidad geomecánica para cada tipo de roca y de forma general para todo el macizo rocoso como se muestra en la tabla 4.12.

Tabla 4.12 Clasificación de los bloques y de la calidad del macizo rocoso según el ISRM (1981).

Tipo de roca	Valor de Jv	Valor de RQD	Tamaño de los Bloques según Jv	Calidad Geomecánica (RQD)
Calizas organógenas	81.8	0	Bloques muy pequeños	Muy mala
Calizas Organodetríticas	52.77	59.14	Bloques pequeños	Media
Calizas Margosas dura	56.14	70.26	Bloques pequeños	Buena

Como podemos apreciar en la tabla anterior, la mayoría de las rocas que conforman el macizo rocoso del yacimiento están caracterizadas por un tamaño de bloques pequeños con una calidad geomecánica buena a muy mala, dada por los valores del RQD y Jv.

Para la valoración del índice RMR se utilizó la clasificación geomecánica de (Bieniawski, 1979), (Anexo 3 Tabla 4), los valores fueron obtenidos a partir de la formula siguiente:

$RMR = A+B+C+D+E$ donde:

A= Resistencia a la compresión de la matriz rocosa

B= Grado de fracturación del macizo rocoso en términos de RQD.

C= Espaciado de las discontinuidades.

D= Condiciones de las discontinuidades.

E=Condiciones hidrogeológicas

$RMR = A+B+C+D+E$

$RMR = 7.0+6.0+10+10+10$

$$RMR = 43.0 \%$$

Obteniendo el valor del RMR, se determinó el tipo de clase que representa el macizo rocoso en cuestión (clase IV), la cual representa una calidad mala. Con estos valores se obtuvo un modelo digital del terreno [anexo 3 (figura 12)] en el cual se muestra los lugares más vulnerables así como los sectores dentro del yacimiento donde la roca se presenta con mayor calidad desde el punto de vista geomecánico. Este modelo se obtuvo a partir de un estudio geoestadístico de los resultados alcanzados hasta ahora en la presente investigación, tomando como variables el RQD y el RMR ya obtenidos, el método empleado fue el de Kreeding con la variante de bloques.

✓ Relación del uso del suelo con el desarrollo de deslizamiento.

Haciendo un análisis del uso del suelo en el área de trabajo, se tienen 5 clases fundamentales [anexo 3 (figura 13) y tabla 4.13] 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 3 (figura 14)], el uso de suelo más afectado es la zona cubierta con vegetación natural, afectada por 0,026 Km² de área ocupada por movimientos de masas, lo cual representa el 74,12 % 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 0,079 Km² de área ocupada por deslizamientos (22,01%) y las zonas de escombreras con 0,0013 Km².

Tabla 4.13. Caracterización del plano de uso de suelo en relación al desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Pilón.

<i>Clases de Uso del suelo</i>	<i>Área (Km²)</i>	<i>% del área total</i>	<i>Área ocupada por deslizamientos</i>	<i>% del área total ocupada por deslizamientos</i>
<i>Áreas minadas</i>	0,058	15,75	0.0079	22.01
<i>Caminos mineros</i>	0,02	5,40	-	-
<i>Escombreras</i>	0,0092	2.48	0,0013	3,87
<i>Vegetación natural</i>	0,28	75.71	0,026	74,12
<i>Áreas sembradas</i>	0,0025	0,66	-	-

4.5. 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 las áreas 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 4.14.

Tabla 4.14. Valoración de los factores condicionantes de las inestabilidades en el yacimiento Pilón.

Factores utilizados en el análisis de susceptibilidad											
Grupos	Tectónica		Hidrogeología		Geomorfología		Geotecnia		Uso de suelo		
Lito-estructurales											
Litologías	Distancias a fallas (buffer)		Sub-presiones en el suelo		Pendiente umbral		Resistencia a la compresión		Clases de uso de suelo		
Yacimiento Pilón											
Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor
Calizas organógenas	1,14	200 m	17,91	0 m	8,49	80 ⁰ -89 ⁰	211,21	MPa	13,1	Áreas minadas	100
Calizas margosas	21,72	500 m	84,0	1,2 m	10,7	80 ⁰ -89 ⁰	211,21	MPa	25.8	Áreas reforestadas	0
Calizas organodetríticas	19,52	400 m	16,02	2 m	193,4	80 ⁰ -89 ⁰	211,21	MPa	19,9	Caminos mineros	0

En el yacimiento Pilón con relación a las litologías, las áreas ocupadas por calizas organógenas presentan los menores valores de probabilidad, debido a que estas rocas yacen sobre la cota +50 m lo que constituye la base de los taludes examinados. Mientras tanto, las calizas estratificadas y las calizas organodetríticas presentan valores de probabilidad relativamente 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 sub-presiones del macizo rocoso se tiene alta probabilidad para la clase de 2 m y la de 1,2 m, coincidiendo con las calizas estratificadas y las organodetríticas, en la cual se reporta la mayor cantidad de área ocupada por deslizamientos en relación a su área. En cuanto a las pendientes

umbrales, la mayor probabilidad la presentan aquellas que oscilan entre 80° y 89°, en las cuales se desarrollan los mayores deslizamientos reportados en el área de estudio.

En la valoración según a la compresión simple, las mayores probabilidades se relacionan con las calizas organógenas al presentar valores bajos de resistencias al cortante. La valoración aumenta un poco en las calizas estratificadas y en las organodetríticas, las cuales presentan mayor extensión en el área del yacimiento.

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 calizas que en el lugar yacen. 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 [Anexo 3 tabla 2].

El plano del factor lito-estructural se reclasificó en 4 clases de susceptibilidad: muy baja, baja, alta y muy alta [anexo 3 (figura 15)]. La clase de baja susceptibilidad, ubicada en la parte central del yacimiento, hacia el sur, sureste, norte, y oeste. Corresponde con el área ocupada por aquellos materiales que se encuentran muy agrietados, carcificados, redepositados por sedimentos lixiviados por el agua, los cuales se encuentran rellenando las cavernas. 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 re-depositadas.

El plano que caracteriza las condiciones hidrogeológicas, se reclasificó en tres clases de susceptibilidad: baja, alta y muy alta [anexo 3 (figura 16)]. 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 supresiones de 4 m, y ocupa el 9,94%. Se distribuye en áreas aisladas hacia el oeste, norte y con cierta alineación NE-SW hacia el sureste. La tercera clase, de susceptibilidad muy alta, está representada por las supresiones 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 3 (figura 17)], 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 del yacimiento, se reclasificó en cuatro clases: muy baja, baja, media y alta [anexo 3 (figura 18)]. La clase de menos susceptibilidad (alta), se relaciona con las áreas ocupadas por las Calizas Organógenas y Calizas organodetríticas; la clase de mediana susceptibilidad se relaciona con la parte más baja de las Calizas organodetríticas y las Calizas Margosas, relacionándose las bases de las Calizas Margosas y las Margas con la clase de susceptibilidad más alta del yacimiento. La primera de ellas ocupa el 15,2%

del área de trabajo para la clase media el 32,21% del área. La clase alta, ocupa el 48,76% del área total.

El plano de uso de suelo se reclasificó en cuatro clases: muy baja, baja, alta y muy alta [anexo 3 (figura 19)]. La clase de baja susceptibilidad se relaciona con las áreas ocupadas con los caminos mineros y depósitos de material, ocupando el 5,01% de área total. Su distribución 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.

4.6. Descripción del plano de susceptibilidad.

✓ Descripción del plano de susceptibilidad.

El plano de susceptibilidad del terreno a la rotura obtenido en la investigación está clasificado en cuatro clases: Susceptibilidad baja, media, alta y muy alta [tabla 4.11 y figura 4.9]. Las mismas se describen a continuación:

- Susceptibilidad baja: ocupa un área de 3,35 Km² (38,33% del área total). En el área se distribuye en la parte central del yacimiento, relacionado con el piso inferior. Además se relaciona con las zonas periféricas del yacimiento.
- Susceptibilidad media: ocupa un área de 3,03 Km² (34,63% del área total). Se distribuye al este del yacimiento Pílon, en forma de franja alargada de dirección este-oeste en la parte occidental, 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 en ambos yacimientos 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 para cada yacimiento presente su mayor acumulación en forma continua y alineada en dirección noreste-suroeste.

Tabla 4.11. Caracterización del plano de susceptibilidad a la rotura.

<i>Descripción</i>	<i>Clases de susceptibilidad</i>			
	<i>Baja</i>	<i>Media</i>	<i>Alta</i>	<i>Muy alta</i>
<i>Área (Km²)</i>	3,35	3,03	0,13	2,23
<i>% de área</i>	38,33	34,63	1,49	25,54

4.7. Medidas preventivas.

Cuando un talud ha sufrido roturas, deformaciones o se encuentra expuesto a mecanismos desestabilizadores como por ejemplo voladuras ejecutadas en Frentes de Canteras, se deben adoptar medidas de estabilización. Igualmente cuando por diferentes razones, ya sean constructivas, ambientales o económicas se precise la construcción de un talud o la modificación del mismo con mayor ángulo de inclinación del correspondiente con la resistencia del material es necesario tomar precauciones.

Para el caso que nos compete en este trabajo investigativo, las medidas recomendadas a tomar en el Yacimiento Pilón son las siguientes:

1. De acuerdo a la resistencia promedio determinadas en las rocas de los taludes que constituyen los Frentes de Explotación, el ángulo de inclinación no debe ser mayor a 78° ni menor a 72° .
2. En correspondencia a la geometría espacial determinada a partir de las mediciones de cada elementos de yacencia, se recomienda utilizar una red de barrenación no mayor a 2.5 metros en la distancia entre barrenos y 2.5 metros en la distancia entre filas, siendo la más idónea: 2.5 metros entre barrenos y 2 metros entre filas.
3. La línea de menor resistencia tiene que ser igual a 2.5 metros.
4. La altura del escalón de explotación no puede exceder los 7 metros de potencia.

Conclusiones.

- En el yacimiento Pilón se han desarrollado 6 deslizamientos importantes y otros 3 posibles deslizamientos. La tipología y los mecanismos de rotura están en función de las condiciones estructurales, hidrogeológicas y de las características físico-mecánicas de las 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.
- Se determinaron un grupo de medidas con el fin de prevenir, mitigar accidentes por deslizamientos en los Frentes de Explotaciones.
- 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 de calizas perteneciente a la cantera Rubén Rodríguez, con cuatro clases de susceptibilidad: baja, media, alta y muy alta.

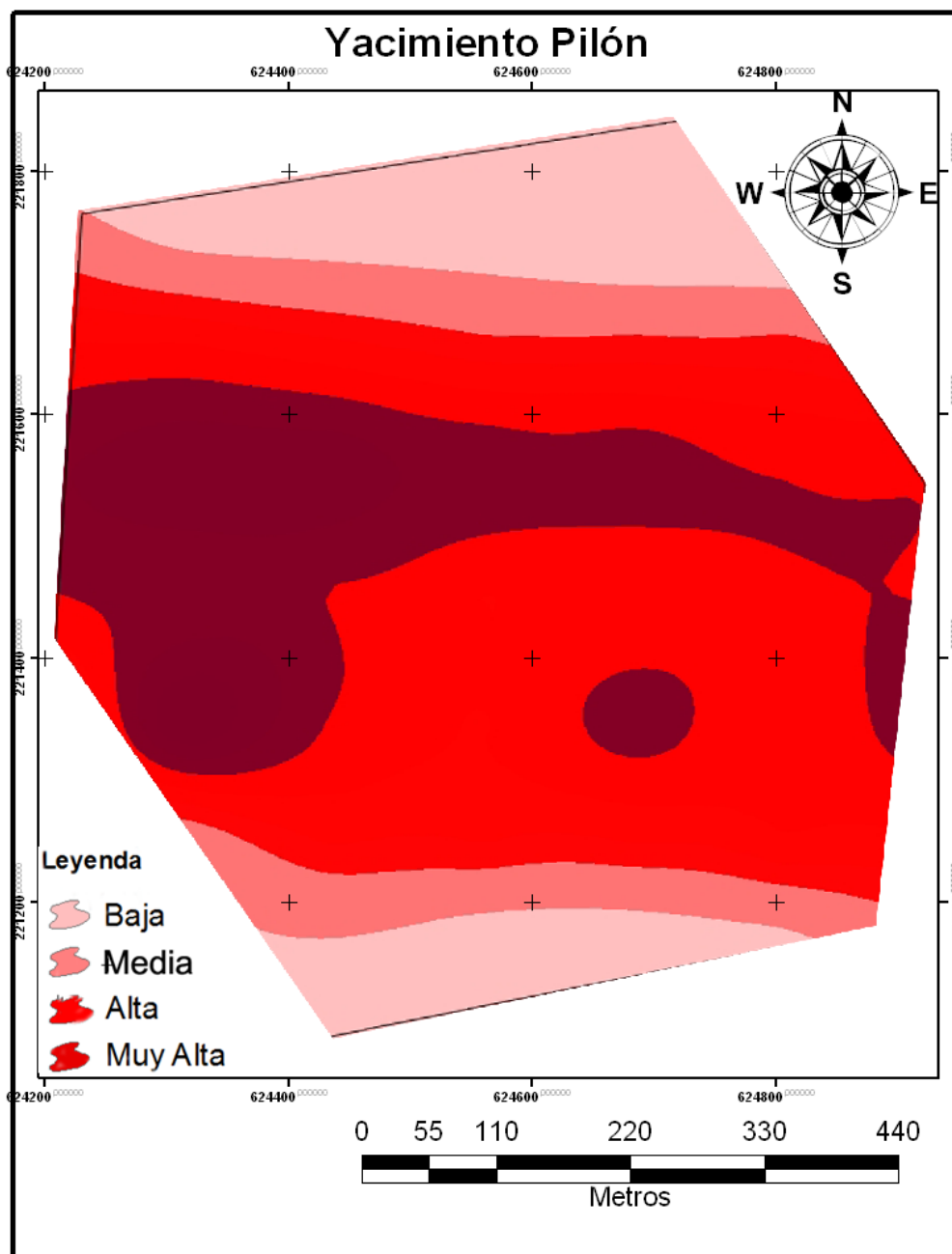


Figura 4.9. Plano de susceptibilidad al deslizamiento. Yacimiento Pilón. (Escala original: 1:2 000. Formato ráster, tamaño de píxel: 5x5 m)

Conclusiones y recomendaciones

CONCLUSIONES

En función de la evaluación realizada en el Yacimiento Pílon se elaboró un procedimiento geotécnico donde se evaluaron las rocas que constituyen el Yacimiento Pílon.

Se determinó la influencia del macizo rocoso y los grupos lito-estructurales, condiciones estructurales y geotécnicas, el uso actual y su incidencia en el surgimiento y desarrollo de deslizamientos a partir de la situación ingeniero-geológica caracterizándose por una alta complejidad tectónica y la presencia de tres 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.

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 materiales para la construcción.

Se obtiene el mapa de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en la cantera de piedra para materiales de construcción en el

Yacimiento Pilón partiendo de los procedimientos de análisis de susceptibilidad de los taludes por desarrollo de deslizamientos utilizados en esta memoria aplicando un SIG, pues 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 material, sino en la construcción de viales, escombreo y en el proceso de cierre de minas.

RECOMENDACIONES.

1. Aplicar lo resultados durante el proceso de planificación minera y toma de decisiones en el yacimiento Pilón y en los restantes yacimientos a explotar por la Empresa Materiales de Construcción Holguín, 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 bibliográficas

- ALEOTTI, P., Y OTROS. 2000.** Debris Flow Hazard and Risk Assessment Using Airbone Laser Terrain Mapping Techniques (ALTM). [aut. libro] Tomas Telford. [ed.] N. Dixon, M.L. Ibsen A.E. bromhead. *Landslides in research, theory and practice*. London : s.n., 2000, 1, págs. 19-26.
- ALFONSO, H.M. 2005.** *Análisis de susceptibilidad a los movimientos de laderas en la parte oriental de la cuenca del río Almendares y la llanura marina adyacente. Cuba.* s.l. : VI Congreso de Geología y Minería.Simposio de sismicidad y riesgos geológicos, 2005.
- ALMAGUER, Y. 2001.** *Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo rocoso.* ISMM. 2001. pág. 110, Tesis de Maestría.
- ALMAGUER, YURI. 2005.** *Metodología de cartografía de susceptibilidad a la rotura en cortezas lateríticas en el territorio de Moa, Cuba.* Santa Cruz de la Sierra : Memorias del Taller Internacional de Riesgos Geodinámicos y Cierre de Minas, 2005.
- **2005b.** *Métodos de cartografía de susceptibilidad y peligrosidad por el desarrollo de deslizamientos.* s.l. : Memorias del II taller Internacional Ingeotaludes. Moa, 2005b.
- **2005a.** *Valoración de la susceptibilidad del Terreno en yacimientos lateríticos de Moa, Cuba.* Guayaquil : Memorias del Taller Internacional de Peligrosidad y Riesgos por Movimientos de masas, 2005a. Red A4D/CYTED.
- AZATE, A. E: ESCOBAR Y J.B. 1992.** Adquisición de datos para un SIG. Colombia : Proc. 1er. Simposio Internacionalesobre sensores remotos y sistemas de informacion geograficos para el estudio de riesgos naturales, 1992. págs. 449-465.
- BAEZA, C. 1994.** *Evaluación de las condiciones de rotura y la movlidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante.* s.l. : Dpto de Ingeniería del Terreno y Cartografía, 1994. ETSECCPB/UPC.

- BERNKNOPF, R.L., Y OTROS. 1988.** A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation. s.l. : Bulletin International Association of Engineering Geologists, 1988. Vol. I, 25, págs. 39-56.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1976.** *Rock mass classification in rock engineering Exploration for rock Engineering.* s.l. : Proc. Of the Symp, 1976. págs. 97-106.
- BORGA, M., FONTANA, G. Y MARCHI, D. DA ROS Y L. 1998.** Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data. *Environmental Geology.* [Artículo]. 1998.
- BOSQUE, J. SENDRA. 1992.** Sistema de Información Geográfica. Madrid. s.l. : Ediciones Rialp, 1992.
- BOZI, C. 1984.** Considerazioni e proposte metodologiche sulla elaborazione di carte di stabilità. [ed.] Geol. Appl Ed. 1984. págs. 246-281.
- BRABB, E., PAMPEYAN, E.H. Y BONILLA, M.G. 1972.** *Landslide susceptibility in San Mateo County, California. US Geol. Surv. Misc.. Field Studies Map MF 360 Scale 1:62 500. caused by rainfall.* Tsukuba, Japan : Proc. Int. Symp. Erosion, Debris Flows and disaster Prevention., 1972.
- BRABB, E.E. 1984.** Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. Toronto : Proc. 4th Int. Symp. on landslides, 1984. Vol. I, págs. 307-324.
- BRABB, E.E. Y HARROD, B. L. 1989.** Landslides : extent and economic significance, Belkema, Rotterdam. 1989. pág. 385p.
- BRACKEN, WEBSTER Y. 1990.** Information technology in Geography and planning, Including principles of GIS. London, Routledge. 1990. pág. 444.
- BRASS, A. Y G, WADGE Y A.J. READING. 1989.** Designing a Geographical Information System for the prediction of landslide potential in the West Indies. London : Proc. Economic Geology and Geotechnics of active Tectonic Regions. University College, 1989.

- BROWN, E.T. 1970.** *Strength of models of rock with intermittent joints*. s.l. : J. Soil Mech.Foundn Div., 1970. págs. 1935-1949. ASCE 96.
- BURROUGH, P.A. 1988.** Principles of geograohical Information system for land resources assessment, Oxford. s.l. : Oxford University Press, 1988. pág. 194.
- BURTON, I., KATES, R. W. Y WHITE, G. F. 1968.** *The human ecology of extreme geophysical events*. Department of Geography, University of Toronto. Toronto, Canadá : Natural Hazard Research, , 1968. Working Paper 1.
- C. HOMERO FUENTE, ENEIDA C. MATOS Y S SILVIA CRUZ. 2005.** *El Proceso de Investigación Científica desde un pensamiento Sistémico Dialéctico Hermenéutico. Cuba*. Centro de Estudios de la Educación Superior "Manuel F. Gran", Universidad de Oriente. Santiago de Cuba : s.n., 2005.
- CABRERA, J. 2005.** *El catastro ingeniero-geológico y geoambiental de la provincia de Pinar del Río, una herramienta novedosa en la gestión de información georefernciada*. s.l. : VI Congreso Cubano de Geología y Minería. Geomática., 2005.
- CAMPOS, ARMANDO. 2000.** *Educación y Prevención de Desastres*. UNICEF, FLACSO, LA RED. Perú : s.n., 2000. pág. 81.
- CAMPUS, S., FORTALI, F. Y SCAVIA, C. 2000.** Preliminary study for landslide hazard assessment: GIS techniques and a multivariate statical approach. [aut. libro] Tomas Telford. [ed.] A.E. Bromhead and M.L. Ibsen. *Landslides in research, teory and prantice*. London : s.n., 2000, págs. 621-626.
- CARDONA, OMAR DARÍO. 1999.** *Environmental Management and Disaster Prevention: Holistic risk*. Ingleton J. (Ed), Tudor Rose. London : IDNDR, 1999.
- . 1996.** *Manejo ambiental y prevención de desastres: dos temas asociados. Ciudades*. USAID. Perú : La Red, 1996.
- CARMENATE, J.A. 1996.** *Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas para la zonificación de los fenómenos geológicos en áreas urbanas y suburbanas de la*

- ciudad de Moa*. s.l. : Tesis de Maestría. Departamento de Geología, ISMM. 108p, 1996.
- CARRARA, A. 1983b.** Geomathematical assesment of regional landslide hazard. s.l. : 4th Int. Conf. Applic. Stat. Porbabil in Soil and Strutc. Eng. Firenze, 1983b. págs. 3-27.
- . **1988.** Landslides hazard mapping by statical methods. A black box approach. Workshop on natural Disaters in European Mediterranean Countries, Perugian. 1988. 21, págs. 187-222.
- . **1983 a.** Multivariate models for landslide hazard evaluation. s.l. : Math Geology, 1983 a. 15, págs. 403-426.
- CARRARA, A. Y GUZZETTI, F. 1995.** *Geographical infromation system in assesing natural hazards*, Kluwer, Drdrecht, The Netherlands. 1995. págs. 135-175, Artículo.
- CARRARA, A., Y OTROS. 1978.** Digital terrain analysis for land evaluation. s.l. : Geol. Appl. ed Idrogeol, 1978. 13, págs. 69-127.
- CARRARA, A., Y OTROS. 1990.** GIS and multivariate models for landslide hazard evaluation. Milano : ALSP 90 ALPINE Landslide pRCTICAL SEMINAR . 6TH INT.. cONF. AND FIELD. Workshop on landslide, 1990. págs. 17-28.
- CARRARA, A., Y OTROS. 1991.** *GIS techniques and statical models in evaluating landslide hazard*. s.l. : Earth Surf. Proc. And Landforms, 1991. 16(5).
- CARRARA, A., Y OTROS. 1995.** GIS technology in mapping landslide hazard. [aut. libro] Dordrecht Kluwer. [ed.] E. Catalano A. Carrara. *Geographical information system in assessing natural hazards*. 1995, págs. 135-175.
- CARREÑO, B., GARCÍA, M. Y ALVELO., N. 2005.** *Pronóstico de deslizamientos con el empleo de sistemas computarizados*. s.l. : Vi Congreso Cubano de Geología y Minería. Geomática, 2005.
- CASTELLANOS, E. 2005.** *Processing SRTM DEM data for national landslide hazard assesment*. s.l. : VI Congreso De Geología y Minería. Geomática, 2005.

- CEBRIAN, D. MARCK Y J.A. 1986.** Sistemas de Información geográficas. Funciones y estructuras de datos. s.l. : Estudios geográficos, 1986. págs. 277-299.
- CHACON, J. Y FERNÁNDEZ, C. IRIGARAY Y T. 1992.** Metodología para la cartografía regional de movimientos de ladera y riesgos asociados mediante un SIG. La Coruña : II Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, 1992. Vol. I, págs. 121-133.
- CHANG, J.L., Y OTROS. 2005.** *Análisi de riesgos por deslizamientos. Contribución a partir del estudio de la migración de los radioelementos naturales.* s.l. : V. Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente, 2005.
- CHANG, JL, Y OTROS. 2005.** *Análisis de riesgos por deslizamientos. Contribución a partir del estudio de la migración de los radioelementos naturales.* s.l. : V Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente, 2005.
- CHOUBEY, V.D. Y LITORIA, P.K. 1990.** Terrain clasification and hazard mapping in Kalsi-Chakrata area. Garhwal Himalaya : ITC-Journal, 1990. 1, págs. 58-66.
- CHUNG, C.F., FABBRI, A.G. Y WESTEN, C.J. VAN. 1995.** Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. [aut. libro] Kluwer Academic Publishers. [ed.] F Guzzetti A. Carrara. *Geographical Information Systems in Assesing Natural Hazards.* 1995, págs. 107-133.
- CHUNG, C.F.Y FABBRI, A.G. 1993.** The representation of geoscience information for data integration. 1993. págs. 122-139.
- CHUNG, Y. LECKERC Y C.F. 1994.** A quantitative technique for zoning lanslide hazard. 3.5 Quebec : Int. Ass. Math. Gol, 1994. págs. 87-93.
- CHUY, T.J., Y OTROS. 2005.** *Fenómenos naturales en el municipio Guantánamo. Valoración e impactos negativos.* s.l. : VI Congreso Cubano de Geología y Minería. Simposio de Sismicidad y riesgos geológicos, 2005.
- COMPAGNUCCI, J.P. Y OTROS, Y. 2001.** recalce de las fundaciones de la escuela CEPM-40. Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de

Andalucía. [En línea] 2001.
www.carrteras.org/ccaa/normativa/carreteras/andalucia/firmes/apartados/anejo2.htm.

COROMINAS, J. 1987. *Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera*. Madrid : Serie Geología Ambiental, 1987. págs. 193-201, artículo. IGME.

—. **1992.** Movimientos de ladera: predicción y medidas preventivas. [1er Congreso Iberoamericano sobre técnicas aplicadas a la gestión de emergencias para la Reducción de Desastres Naturales]. Valencia : s.n., 1992.

CRUDEN, D.M. Y VARNES, D.J. 1996. *Landslide types and processes*. National Academy Press. Washington, DC : Turner, A.A.K. and Schuster, R. L., 1996. págs. 36-75, reporte especial.

DHAKAL, S. Y ANIYA, T. AMADA Y M. 2000. Databases and Geographic Information Systems for Medium Scale Landslide Hazard Evaluation: an Example from Typical Mountain in Nepal. [aut. libro] Tomas Telford. [ed.] N. Dixon and M.L. Ibsen A.E Bromhead. *Landslides in research, theory and practice*. 2000, Vol. I, págs. 457-462.

DONATI, L. Y TURRINI, M.C. 2002. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina, Italy). *Engineering Geology*. 2002, 63, págs. 277-289.

ESCOBAR, E. M. 2005. *Variantes geofísicas en la solución de algunas tareas de valoración de la vulnerabilidad sísmica*. La Habana : VI Congreso Cubano de Geología y Minería. Simposio de Sismicidad y riesgos Geológicos, 2005.

FEBLES, D. Y RODRÍGUEZ, J. 2005. *Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de la República de Cuba a escala 1: 250 000*. s.l. : Vi Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos, 2005.

FEIZNA, B. BODAGHI Y S. 2000. A statical approach for logical modelling of a landslide hazard zonation in shahrood drainage basin. [aut. libro] Tomas Telford. [ed.] N.

- Dixon, and M.L. Ibsen A.E. Bromhead. *Landslides in research, theory and practice*. London : s.n., 2000, Vol. II, págs. 549-552.
- FERRER, M. 1987.** *Deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas*. Madrid : s.n., 1987. págs. 175-192. IGME.
- GARCÍA, COROMINAS YB. 1997.** 1997.
- GONZÁLEZ, B.E. RAYNAL, Y OTROS. 2005.** *Riesgos geológicos y degradación ambiental: el caso del asentamiento urbano del Mariel, Cuba Occidental*. s.l. : VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de Sismicidad y Riesgos Geológicos, 2005. pág. 23.
- GUARDADO, Y. ALMAGUER. Y R. 2001.** *Evaluación de riesgos por deslizamientos en el Yacimiento Punta Gorda. Moa, Holguín*. s.l. : Revista Minería y Geología., 2001. págs. 1-12.
- GUASH, FERNANDO. 1992.** *Evolución del conocimiento de los terremotos como fenómenos natural y su influencia en el Tercer Mundo*. Santiago de Cuba : Fondos Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. CITMA, 1992. pág. 19.
- GUPTA, B.C. JOSHI Y R.P. 1990.** Landslide hazard Zoning Using the GIS Approach-A Case Study from the Ramganga Catchment, Himalayas. *Engineering Geology*. 1990, 28, págs. 119-131.
- HAMMOND, C.J., PRELLWITZ, R.V. Y MILLER, S.M. 1992.** Landslide hazard assessment using Monte Carlo simulation. Christchurch, New Zealand : Proc. 6th Int. Symp. on Landslide, 1992. 2, págs. 959-964.
- HANSEN, A. 1984.** Landslide hazard analysis. [aut. libro] John Wiley and Sons. [ed.] D. Brundsen and D. B. Prior. *Slope Stability*. 1984, págs. 523-602.
- HANSEN, C.A.M. FRANK Y A. 1991.** *Characterization and mapping of earthquake triggered landslides for seismic zonation*. Stanford, California : Proceed IV. Int. Conf. Seismic Zonation , 1991. págs. 149-195, Artículo.

- HECKERMAN, D. 1986.** Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factor. [ed.] L.N. Kanal and J.F. Lemmer. Elsevier : Uncertainty in Artificial Intelligence, 1986. págs. 167-196.
- HOEK, E. 1968.** *Brittle failure of rock. Rock Mechanics in Engineering Practice.* London : s.n., 1968. págs. 99-124.
- . **1990.** *Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown criterion.* s.l. : Intl. J. Rock Mech. and Mining Sci. and Geomechanics Abstracts, 1990. págs. 227-229.
- . **1994.** *strength of rock and masses.* s.l. : ISRM New Journal 2 (2), 1994. págs. 4-16.
- HOEK, E. Y BROWN, E.T. 1980.** *Empirical strength criterion for rock masses.* s.l. : J. Geotech. Engng Div., 1980. págs. 1013-1035, artículo. ASCE.
- . **1988.** *The Hoek-Brown failure criterion update.* Dept. Civil Engineering, University of Toronto. s.l. : Proc 15 th Canadian Rock Mech. Symp., 1988. págs. 31-38.
- . **1980.** *Under ground Excavations in Rock.* London : Instn. Min Metal, 1980.
- HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C. Y CORKUM, B. 2002.** *El Criterio de rotura de Hoek-Brown.* 2002. pág. 8, Artículo.
- HOEK, E., KAISER, P.K. Y BAWDEN, W.F. 1995.** *Support of unerground excavations in hard rock.* Rotterdam : s.n., 1995.
- HOEK, E., WOOD, D. Y SHAH, S. 1992.** *A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses.* Geotech Soc. s.l. : Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock mech Eurock 92, 1992. págs. 209-214.
- HUMA, RADULESCO Y I. 1978.** Automatic production of thematic maps of slope instability. s.l. : Bulletin International Association of Engineering Geologist, 1978. 17, págs. 95-99.
- HUTCHINSON, J.N. 1988.** Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. [ed.] Ch Bonnard. *Morphological and*

- geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. [5th Int. Congrest]. Laussane, EE.UU : s.n., 1988. pág. 35.
- IAEG, ENGINEERING GEOLOGICAL MAPS. A guide to their preparation. 1976.**
UNESCO. París : International Association of Engineering Geologist, 1976. pág. 79.
- IGLESIAS, ROLANDO RAMOS, PEREZ, LILIAN Y BAUXA, ANGEL CORPASF. 2010.**
Informe Ingeniero Geológico del Yacimiento Pilón. Ingeniería Geológica, ENIA. 2010. pág. 18.
- IRIGARAY, C. 1990.** *Cartografía de Riesgos Geológicos asociados a movimientos de ladera en el sector de Colmenar (Málaga)*. Universidad de Granada. 1990. pág. 390, Tesis de Licenciatura.
- **1995.** *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 Monte Frío (Granada)*. Universidad de Granada. 1995. Tesis Doctoral.
- J., CRUDEN D. M Y VARNES D. 1996.** Landslides type and processes. [aut. libro] Turner A. A. K. and Schuster R. L. *Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, Special rept.* Washington : National Academy Press, 1996, págs. 36-75.
- J.A.ZÊZERE, Y OTROS. 2000.** The use of Bayesian Probability for landslide Susceptibility Evaluation. A case study in the area North of Lisbon. [aut. libro] Tomas Telford. [ed.] A.E. Bromhead y M.L. Ibsen N. Dixon. *Landslide in research, theory and practice*. 2000, Vol. III, págs. 1635-1640.
- K.L YIN, T.Z YAN. 1988.** *Statical prediction model for slope instability of metamorphosed rock*. Laussanne : Proceed 5th. Int. Symp. Landslides, 1988. págs. 1269-1272, Artículo.
- KEEFER, D. K. 1984.** *Landslides caused by earthquakes*. Geol. Soc. Am. Bull. 1984. págs. 406-421, artículo.

- KELARESTAGHI, A. 2004.** Investigation of effective Factors on Landslides Occurrence and Landslide Hazard Zonation-Case Study Shirin Rood Drainage Basin, Sari, Iran. [En línea] 20 de 04 de 2004. [Citado el: 6 de febrero de 2014.] http://www.gisddevelopment.net/application/natural_hazard/landslides/ma03003.htm.
- KEMPENA. 2000.** *Estudio de los peligros y riesgos geoambientales en la costa de la ciudad de Moa.* 2000.
- KINGSBURY, P.A., HASTIE, W.J Y HARRINGTON, A.J. 1992.** Regional landslide hazard assessment using a GIS. Christchurch, New Zealand : Proc. 6th Int. Symp on Landslides, 1992. 2, págs. 995-999.
- KOBASHI, M. SUZUKI Y S. 1991.** *Hazard index for judgement of slope stability in the Rokko mountain region.* Graz : Proc.. INTERPRAEVENT, 1991. págs. 2232-233, Artículo.
- LAVELL, ALLAN. 1996.** *Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación, Ciudades en Riesgo.* LA RED, USAID. Lima, Perú : M.A, Fernández (Ed), 1996.
- LEE, H.J., Y OTROS. 2000.** AGIS-Based Regional analysis of the potential for Shallow-Seated Submarine Slope Failure. [aut. libro] Tomas Telford. [ed.] N. Dixon, M.L. Ibsen A.E. Bromhead. *Landslides research, theory and practice.* 2000, Vol. 2, págs. 917-922.
- LEROI, E. 1996.** Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments. Trondheim : 7th Int. Symp on Landslides, 1996.
- LOMTADZE, V.D. 1977.** *Geología aplicada a la ingeniería. Geodinámica aplicada a la ingeniería.* s.l. : Pueblo y Educación, 1977. pág. 560.
- LÓPEZ, J.A. ZINCK H.J. 1991.** *GIS-assisted modelling on soil-induced mass movement hazards: A case study of the upper Coello river basin, Tolima, Colombia.* s.l. : ITC-Journal, 1991. págs. 202-220, artículo.

- LORING, L. Y VARONA, P. 2001.** *Practical Slope-stability analysis using finite-difference codes. Slope stability in surface mining.* s.l. : Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc, 2001. págs. 115-124.
- LUCINI, P. 1977.** The potential landslides forecasting of the Argille Varicolori Scagliose complex in IGM IV SE Map. s.l. : Saviano di Puglia, 1977. 8, págs. 311-316.
- LUZI, A.G. FABBRI L. 1995.** Application of Favourability Modelling to Zoning of Landslide Hazard in the Fabriano Area, Central Italy. 1st [Artículo]. s.l. : Joint European Conference and Exhibition on Geographical Information, The Hague. NL, 1995. págs. 398-403.
- MAHDIVFAR, M.R. 2000.** Fuzzy information processing in Landslide Hazard Zonation and Preparing the computer System. [aut. libro] Tomas Telford. [ed.] N. Dixon and M.L. Ibsen A.E. Bromhead. *Landslides in research, theory and practice.* 2. 2000, págs. 993-998.
- MANTOVANI, F., MASÈ, G. Y SEMENZA, E. 1982.** *Francosità e dinamica fluviale del bacino della Valturcana, Alpago (Belluno).* s.l. : Ann. Univ. Ferrera. Sez, 1982. págs. 29-60, artículo.
- MANTOVANI, F., SOETERS, R Y WESTEN, CJ VAN. 1996.** Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation Europe. *Geomorphology.* 1996, 15, págs. 213-225.
- MASKREY, A. 1994.** *Comunidad y desastres en América Latina: estrategias de intervención. Viviendo en riesgo: comunidades vulnerables y prevención de desastres en América Latina.* LA RED. Bogota : Tercer Mundo Editores, 1994. pág. 355.
- MAYORAZ, F., CORNU, T. Y VULLIET, L. 1996.** *Using Neural Networks to predict Slope Movements. Proc. 7th. Int. Symp. on Landslides, Thronheim.* 1996. págs. 2959-300.
- MICHEL-LEIVA Y OTROS. 2000.** 2000.

- MORGAN, B.W. 1968.** An introduction to Bayesian statical decision process. New York : Ed. Prentive-Hall, 1968. pág. 116.
- MORTON, D.M., Y OTROS. 2003.** *Preliminary soil-slip susceptbilty maps, south-western California.* [OF 03-17.] 2003. USGS.
- MULDER, H.F.H.M. 1991.** *Assesment of landslide hazard. Nederlandense Geografische Studies.* University of utrecht. 1991. pág. 150, PhD Tesis.
- NAGARANJAN, R., Y OTROS. 1998.** Temporal remote sensing data and GIS application in landslide hazard zonation of part of Western ghat, India. s.l. : INT. Jour. Remote Sensing, 1998. págs. 573-585.
- NARANJO, J.L, WESTEN, C.J. VAN Y SOETERS, R. 1994.** *Evaluating the use of training areas in bivariate statical landslide haazard analysis- a case study in Colombia.* s.l. : ITC-Journal, 1994. págs. 292-300, artículo.
- NCGIA., CORE CURRICULUM. 1990.** Tres volúmenes. I Introdution to GIS, II Technical issues in GIS, III Application issues in GIS. Santa Bárbara. s.l. : National Center for Geographic Information and Analysis, 1990.
- NEWMAN, E.B. Y BRABB, A.R. PARADIS Y E.E. 1978.** Feasibility and cost of using a computer to prepare landslide susceptibility maps of the San Francisco Bay region, California. s.l. : US Geological survey Bulletin, 1978. 1443, pág. 29.
- NIEMANN, K.O. Y HOWES, D.E. 1991.** *Applicability of digital terrain models for slope stability assesment.* s.l. : ITC-Journal, 1991. págs. 127-137.
- NOAS, J.L. Y CHUY, T.L. 2005.** *Caracterización de la amenaza sísmicas de la ciudad de Moa, Provincia de Holguín.* s.l. : VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de Sismicidad y Riesgos Geológicos, 2005.
- NOVO. 1988.** 1988.
- OKIMURA, T. Y KAWATANI. 1986.** Mapping of the potencial surface-failure siges on granite mountain slopes. New York : International Geomorphology. Part 1, 1986. págs. 121-138.

- PANDE, GN Y PIETRUSZCZAK, S. 1995.** *Numerical model in geomechanics.* s.l. : Proc. 5th. Int. Symp. on Num. Models in Geomechanic, NUMOG V, Davos, Switzerland, 1995.
- PARZEN, E. M. 1960.** *Model probability theory and its applications.* s.l. : Edición revolucionaria, 1960. pág. 60.
- PEDROSO, E., Y OTROS. 2005.** *Peligros, vulnerabilidad y riesgos geológicos, geofísicos y tecnológicos. Caso de estudio en el municipio Playa.* s.l. : VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y Riesgo geológicos, 2005.
- PENSON, E. 1994.** *Mecánica de suelos. Manuales de Cátedras.* s.l. : UNPHU, 1994. pág. 506.
- PERGALINI, F. Y LUZI, L. 1996.** Applications of statics and GIS techniques to slope instability zonation (1:50000 Fabriano geological map sheet). Soil Dynamic and Earthquake Engineering. 1996. 15, págs. 83-94.
- PRECIOS, MINISTERIO DE FINANZAS Y. 2005.** *Resolución # 7.* 2005.
- RACAMORA, E. 2005.** *Evaluación de los fenómenos de desprendimientos de bloques en las laderas verticales. Casos de estudios.* s.l. : Vi Congreso de Geología y Minería, 2005.
- RADBRUCH-HALL, D.H. Y BATSON, K. EDWARDS Y R.M. 1979.** Experimental engineering geological maps of the conterminous United States prepared using computer techniques. s.l. : Bulletin International Association of Engineering Geologist, 1979. 19, págs. 358-363.
- RANGERS, N., SOETERS, R. Y WESTEN, C.J. VAN. 1992.** *Remote sensing and GIS applied to mountain hazard mapping.* 1992. págs. 36-45.
- REYES, P., Y OTROS. 2005.** *Peligro geológico de la red vial de las provincias orientales para caso de sismos de gran intensidad.* s.l. : VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos, 2005.

- RODRÍGUEZ, ALINA. 1998.** *Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica.* s.l. : Tesis Doctoral. Departamento de Geología.ISMM, 1998.
- RUNQIU, L. YUANGO Y H. 1992.** *logical message model of slope stability prediction in the Three Gorges reservoir area, China.* New Zeland : Proc. 6th Int. Symp. on Landslides, Christchurch, 1992. págs. 977-981, Artículo.
- SANTACANA, N. 2001.** *Análisi 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.* Barcelona : s.n., 2001. Tesis Doctoral.
- SCANVICH, JY, ROUZEAU, n O y Colleau, A. 1990.** *SPOT outil d'aménagement exemple de réalisation par télédétection et analyse multicritère d'une cartographie des zone sensibles aux mouvements de terrain le site de la Paz. Bolive.* s.l. : BRGM Serv. Geol. Nat. Dépt Teled. Orleans Cedex., 1990.
- SHAFFER, G. 1976.** *A mathematical Theory of Evidence.* Princenton N.J. : Princenton University Press, 1976.
- SHINHA, LK, PAUL, RS Y MEHTA, SD. 2004.** Landslide hazard zonation in a part of Giri Basin, Simur District (HP) using Remote Sensing Techniques and GIS. [En línea] 2004. [Citado el: 20 de Noviembre de 2014.] http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazard/landslides/nhls0012a.htm.
- SIRIWARDANE, H.J. Y ZAMAN, M.M. 1994.** *Computer methods and advances in geomechanics.* s.l. : Proc. 8th. Int. Conf. of Computer Met. and Advances in Geomech., Morgantown, USA, 1994.
- SIVAKUMAR, GL Y MUKESH, MD. 2004.** Landslides analysis in Geographic Information Systems. [En línea] 2004. [Citado el: 20 de Noviembre de 2014.] http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazard/landslides/nhls0011.htm

- SOWERS, G. B. 1976.** *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones.* Revolucionaria. 1976. pág. 319. Vol. 2.
- STAKENBORG, J.H.T. 1986.** Digitizing Alpine morphology. A digital terrain model based on a geomorphological map for computer-assisted applied mapping. s.l. : ITC-Journal, 1986. 4, págs. 299-306.
- STEVENSON, P.C. 1997.** An impirical method for the evaluation of relative landslip risk. 1997. págs. 69-72.
- SUÁREZ, J. 1998.** *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.* Colombia : Ingeniería de suleos Ltda, 1998. pág. 547.
- TANGESTANI, M.H. 2004.** Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma operation in a GIS, Kakan catchment area, Iran. *www.gisdevelopment.net*. [En línea] 2004. [Citado el: 20 de Noviembre de 2014.] http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazard/landslides/mi03040.htm.
- THURSTON, M. DREGG Y N. 2000.** Transferability and terrain reconstruotiuon within a GIS Landslides hazard Mapping model: Derbbyshjire Peak District. [aut. libro] Tomas Tolford. [ed.] N. Dixon,M.L Ibsen A.E. Bromhead. *Landslides research, theory and practice*. 2000, Vol. III, págs. 961-968.
- ULLOA, D. Y PUERTO, J.A. DEL. 2003.** *Identificación de los peligros geólogo-geomorfológicos de la cuenca de Santiago de Cuba.* La Habana : W. Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. V Congreso Cubano de Geología y MInería, 2003.
- VALADAO, P., GASPAR, J.L. Y G. QUEIROZ, T. FERREIRA. 2002.** *Landslides map of San Miguel Island, Azores archipiélago.* European Geophysical Society. s.l. : Natural Hazard and Earth System Sciences, 2002. págs. 51-56, artículo.
- VALLEJO, LUIS I. GONZÁLEZ DE. 2002.** *Ingeniería Geológica.* s.l. : Ed. Pearson Educación, 2002. pág. 744.

- VARNES, D.J. 1978.** *Slope movement types and processes. In: Landslides analysis and control.* 1978. págs. 11-33.
- VARNES, J. D. 1984.** *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice.* París : UNESCO, 1984. Natural Hazards.
- VEGA, M.B. 2005.** *Obtención del mapa de erosión de suelos a escala 1: 250 000 en el ambiente de un SIG.* s.l. : VI Congreso Cubano de Geología y Minería. Geomática , 2005.
- VIRBERG, J. HARTLEN Y L. 1988.** Evaluation of landslide hazard. [aut. libro] Bonnard. *5th International Congress on Landslides.* Lausanne : s.n., 1988, págs. 1037-1057.
- VITA-FINZI, W. MURPHY Y C. 1991.** Landslides and seismicity: an application of remote sensing. Denver : Proc. 8th Thematic Conference on Geological Remote Sensing, 1991. 2, págs. 771-784. ERIM.
- VULLIET, L. Y MAYORAZ, F. 2000.** Coupling Neural Networks and Mechanical Models for a better Landslide Management. [aut. libro] Tomas telford. *Landslides in research, theory and practice.* 2000, págs. 1521-1526.
- W.RODRÍGUEZ Y VALARANCE, R.M. 2005.** *Aplicación de un SIG para evaluar el peligro de inundaciones.* s.l. : VI Congreso Cubano de Geología y Minería. Geomática, 2005.
- WARD, T. J. Y SIMON, LI RUH-MING Y D.B. 1982.** Mapping landslide hazard in forest watershed. s.l. : Proc. of the American Society of Civil Engineering, 1982. 108, págs. 319-324.
- WESTEN, C. J. VAN. 1993.** Application of Geografic Information System to landslide hazard zonation. s.l. : Enschede, 1993. 15, pág. 45. ITC.
- WESTEN, C.J. VAN Y DIJKE, J.J. VAN. 1990.** *Rockfall hazard: a geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS.* s.l. : ITC-Journal, 1990. págs. 40-44, Artículo.

- WESTEN, VAN. 1994.** GIS in landslide hazard zonation: areview, with examples from the Andes of Colombia. [ed.] M.F. Price and D.I Heywood. 1994. págs. 135-165.
- WP/WLI. 1993.** Multilingual landside glosssary. [ed.] The canadian Geotechnical society. s.l. : Bitech Publishers Ltd, 1993.
- WU, Y., K.YIN Y Y.LIU. 2000.** Information analysis System for Landslides hazard Zonation. [aut. libro] Tomas telford. [ed.] N. Dixon, M.L. Ibsen A.E. bromhead. *Landslide research, theory and practice.* 2000, Vol. III, págs. 1593-1598.
- YIN, T. YAN Y K. 1987.** Distribution regularity of landslidess and prediction of slope instability nearby Xuyang. Han river. s.l. : Earth Science Journal of China University of Geosciences, 1987. págs. 631-638.
- YIN, T.Z. YAN Y K.L. 1988.** Statical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. Lausanne : Proceed 5th Int. Symp.. Landslides, 1988. 2, págs. 1269-1272.
- ZADEH, L.A. 1978.** Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy and sets sistems. 1978. 1, págs. 3-28.
- . 1965.** Fuzzy Sets. IEEE Information and Control. 1965. 8, págs. 338-353.