

**MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
MOA**

**TESIS DE MAESTRIA EN
GEOMECANICA**

**TITULO:
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE
TALUDES A PARTIR DE LA
EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL
MACIZO SERPENTINITICO DE MOA.**

Autor: Ing. Yuri Almaguer Carmenates.

Tutor: Dr. Rafael Guardado Lacaba.

**2001
Año de la Revolución Victoriosa en el Nuevo Milenio**

Índice.

	Pág.
Introducción.	
Capítulo I. Características generales de la zona de estudio.	1
1. Características físico geográficas.	3
2. Evolución geológica regional.	8
3. Caracterización morfotectónica.	11
4. Características geológicas del yacimiento Punta Gorda.	
Capítulo II. Metodología de los trabajos geomecánicos desarrollados en el área de estudio.	
1. Metodología del análisis estructural.	16
2. Metodología de evaluación de las rocas meteorizadas.	24
3. Metodología de clasificación geomecánica del macizo rocoso.	28
4. Métodos de calculo de estabilidad de los taludes.	34
Capítulo III. Resultados de la evaluación geomecánica. Aplicación en estabilidad de taludes en el yacimiento Punta Gorda.	
1. Análisis estructural.	44
2. Análisis de la meteorización.	59
3. Estudio de las propiedades acuíferas de las rocas.	63
4. Evaluación geomecánica del macizo rocoso.	66
5. Análisis de estabilidad de taludes en el yacimiento Punta Gorda.	71
Conclusiones y Recomendaciones.	79
Bibliografía.	82
Definiciones de términos utilizados en el texto.	95
Simbología.	97

INTRODUCCION

Introducción

Los yacimientos ferroniquelíferos cubanos son genéticamente de tipo residual. Formados por una corteza de intemperismo en forma de manto que descansa sobre la roca madre. Estas cortezas se encuentran desarrolladas sobre una cadena montañosa compuesta por rocas ultrabásicas serpentinizadas, en menor grado por rocas básicas y efusivas. Entre los yacimientos principales tenemos los de Pinares de Mayarí y los de Moa, constituyendo nuestro país uno de los de mayores reservas de níquel a nivel mundial.

Durante la explotación de estos yacimientos se ha presentado desde los inicios de la minería, la problemática con los deslizamientos dado por las condiciones climáticas (abundantes lluvias), geológicas (intensos procesos de meteorización y tectónicos del macizo rocoso), ingenieriles del suelo (suelos con bajo ángulo de fricción, baja cohesión) influyendo negativamente en las condiciones ambientales de los yacimientos y el constante riesgo de los trabajadores y equipos.

Aunque en estos años se han realizado investigaciones en cuanto a la caracterización de estos fenómenos de movimientos de masa teniendo en cuenta las condiciones ingenieriles de los horizontes de suelo, se le ha prestado poca atención a las condiciones tectónicas especialmente a los sistemas de grietas los cuales influyen decisivamente sobre la tipología, dirección y dimensiones de los deslizamientos. De manera que en el presente trabajo se trata de profundizar en el estudio de las discontinuidades presentes en el macizo serpentinitico para esclarecer mejor los mecanismos de estos fenómenos.

Planteamiento del problema:

El problema que ocupa la presente investigación es el insuficiente conocimiento de los factores geomecánicos que influyen en la estabilidad de los taludes del macizo serpentinitico.

Justificación y viabilidad.

La investigación está justificada por las premisas anteriores, puesto que el desconocimiento de los factores que condicionan las inestabilidades y/o causan los movimientos de masa trae

como consecuencia no tomar las medidas correctas de prevención y corrección en los taludes afectados por los deslizamientos, manteniéndose latente los riesgos sobre los trabajadores y el equipamiento minero, además de contribuir al deterioro del entorno, y en ocasiones contaminar las menas industriales.

De manera que en el trabajo es importante tener en cuenta un estudio integral de las discontinuidades tanto a nivel macroscópico como microscópico, determinando las principales direcciones de esfuerzos que someten al macizo serpentinitico, determinar la calidad del mismo en base a clasificaciones geomecánicas para análisis de estabilidad de taludes, así como determinar los factores de seguridad de los taludes teniendo en cuenta los principales sistemas de discontinuidades.

Novedad científica.

La novedad científica está dada en el hecho de que por primera vez se realiza un análisis de los deslizamientos en corteza laterítica eluvial en el yacimiento Punta Gorda y quizá en nuestro país teniendo en cuenta los sistemas de discontinuidades presentes en el macizo serpentinitico.

Importancia.

Los resultados tendrán un incalculable valor; en lo práctico, porque permitirá a los directivos y demás trabajadores tomar medidas mas precisas frente a la ocurrencia de estos fenómenos, planificar la minería teniendo en cuenta las particularidades de los tipos de roturas frente a la posición y dimensión de los taludes, proporcionar un conjunto de métodos prácticos para el estudio de los deslizamientos, etc; y en lo social, contribuye a ampliar los conocimientos de los trabajadores e investigadores sobre la naturaleza de los deslizamientos en corteza laterítica eluvial además de sensibilizarlos a prestarle mejor atención a los mismos para disminuir los riesgos en la minería del níquel.

Selección del área de la investigación.

El área seleccionada para la investigación se encuentra enclavada en el Municipio de Moa, específicamente entre las coordenadas:

X: 692 500 – 705 000

Y: 217 000 – 225 000

Definición de las variables.

Para el estudio geomecánico de los deslizamientos y analizar la estabilidad de los mismos en el área del yacimiento, es necesario usar las siguientes variables:

- J_v . Número de grietas por metro cúbico.
- RQD y RMR. Índices de calidad del macizo rocoso.
- SMR. Índice geomecánico para taludes.
- C. Cohesión del suelo.
- φ . Angulo de fricción del suelo y de las superficies de discontinuidades.
- Ψ . Angulo de los taludes.
- τ . Resistencia al corte del suelo y/o de las discontinuidades.
- α . Acimut de buzamiento de las familias de grietas y de los taludes.
- β . Buzamiento de las familias de grietas.
- FS. Factor de seguridad de los taludes.

Objeto: en la investigación se trata como objeto *los taludes* presentes en el macizo serpentínico de Moa.

Objetivo general:

Evaluar la estabilidad de los taludes a partir de un análisis geomecánico para profundizar en el conocimiento de los deslizamientos.

Objetivos específicos:

1. Evaluar estructuralmente el macizo rocoso.
2. Evaluar la meteorización y las condiciones hidrogeológicas desde el punto de vista ingeniero geológico.
3. Clasificar los taludes desde el punto de vista geomecánico.

4. Evaluar el factor de seguridad de los taludes.

Hipótesis:

Conociendo las características estructurales, la clasificación del perfil de meteorización, las condiciones hidrogeológicas, la calidad geomecánica del macizo rocoso, así como los mecanismos de rotura de los taludes y el factor de seguridad de los mismos se puede conocer la naturaleza de los deslizamientos de terreno con vista a mitigar su ocurrencia o corregir los taludes afectados por estos.

Análisis bibliográfico.

De acuerdo a las características de la investigación que se presenta, las bibliografías consultadas se refieren a los primeros trabajos realizados en cuanto a estudios del agrietamiento desde el punto de vista geomecánico y análisis estructural, aspecto importante a considerar en este caso y a los trabajos relacionados con las clasificaciones geomecánicas aplicadas a la evaluación de estabilidad de taludes.

Actualmente se piensa en la mecánica de rocas como una disciplina moderna dentro de la ingeniería, sin embargo en 1773, Coulomb incluye resultados de ensayos en rocas de Bordeaux en un artículo escrito en la Academia Francesa en París. En 1884, ingenieros franceses comenzaron la construcción del canal de Panamá y fue tomado por *US Corps Army of Engineering* en 1908. En el mismo siglo entre 1910 y 1964, 60 deslizamientos fueron registrados en los cortes a lo largo del canal sin embargo estos no fueron analizados en términos geomecánicos; en trabajos posteriores por *US Corps Army of Engineering* mostraron que los deslizamientos fueron controlados por discontinuidades estructurales y se aplicaron conceptos modernos de análisis de estabilidad de mecánica de rocas.

En 1920, Josef Stini comenzó a impartir la llamada *Geología Técnica* en la Universidad Técnica de Viena. Otros notables científicos e ingenieros de estas disciplinas son Von Karman (1911), King (1912), Griggs (1936), Idel (1936), Terzaghi (1945), trabajaron en fracturas de materiales rocosos. En 1921, Griffith propuso su teoría de fallo de materiales

frágiles y en 1931, Bucky comenzó a usar la centrífuga al estudio de fallos en modelos de minas bajo carga gravitacional simulada.

El desarrollo formal de mecánica de rocas como una disciplina ingenieril se da en el período de los años 60. Stini fue uno de los pioneros de mecánica de rocas en Europa y enfatizó la importancia de las discontinuidades estructurales en el control y comportamiento de las masas rocosas.

Algunos acercamientos al estudio del agrietamiento fueron realizados por McMahon (1971), Maranhas (1974), Zambak (1977), quienes usaron los métodos estadísticos para describir los sistemas de grietas asumiendo distribuciones binormales del rumbo y el buzamiento de las grietas.

En cuanto a tipologías de movimientos gobernados por condiciones geomecánicas se han propuesto varias clasificaciones a partir de Collin A. (1846), algunas con enfoque particular y otras más generales, diferenciándose además por las bases y objetivos.

La clasificación de Varnes D. J. (1958), tiene un enfoque ingeniero geológico. Estableció tres grandes tipos: caídas, desplazamientos (terrenos consolidados) y flujos (terrenos no consolidados) y un cuarto grupo de movimientos complejos sin establecer tipos.

La división en caídas, desplazamientos y flujos fue utilizada por Howe E. (1909), como subdivisiones de grupos formados por terrenos detríticos, consolidados y mixtos; el contenido de agua también fue considerado por Terzaghi (1925), para clasificar los movimientos pero el gran aporte de Varnes fue su ordenamiento matricial, la representación gráfica y la asignación de velocidades, que permite contemplar de forma sencilla las relaciones y evoluciones de los diferentes tipos, contribuyendo y sirviendo de base a posteriores propuestas y análisis.

García Y. A. (1966), propone una clasificación basada en la de Varnes, por considerar que esta se ajustaba mejor al objetivo buscado: rápida identificación del movimiento, de su

peligrosidad y posible estimación de los volúmenes movilizados. Incluyó algunos tipos frecuentes en España, desplegó en la representación matricial algún otro y tras laboriosa búsqueda y discusiones adoptó nombres castellanos fáciles de retener por su significado y gráficos de los mismos.

Zaruba Menel (1969), propone una clasificación estableciendo cuatro tipo de movimientos de terrenos: movimientos de laderas de depósitos superficiales, deslizamientos en rocas pelíticas (arcillas, margas, argilitas, pizarras arcillosas), movimientos de laderas en rocas compactas y movimientos especiales.

En 1978, Varnes introduce a su clasificación dos nuevos grupos: vuelcos (toppling) y deslizamientos laterales (spreads), desarrolla mas los movimientos complejos, conserva la presentación y no incluye a algunos tipos la velocidad. Tiene la gran virtud de presentar fenómenos de laderas (movimientos, deformaciones, evoluciones) que afectan a grandes masas que no habían sido relacionadas de forma con el conjunto de movimientos de laderas y que explican y aclaran importantes procesos previos o de evolución y acomodamiento de las masas movilizadas.

En cuanto a clasificaciones geomorfológicas, existen numerosos intentos que tratan de relacionar la geometría y el tipo de sostenimiento, pero en ninguna de ellas se tiene en cuenta la resistencia de la masa rocosa y las características de la juntas. Selby (1980), propuso la clasificación RMS (*Rock Mass Strength*) cuyo objetivo declarado era proveer una base para entender los elementos de las masas rocosas que les proporcionan resistencia a los procesos de meteorización y erosión y que fuera universalmente aplicable de forma de establecer una base común de medición. Según Selby el RMS (1987), se obtiene a partir de asignaciones numéricas a los parámetros: resistencia de la roca matriz, meteorización, espaciamiento de las juntas, orientación de las juntas, apertura, continuidad y flujo de agua (similares a los de la primera versión del RMR).

Una clasificación general cuantitativa de los niveles de riesgo para carreteras producidas por un eventual corrimiento fué propuesta por Hunt (1992). Una clasificación similar de

riesgos para el desarrollo urbano en la región de Sydney fue establecida por un comité de la Sociedad Geomecánica Australiana (Walker et al, 1985).

Stevenson (1977), desarrolló en Tasmania una clasificación semicuantitativa estudiando taludes arcillosos. La misma ha tenido cierta difusión mundial y es citada por Varnes (1984), en un documento de Naciones Unidas y por la PIARC (1995) en un “Informe sobre reducción del efecto de los riesgos naturales sobre carreteras”. La misma se establece en base a los índices de plasticidad, nivel freático, ángulo del talud, existencia de corrimientos y el uso humano del terreno. Se obtiene el Coeficiente de Riesgo (R) y solo es aplicable a taludes en suelos.

Bieniawski en 1973, presentó un nuevo sistema de clasificación de macizos rocosos mediante el índice RMR (*Rock Mass Rating*). En una segunda versión en 1976 y 1979 estableció la forma actual. El índice numérico del macizo rocoso RMR es independiente de la estructura a construir y se obtiene sumando cinco parámetros: resistencia de la roca matriz, RQD, frecuencia de las juntas, estado de las juntas y agua dentro del macizo rocoso. De este valor hay que restar un valor de ajuste, que es función de la orientación de las discontinuidades, definido cualitativamente y que tiene valores diferentes según se aplique a túneles, taludes o cimentaciones. El resultado final es el índice RMR, que puede variar entre 0 y 100, clasificando los macizos rocosos en cinco clases. Esta clasificación es muy conocida y se aplica sistemáticamente para muchos estudios de túneles, conjuntamente con la clasificación de Barton, 1974, pero hay muy pocas referencias publicadas sobre la aplicación de la clasificación del RMR a los taludes.

En la misma se establece un factor de ajuste de acuerdo a la orientación de las discontinuidades en caso de taludes, pero no existe ninguna orientación sobre la definición de cada clase. Probablemente la razón para esta falta de uso sea el elevado valor del factor de ajuste que puede alcanzar 60 puntos sobre un total de 100 (Romana, 1997). cualquier error en la valoración de este factor superará con mucho la posible precisión obtenida mediante una valoración cuidadosa de los parámetros de la masa rocosa y el trabajo de clasificación resultará difícil y arbitrario.

La bibliografía referente a la temática se orienta en dos direcciones principales, por un lado en la búsqueda de un ángulo de talud estable y por otro en el uso de los valores de cohesión y rozamiento recomendados por la clasificación. En general los autores no especifican los criterios para la selección del factor de ajuste, lo que impide la verificación de sus resultados.

Respecto a la búsqueda del ángulo de talud estable la primera referencia publicada del uso del RMR para la estabilidad de taludes fue la de Laubscher (1975), proponiendo una relación entre el RMR y el ángulo de talud estable aplicable en cortas mineras en Sudáfrica para alturas inferiores a 50 m. Hall (1985), utilizando un inventario de taludes inestables propuso una correlación gráfica entre los valores del RMR y el ángulo de talud estable, para alturas inferiores a 20 m y valores del RMR superiores a 20. Orr en 1996 presentó un excelente resumen del uso del RMR en taludes según la práctica en Sudáfrica, Australia y Nueva Zelanda (Romana, 1997).

Respecto a la forma de rotura Robertson (1988), utilizando un valor modificado del RMR estableció que para valores del RMR superiores a 40 la estabilidad del talud está gobernada por la orientación y la resistencia al corte de discontinuidades, mientras que para valores del RMR inferiores a 30 la rotura puede aparecer dentro de la masa rocosa, con independencia de la orientación de las juntas.

Ayala et al (1988), presentaron un estudio sobre al “Estabilidad de taludes en la minería de lignito a cielo abierto de España” donde comprobaron la validez de los valores propuestos por Bieniawski en 1979, para la cohesión y rozamiento de la masa rocosa mediante el cálculo del coeficiente de seguridad de taludes estables.

Romana (1985), propone la clasificación SMR para taludes. Es un método de determinación de los factores de ajuste adecuados para aplicar la clasificación RMR de Bieniawski a los taludes. El índice SMR para la clasificación de taludes se obtiene del RMR sumando un factor de ajuste, que es función de la orientación de las juntas y un factor de excavación que depende del método utilizado.

En relación a investigaciones realizados en la zona de estudio, se puede decir que los trabajos geomecánicos se han encaminado en una dirección, o sea, en la evaluación geomecánica de los macizos rocosos aplicados a obras subterráneas y muy poco al estudio de laderas y taludes.

Dentro de las investigaciones realizadas en la región de estudio relacionadas con la temática podemos encontrar dos grandes grupos, uno dirigidos al análisis de estabilidad de macizos a partir de la aplicación, entre otros métodos, de las clasificaciones geomecánicas y un segundo grupo dirigido al análisis de la estabilidad de terrenos a partir de métodos geotécnicos.

Del primer grupo podemos citar algunos en los cuales se ha realizado la aplicación de las clasificaciones geomecánicas (RMR, Q, RQD), a partir del estudio del agrietamiento y propiedades geomecánicas de las rocas con vista a la determinación de la estabilidad de excavaciones subterráneas tales como: “Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la Mina Merceditas” (Cartaya M., 1996), “Estudio de la geometría del agrietamiento de la Mina Merceditas y su estabilidad” (Falero, 1996), “Acción de la presión minera en las minas de cromo” (Mondejar O., 1996), “Elección de método de arranque a partir de las clasificaciones geomecánicas de macizos” (Noa, 1996), “Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la región oriental de Cuba” (Cartaya M., 2001), entre otras.

Del segundo grupo encontramos trabajos referidos al análisis del fenómeno de meteorización desde el punto de vista geotécnico, tal como “Relación de los espesores de los horizontes litológicos con los factores de intemperismo en las cortezas ferroniquelíferas, en el yacimiento Punta Gorda” (Fonseca J., 1986), se analiza el comportamiento de los diferentes materiales constituyentes del perfil de meteorización obteniéndose un mapa a escala 1:5 000 de la corteza de meteorización, sin embargo no se incluye un análisis de la meteorización a partir de las características físico mecánicas, elemento importante de las rocas y que representa los factores geológicos.

Además existen algunos trabajos referidos al análisis de estabilidad, dentro de los cuales tenemos “Estudio de áreas con peligros y riesgos geológicos en el territorio de Moa”, (Tamayo A. A., 1995), en el cual se valúan los principales procesos y fenómenos naturales que generan peligros en Moa, tales como erosión, inundaciones, sismicidad y deslizamientos a partir del estudio de las propiedades físico mecánicas de los suelos. En el caso de los deslizamientos sólo se llega a describir los factores que influyen, los tipos de movimientos y las posibles condicionantes sin llegar a hacer un análisis de estabilidad de los taludes afectados. Además se realizó el trabajo “Evaluación de las condiciones ingeniero geológicas para la zonificación de los fenómenos geológicos en áreas urbanas y suburbanas de la ciudad de Moa”, (Carmenate J. A., 1996) en el cuál se realiza una evaluación y clasificación de los suelos y rocas en el área a partir de las propiedades físico mecánicas resultando 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; se analizan las causas de estos dentro de los cuales se encuentra los deslizamientos proponiéndose medidas para su mitigación pero de una manera superficial pues no se caracterizan 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.

El Departamento de geología ha realizado trabajos geotécnicos dirigidos a la caracterización ingeniero geológica de los suelos lateríticos a partir de las propiedades físico mecánicas de los mismos, además en algunos se han aplicado clasificaciones geomecánicas para el análisis de la estabilidad de los taludes. Dentro de estos se puede citar: “Proyecto de evaluación hidrogeológica e ingeniero geológica en la mina Ernesto Che Guevara” en 1998, en el cual se realizaron 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 una estudio preliminar del agrietamiento.

A partir de la investigación citada anteriormente se continuaron las investigaciones en ese sentido para profundizar en el análisis de la naturaleza y tipología de los deslizamientos en corteza laterítica, resultando los trabajos: “Evaluación de peligrosidad por deslizamientos en la mina Ernesto Che Guevara” (Guardado y Almaguer, 1999), donde el producto final es una mapa de riesgos por deslizamiento confeccionado sobre la base de las investigaciones geotécnicas en el área del yacimiento, y “Análisis de estabilidad de taludes en el Yacimiento Punta Gorda” (Guardado et al, 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 se valora riesgos por deslizamiento haciendo uso de la teoría de los elementos difusos, muy utilizada actualmente en la modelación geomecánica de macizos rocosos.

CAPITULO I

Capítulo I

Características generales del área de estudio.

1.1 Características físico geográficas.

El municipio de Moa se encuentra ubicado en el extremo oriental de la provincia de Holguín; limitado al norte por el Océano Atlántico, al sur con el municipio Yateras, al este con el municipio Baracoa y al oeste con los municipios Sagua de Tánamo y Frank País.

La región se encuentra enclavada en el grupo orográfico Sagua-Baracoa, lo cual hace que el relieve sea predominantemente montañoso, principalmente hacia el sur, donde es más accidentado en la Sierra de Moa con dirección submeridional. Hacia el norte el relieve se hace más suave con cotas que oscilan entre 40 y 50 m como máximo, disminuyendo gradualmente hacia la costa.

La red es densa y dendrítica, representada por numerosos ríos y arroyos permanentes, entre los que se encuentran los ríos Moa, con sus afluentes río Los Lirios, el cabañas, Cayo Guam, Quesigua, Yagrumaje, Arroyo Aserío entre otros. La fuente de alimentación principal de estos ríos y arroyos, son las precipitaciones atmosféricas, desembocando las arterias principales en el Océano Atlántico, formando deltas cubiertos de sedimentos palustres y vegetación típica de manglar.

El clima es tropical con abundantes precipitaciones, estando estrechamente relacionadas con el relieve montañoso que se desarrolla en la región y la dirección de los vientos alisios provenientes del Océano Atlántico cargados de humedad.

Según los datos aportados por la estación Hidrometeorológica El Sitio y los datos tomados del pluviómetro Vista Alegre, desde 1995 hasta 1991, la temperatura media anual osciló entre 22.6°C – 30.5°C, siendo los meses más calurosos los de julio a septiembre y los más fríos enero y febrero; el promedio de precipitaciones anuales entre 1231.3 – 5212 mm,

siendo los meses mas lluviosos noviembre y diciembre y los más secos marzo, julio y agosto; la evaporación media anual entre 1880 – 7134 mm.

En los períodos de lluvia, se forman corrientes turbulentas de mucha fuerza, provocando una marcada erosión de las partes superiores de las laderas de los ríos y en aquellas zonas donde es escasa la vegetación o donde esta ha sido desmontada para la explotación minera, para la construcción o explotación.

La vegetación se caracteriza por la existencia de bosques de *Pinus cubensis* en las cortezas lateríticas y donde hay menores potencias de las mismas, matorrales espinosos típicos de las rocas ultramáficas serpentinizadas (charrasco). Sobre los garbos y depósitos aluviales, pueden aparecer algunas palmeras, cocoteros y árboles frutales. Las zonas bajas litorales, están cubiertas por una vegetación costera típica entre la que se destaca los mangles, afectados en la actualidad por las construcción de presas de colas de las fábricas Cmdte Ernesto Che Guevara y Las Camariocas en construcción.

Económicamente la región está dentro de las más industrializadas del país, no solo por sus riquezas minerales, sino además, porque cuenta con dos plantas procesadoras de níquel en producción, la Cmdte Ernesto Che Guevara y la Pedro Sotto Alba. Este renglón constituye el segundo rubro exportable del país. Además de estas industrias metalúrgicas, existen otras instalaciones de apoyo a la metalurgia y minería, tales como la Empresa Mecánica del níquel, Centro de Proyectos del Níquel (CEPRONIQUEL), la Empresa Constructora y Reparadora del Níquel (ECRIN), entre otras. Además de los yacimientos lateríticos, existen los de cromo refractario, clasificado como el mejor de su tipo en el territorio cubano, los cuales se encuentran distribuidos en las cuencas de los ríos Cayo Guam y Yamanigüey, donde una parte del mineral extraído se procesa en la planta de beneficio de Cayo Guam. Los gabroides y ultramafitas presentes en la región, pueden ser empleados como áridos en la industria de materiales de la construcción.

También existen otros organismos de los cuales depende la economía de la región tales como el establecimiento de la Empresa Geólogo Minera, la Presa Nuevo Mundo, el Tejar,

el Combinado Lácteo y otros. La agricultura está poco desarrollada, aunque se hacen esfuerzos para seguir fomentándola. Existen otros sectores económicos como la ganadería que se desarrolla al sur de la región y la explotación de recursos forestales, que son abundantes en la zona, siendo un eslabón importante de la economía. La actividad pesquera está poco desarrollada.

1.2 Evolución geológica regional.

La evolución geológica de Cuba en el mesozoico estuvo asociado al desarrollo de sistemas de arco insulares y cuenca marginal, típicos de zonas de convergencia entre placas.

A fines del Campaniano Superior-Maestrichtiano se extinguió el arco volcánico cretácico cubano, iniciándose la compresión de sur a norte, originándose por procesos de acreción tectónica, el emplazamiento del complejo ofiolítico según un sistema de escamas de sobrecorrimiento altamente dislocadas (Rodríguez A., 1999).

Los movimientos de compresión hacia el norte culminaron con la probable colisión y obducción de las paleounidades tectónicas del Bloque Oriental Cubano sobre el borde pasivo de la Plataforma de Bahamas. Según Iturralde (1996) y Proenza (1998) consideran los movimientos hasta el Paleoceno Inferior. Este proceso de colisión no ocurre en el Bloque Oriental con iguales características que en el resto de Cuba debido al surgimiento a inicios del Paleógeno de la depresión tectónica Cauto-Nipe que demoró e hizo menos violenta la colisión.

A partir del Eoceno Medio y hasta el Mioceno Medio las fuerzas de compresión tangencial se reducen quedando sólo expresadas a través de fallas de deslizamiento por el rumbo, plegamientos y empujes locales, tomando importancia para la región los movimientos verticales que caracterizan y condicionan la morfotectónica regional, iniciándose a partir del Mioceno Medio el proceso de ascenso del actual territorio de la isla de Cuba.

Los movimientos tectónicos recientes se van a caracterizar por movimientos verticales responsables de la formación del sistema de Horts y Grabens, pero hay que tener en cuenta

la influencia que tienen sobre Cuba Oriental los desplazamientos horizontales que ocurren a través de la falla Oriente (Bartlett-Caimán) desde el Eoceno Medio-Superior, que limita la Placa Norteamericana con la Placa del Caribe, generándose un campo de esfuerzos de empuje con componentes fundamentales en las direcciones norte y noreste, que a su vez provocan desplazamientos horizontales de reajuste en todo el Bloque Oriental Cubano.

El sistema de fallas mas antiguo se origina durante el cese de la subducción e inicio del proceso compresivo de sur a norte del arco volcánico cretácico y que culminó con la colisión entre el arco insular y la margen pasiva de la Plataforma de Bahamas. Bajo estas condiciones compresivas ocurre el emplazamiento del complejo ofiolítico a través de un proceso de acreción, por lo cual las fallas de este sistema se encuentran relacionadas con los límites internos del complejo y de este con las secuencias más antiguas. Según Proenza J., considera que fue desarrollado entre el Campaniense Superior-Paleoceno Inferior.

Las fallas de este sistema no constituyen límites principales de los bloques tectónicos activos en que se divide el territorio actual y aparecen frecuentemente cortadas y dislocadas y enmascaradas por las dislocaciones más jóvenes así como por las potentes cortezas de meteorización desarrolladas sobre el complejo ofiolítico.

El segundo sistema cronológico está constituido por fallas de dos direcciones: noreste y norte-noroeste siendo las más abundantes y de mayor extensión, constituyendo los límites principales de los bloques morfotectónicos. Su origen se considera asociado a los procesos de colisión y obducción del arco volcánico cretácico sobre el margen de Bahamas, existiendo una transición de las condiciones compresivas iniciales, en expansivas durante el reajuste o relajamiento dinámico, por lo que el comportamiento final de estas estructuras es de carácter normal. Teniendo en cuenta el proceso que les dio origen, su edad es considerada en su fase final como Eoceno Medio con dudas (?).

Las principales estructuras representativas de este sistema son : falla Los Indios, Cayo Guam, Moa, Miraflores, Cabaña y Maquey. A continuación brindamos una caracterización de los sistemas que se encuentran en el área de estudio tomadas de Rodríguez A. (1999).

Falla Cayo Guam: su dirección es N15°W y se extiende desde la parte alta del río Cayo Guam hasta Punta Yagrumaje. Aparece cortada y desplazada en varios tramos por fallas de dirección noreste y sublatitudinales.

Los criterios que la identifican son: Alineación fluvial con ríos de cauces profundos y formación de barrancos, los que en ocasiones aparecen cortados y desplazados por otras estructuras, desplazamientos de líneas de costas y zonas geomorfológicas en el rango de 1.5 a 2.5 km, valores morfométricos bruscos y diferentes a ambos lados de la fractura, estando en el bloque occidental los máximos valores de isobasitas desplazados hacia el norte respecto al oriental, límite brusco y alineado de zonas pantanosas, intenso cizallamiento en la zona de fractura, variaciones bruscas del agrietamiento entre ambos bloques de falla, variaciones hipsométricas entre ambos bloques de fractura, límites alineados de depósitos Cuaternarios, anomalías gravimétricas negativas máximas en el gráfico lineal de Bouguer, la componente horizontal de los movimientos de falla en el periodo neotectónico es indicado por los criterios geomorfológicos en sentido norte-noroeste para el bloque occidental y sur-sudeste para el oriental.

Falla Moa. Es la estructura de mayor extensión y su trazo corresponde con una línea cóncava hacia el este con el arco mayor en la zona de Calentura, haciéndose mas recta hacia el norte con una dirección de N48°E, mientras que en su parte meridional tiene un rumbo N25°W. En la parte norte esta estructura se bifurca en dos tramos, uno de rumbo N35°E denominado La Vigía y el otro de rumbo N74°E nombrado La Veguita, el que atraviesa la zona marina perilitoral, hasta cortar la barrera arrecifal a la cual limita y afecta, pues en el bloque oriental de la falla la barrera como tal desaparece, quedando reflejada sólo como un banco de arenas, lo que constituye un indicador del sentido de los desplazamientos.

En su conjunto forma la estructura más compleja, pero a su vez, de más fácil reconocimiento por su expresión nítida en la topografía. Los principales criterios que la identifican son: alineación de sistemas fluviales con cauces profundos en forma de barranco

y laderas muy escarpadas de pendientes mayores a treinta grados, valores hipsométricos y morfométricos contrastantes entre cada uno de los bloques de falla. Desplazamiento de la línea costera a 1 km aproximadamente, desplazamiento de formas del relieve, orientación diferenciada del agrietamiento en los bloques formados por el sistema de fallas, intenso cizallamiento según los planos de fracturas con sectores mineralizados (ejemplo: La Vigía).

Según el análisis geomorfológico y topográfico el movimiento horizontal de los bloques de falla es muy complejo para esta estructura, indicando hacia la parte septentrional un desplazamiento noreste para ambos bloques de falla, mientras que en la parte meridional el bloque occidental se desplaza hacia el sudeste.

Falla Miraflores: Se extiende en forma de arco cóncavo hacia el este-noreste con un trazo casi paralelo a la falla Moa, con un rumbo N25°W desde el límite sur del área hasta Cayo Chiquito y desde aquí hasta Punta Majá con una orientación N35°E.

Los criterios que la identifican son: contacto brusco de litologías a ambos lados de la fractura como por ejemplo entre las serpentinitas y las rocas de la formación Quibiján y los gabros y entre las formaciones Quibiján y Mícara, formación de escarpe de falla con pendientes por encima de los treinta grados y facetas triangulares, contacto brusco y alineado de formas del relieve, desplazamiento de la línea de costa y zonas pantanosas de más de 0,5 km, cambio brusco en la magnitud del desplazamiento vertical de los puntos geodésicos a ambos lados de la fractura, cambio de valores morfométricos entre los bloques de falla, hacia su porción septentrional aparece desplazada hacia el oeste por fallas de dirección noroeste, y en su parte central es cortada por la falla de deslizamiento por el rumbo Cananova,

Falla Cabaña. Se extiende desde el noroeste del poblado de Peña y Ramírez hasta el norte de la ciudad de Moa, cortando la barrera arrecifal y limitando el extremo oriental de Cayo Moa Grande. En su parte meridional presenta una orientación N70°E hasta la zona de Zambumbia donde es truncada por un sistema de fallas submeridionales, aflorando nuevamente con nitidez al nordeste del poblado de Conrado donde inicia su control

estructural sobre el río Cabaña. En las cercanías de Centeno esta estructura es cortada y desplazada por la falla Cananova tomando una orientación N56°E la que mantiene hasta penetrar en el océano Atlántico.

La misma se identifica a través de los criterios siguientes: alineación fluvial, alineación y desplazamiento de hasta tres kilómetros de la línea de costa en Punta Yaguasey, formación de escarpe de falla hacia su porción meridional, cambio brusco de valores morfométricos a ambos lados de la falla, cizallamiento intenso a lo largo del plano de fractura con presencia de abundante mineralización, cambio en la magnitud del desplazamiento vertical entre puntos geodésicos situados a ambos lados del plano de fractura, límite recto de zona pantanosa.

El tercer sistema de estructuras está constituido por dos fallas de deslizamiento por el rumbo (*Strike-Slip*) la falla Cananova y El Medio. El origen de estas está asociado al momento en que se inician los movimientos hacia el este de la Placa del Caribe a través de la falla Oriente, desarrollándose un campo de esfuerzo de dirección norte-noreste, con la compresión del Bloque Oriental Cubano, en la zona de sutura de éste con la Plataforma de Bahamas, lo que provocó la ruptura y el acomodamiento de la corteza desde el Eoceno Medio-Superior.

Falla Cananova: presenta rumbo predominante N53°W. Es cortada en diferentes puntos por estructuras submeridionales, caracterizándose toda la zona de falla por el grado de cizallamiento de las rocas que corta.

Los criterios que permiten su identificación son: desplazamiento de formas del relieve, como ocurre con las montañas bajas diseccionadas y las llanuras fluviales abrasivas que son desplazadas hacia el oeste en la zona norte de Miraflores a Centeno, desplazamiento de la barrera arrecifal en la Bahía de Yaguaneque, presencia de espejos de fricción, desplazamiento de zonas pantanosas y línea de costa, desplazamiento de estructuras geológicas como grietas, diques y contactos litológicos, cambio de orientación de algunos elementos morfológicos y morfométricos como son las divisorias de aguas principales,

cierres de isobasitas y superficies escarpadas, contacto brusco y alineado entre los gabros y las serpentinitas, variaciones de la orientación del agrietamiento.

A través de la falla Cananova ocurre un desplazamiento horizontal máximo de 1500 m hacia el noroeste del bloque norte respecto al sur y un movimiento rotacional izquierdo (antihorario) alrededor de cuarenta grados de ese bloque norte.

El cuarto sistema de fracturas que aparece desarrollado en el territorio corresponde a estructuras sublongitudinales que aparecen en toda el área, pero tienen su máxima expresión en las zonas periféricas de los sectores de máximo levantamiento, como por ejemplo las fallas a través de las cuales corren algunos tributarios como el arroyo La Veguita del río Moa, el arroyo La Vaca, arroyo Colorado y la de mayor envergadura que se encuentra al sur de Caimanes.

En las estructuras de este sistema no siempre se encuentran desplazamientos geológicos y geomorfológicos apreciables y su expresión está dada fundamentalmente por la formación de barrancos, alineaciones fluviales, líneas rectas y netas de tonalidades más oscuras y en algunos casos, se han determinado rasgos evolutivos en la comparación entre fotos de años diferentes.

Las características descritas anteriormente permiten suponer una génesis asociada a procesos de descompresión o expansión de bloques, al disminuir las tensiones horizontales que mantienen cohesionado los macizos rocosos debido a los movimientos verticales diferenciales. La edad de este sistema es considerada en su límite inferior posterior al Mioceno Medio, momento en que se inicia el proceso de ascenso definitivo del territorio actual de Cuba oriental como tendencia general y se extiende hasta el presente por prevalecer las condiciones geodinámicas que le dan origen.

1.3 Caracterización morfotectónica.

Los sistemas de fallas descritos, en conjunto con los movimientos diferenciales de las estructuras geológicas, sus estilos tectónicos y la morfología desarrollada por la acción de

los procesos exógenos durante el desarrollo geológico de la región, han determinado la formación de bloques morfotectónicos (ver mapa 2), los cuales se diferencian entre sí por características típicas, las cuales enumeramos a continuación. La caracterización de los mismos fue tomada de la tesis doctoral de Rodríguez A. (1999).

Bloque Cabaña. Situado al este del bloque Miraflores, con orientación noreste desde la localidad de Zambumbia hasta Cayo Moa Grande, y en su porción meridional, en la zona Cayo Grande-Caimanes Abajo, mantiene una dirección noroeste.

Geológicamente el basamento sobre el cual se sustenta la morfología de este bloque esta conformado por las tobas de la formación Santo Domingo, las rocas del complejo ofiolítico y sedimentos parálicos y fluviales en la zona aledaña al litoral.

El relieve es de llanuras erosivas y erosivo-acumulativas las que hacia el sur transicionan a submontañas ligeramente diseccionadas con divisorias de configuración arborescente. El drenaje es de densidad moderada a alta con predominio de redes dendríticas exceptuando los cauces primarios del río Cabaña cerca de la zona de intersección con el río Moa, donde aparecen redes enrejadas.

Los valores morfométricos que para este bloque se comportan con gran variabilidad evidencian una intensidad mínima de levantamiento relativo respecto a los bloques laterales con una disección vertical máxima de 100 m/km^2 en la parte centro-septentrional, disminuyendo hasta 90 m/km^2 hacia el norte y 40 m/km^2 hacia el sur. Para el bloque los valores máximos del nivel de base de erosión para el segundo y tercer orden se alcanzan hacia el sur con 200m y 150m respectivamente, formándose cierres de isobasas de carácter muy local al suroeste y noreste de Caimanes Arriba y hacia el norte, en la zona de Playa la Vaca.

Este bloque se encuentra cortado por la falla Cananova presentando valores morfométricos diferenciados entre el sub-bloque norte y sur, desplazándose el sub-bloque norte según el plano de fractura en dirección noroccidental. El sub-bloque más meridional (Cayo Grande)

no está aún claramente definido, pues los valores morfométricos que presenta difiere notablemente del de los bloques situados al este, pero son intermedios entre los valores del bloque en el cual está incluido y el bloque El Lirial ubicado al oeste del mismo, sin embargo, la decisión de incluirlo en el bloque Cabaña y dentro de este como el sector mas levantado se debe a la presencia de la frontera activa que constituye la falla Miraflores que lo limita occidentalmente y a su constitución geológica dada por las rocas del complejo ofiolítico, no negando la posibilidad de que el sub-bloque Cayo Grande con los sub-bloques Cabaña Norte y Sur y el bloque El Lirial constituyan una sola unidad morfotectónica.

El sentido fundamental de los desplazamientos horizontales de este bloque es suroccidental y en cuanto a los movimientos verticales existen diversos criterios contradictorios ya que si bien es cierto que en la superficie actual abundan los rasgos del relieve y valores morfométricos que lo señalan como un bloque de mínimo ascenso o de descenso relativo en la actualidad, la constitución geológica de su superficie, dada mayoritariamente por las rocas cretácicas de la formación Santo Domingo y el complejo ofiolítico hacen suponer que esta tendencia no ha sido permanente desde el Mioceno Medio cuando se inicia el levantamiento general del territorio oriental y muy por el contrario, se comporta como una ventana tectónica, donde las formaciones terciarias y cuaternarias han tenido muy poco desarrollo o fueron erosionadas, lo que sólo se justifica por una tendencia predominante al levantamiento.

Bloque El Toldo: es el de máxima extensión, correspondiéndole también los máximos valores del levantamiento relativo de la región. Litológicamente está conformado en superficie por las rocas máficas y ultramáficas de la secuencia ofiolítica, sobre las cuales se ha desarrollado un relieve de montañas bajas de cimas aplanadas ligeramente diseccionadas. Hacia la parte norte se desarrollan en un pequeño sector premontañas aplanadas. El drenaje es de densidad media a baja, lo que está condicionado por las potentes cortezas de intemperismo que cubren al área y favorecen la permeabilidad del suelo y al intenso control estructural del drenaje que condiciona la formación de barrancos.

En este bloque aparecen desarrolladas formas del relieve cársico en peridotitas ubicadas alrededor de las elevaciones máximas, siendo el punto de mayor cota El Toldo con 1174 m sobre el nivel del mar.

Los parámetros morfométricos para este bloque son los más relevantes al tomar valores que indican la máxima intensidad de levantamiento con isobasitas que cierran en 900 m y 800 m para el 2^{do} y 3^{er} orden respectivamente y valores de la disección vertical de 550 m/km². Los rangos de pendiente son contrastantes, teniendo en la cima de 6° a 9° promedio, con sectores interiores de 0°-3°; mientras que en los límites del bloque, fundamentalmente en el occidental enmarcado por la falla Moa, llegan los valores a ser mayores de 30°, alcanzándose las máximas pendientes en los barrancos de los afluentes principales.

Hacia la parte norte, en su prolongación dentro de la zona marina puede notarse la pérdida de la barrera arrecifal desde la intersección de la falla La Veguita hasta la falla Quesigua, donde sólo queda como testigo de su existencia un banco de arena de morfología similar, lo que se considera constituye un índice de los movimientos diferenciales entre los bloques. El límite nororiental de este bloque está dado por la falla Cayo Guam, mientras que al sur limita con el bloque Cupey a través de la falla Quesigua.

1.4 Caracterización geológica del yacimiento Punta Gorda.

Características lito-estratigráficas.

En el contexto regional, el yacimiento Punta Gorda se ubica en la AEF del Arco Volcánico y de la antigua Corteza Oceánica y aparecen en él los depósitos Cuaternarios (De Dios Leyva, 2000). Las características de los representantes de las mismas las brindamos a continuación:

Rocas ultrabásicas serpentinizadas (K₂). Aparecen representadas hacia la parte sur del yacimiento, ocupando los valles del arroyo Los Lirios y el río Yagrumaje. Estas rocas se presentan muy serpentinizadas, y están representadas fundamentalmente por harzburgitas serpentinizadas. Se le atribuye una edad Cretácico Medio (K₂).

Corteza laterítica ferroniquelífera (N₁). Aparece representada hacia la parte Centro-suroeste del yacimiento. Es una corteza madura, con un desarrollo completo del perfil laterítico. Yace inmediatamente por encima de las rocas madres representadas por las harzburgitas serpentinizadas. Su formación tiene relación con la transgresión marina. Su edad posible es Mioceno (N₁). El contacto estratigráfico de estos materiales sedimentarios con la corteza de intemperismo original es discordante.

Laterita sedimentaria (N₂). Aparece representada en toda la parte Centro-nordeste del yacimiento. Es un material que proviene de la corteza laterítica ferroniquelífera, al ser sometida a los movimientos tectónicos y a la erosión. Se desarrolla un perfil de intemperismo que puede ser muy variable: incompleto, complejo o reducido, lo que está en dependencia de la intensidad del proceso de intemperismo. Su contacto con la corteza de edad más vieja es discordante. Su edad posible es Plioceno (N₂).

Laterita sedimentaria (Q₁). Aparece solamente en la parte norte del yacimiento, en dirección centro-este. Es un material proveniente del anterior, que producto al intemperismo, la tectónica y a la erosión es arrastrado y acumulado. El material que forma el perfil laterítico, aunque tiene las mismas características de la corteza original, está más desordenado que en el caso anterior, lo que hace posible que estas zonas se caracterizan por presentar perfiles reducidos, complejos y muy complejos. Todo esto en dependencia también del grado de madurez de la corteza de intemperismo. Su formación está relacionada con el nuevo levantamiento de la zona, el cual se mantiene en la actualidad.

De forma general podemos decir que cada secuencia estratigráfica sedimentaria del yacimiento cubre discordantemente a las secuencias subyacentes y constituyen una cobertura prácticamente continua, de génesis continental y marina sobre todo las secuencias de rocas más antiguas, presentando pocos cambios diagenéticos y pequeño espesor.

Depósitos detríticos aluviales (Q₂). Aparece representado en los valles de los ríos Moa y Yagrumage y los arroyos Los Lirios y La Vaca, o sea en las partes periféricas del yacimiento.

Tectónica.

El área de yacimiento se encuentra limitado por dos grandes fallas regionales que pasan por los valles de los ríos Moa y Cayo Guam (De Dios Leyva, 2000). Por otro lado, el área central del yacimiento se encuentra bajo la influencia de una falla de primer orden que se corresponde con el río Moa, a partir de ella se desarrollan en el yacimiento toda una serie de fracturas de segundo orden, entre los que se destacan las que se encuentran en los arroyos “Los Lirios”, “La Vaca” y el río “Yagrumaje”; a partir de las cuales, y en forma de plumajes, se desarrollan una serie de pequeñas fracturas a todo lo largo y ancho del área del yacimiento. Estas fracturas tienen carácter premineral, ya que en caso contrario hubieran afectado seriamente el cuerpo mineral presente en el yacimiento, en cuestión.

Discontinuidades Submeridionales con el azimut de buzamiento de 20° a 340°: El período de su formación es del Cretácico Superior, cuando tuvo lugar la intrusión de gabroides. Por esas fracturas la región fue dividida en grandes bloques separados, que posteriormente se desplazaron unos con relación a otros.

Discontinuidades de dirección nordeste: Están desarrolladas ampliamente y con frecuencia son desplazadas por las dislocaciones del grupo siguiente.

Discontinuidades de dirección noroeste: También se manifiestan en todas partes. Por lo visto la mayoría de estos son más jóvenes. (Post - miocénicas).

Geomorfología.

El yacimiento se encuentra enclavado en el bloque morfotectónico El Toldo, de manera que la descripción geomorfológica está vinculada con los rasgos predominantes de dicho bloque (De Dios Leyva, 2000).

Zona de llanuras: Se desarrolla en toda la parte centro-norte, ocupando desde la barrera arrecifal hasta los niveles de 100–110 m de altura hacia el sur. Su formación está relacionada con la acción conjunta de diferentes procesos morfogénicos que en ella han actuado, predominando los procesos fluviales y marinos. Toda esta zona es de edad Cuaternario y no ha estado exenta de la acción de los procesos tectónicos.

Zona de montañas bajas aplanadas ligeramente diseccionadas: Es la que adquiere la mayor importancia en el estudio de la zona por el área que abarca y por estar asociada a ella los mayores yacimientos ferroniquelíferos. Corresponde al segundo nivel de la estructura escalonada que caracteriza la zona.

Los procesos de intemperismo son predominantes y están condicionados no sólo por la litología y el grado de agrietamiento de las rocas sobre las cuales se desarrolla sino también, por la posición hipsométrica que estas ocupan.

La geomorfología está representada por *3 niveles hipsométricos* diferentes:

Nivel hipsométrico (I): Está representado hacia la parte norte del área y caracterizado por un relieve prácticamente llano y alargado de Oeste a Este, con pendientes suaves (hasta 5°) y cotas absolutas hasta 40m.

Nivel hipsométrico (II): Está representado en toda la parte central del yacimiento y es de forma alargada según la dirección Oeste-Este, con pendientes hasta 10°, aunque predominan las de 5° a 6°. Es un relieve poco accidentado; al ser suaves las pendientes,

existe una buena conservación del producto de meteorización siendo interrumpido por barrancos y escarpes producto del sistema fluvial (río Yagrumaje, Los Lirios y arroyo La Vaca), que están controlados por dislocaciones tectónicas. Las cotas absolutas son de 110 m.

Nivel hipsométrico (III): Esta representado en toda la parte sur del yacimiento. Está bastante accidentado, siendo interrumpido por barrancos y escarpes (más al sur) producto de las corrientes fluviales de los ríos Los Lirios y Yagrumaje. Aparecen las mayores elevaciones en forma de mesetas suaves con cimas aplanadas, con pendientes predominantes de 10° y en algunas zonas de 15°. No tiene mucho desarrollo, no obstante, existe una excelente conservación del producto meteorizado, abundando las mayores potencias de lateritas níquelíferas. Las cotas absolutas son de hasta 185 m.

Características hidrogeológicas.

En la zona del yacimiento Punta Gorda están ampliamente distribuidas las aguas subterráneas, las que se encuentran relacionadas en la parte superficial agrietada del macizo ultrabásico serpentinizado (Guardado et al, 1998; Almaguer, 1998)

.Por los trabajos realizados anteriormente se conoce que el agrietamiento intenso y la acuosidad relacionada con estos se presentan a una profundidad de 20 – 30 m y que la zona más agrietada e inundada por lo general tiene una potencia de 2 – 5 m. A grandes profundidades las rocas tienen un comportamiento acuífugo, o sea, no contienen agua. En la región existen manantiales de aguas subterráneas ligados a la zona de agrietamiento. El gasto de estos varia desde fracciones de litros hasta varios litros por segundo y se encuentra en dependencia directa con cantidad de precipitaciones atmosféricas. Las aguas son dulces, con una mineralización de 0.1 – 0.5 g/l y presentan una composición microcarbonatada magnesiana e hidrocarbonatada cálcica.

La región presenta una estructura tectónica compleja y se caracteriza por la presencia de alargadas zonas de fallas, se puede suponer que estas zonas pueden estar inundadas y contener grandes reservas de aguas subterráneas. Las divisorias de las aguas superficiales se encuentra al sur del yacimiento con cotas absolutas superiores a los 170m. La dirección principal del agua subterránea es hacia el norte, donde se encuentra la zona mas baja y hacia sur-sureste, constituyendo en esta dirección el río Yagrumaje la zona de descarga.

El área del yacimiento está caracterizada por dos zonas, la primera comprende los bloques T-46,T-47, S-42, S-43, S-44, S-45, S-46, S-47, R-42, R-43, R-44, R-45, R-46, R-47; donde existen las mayores potencias de los horizontes acuíferos y con poca variación de las profundidades de los niveles de agua subterránea, es decir, que las menas siempre están inundadas. La segunda zona que comprende el resto del yacimiento donde prácticamente las lateritas no contienen agua, a excepción de los sectores locales y que en periodo de seca quedan sin agua o con potencias acuíferas pequeñas, casi siempre inferiores a los 2m. La fuente principal de alimentación de las aguas subterráneas la constituyen las precipitaciones atmosféricas, que son abundantes en el área con valores diarios entre 1 mm y 235.5 mm.

CAPITULO II

Metodología de los trabajos
geomecánicos desarrollados en el
área de estudio.

Capítulo II

Metodología de los trabajos geomecánicos desarrollados en el área de estudio.

En el presente capítulo abordaremos los principales métodos utilizados en la evaluación geomecánica de los taludes. La misma se basó en una evaluación estructural, microscópica y mesoscópica, del macizo rocoso, y del perfil de meteorización desde el punto de vista ingenieril; además, fue aplicada una clasificación geomecánica para taludes (SMR), y por ultimo se aplicaron métodos de cálculo para la estimación del factor de seguridad de los mismos.

2.1 Metodología del análisis estructural.

El análisis estructural de un cuerpo de roca deformado comprende tres fases principales el geométrico, cinemático y dinámico (Turner et al, 1967; Volfson et al, 1982). Estos se describen a continuación dando algunos conceptos en los cuales están basados.

Análisis geométrico o descriptivo: el análisis geométrico comprende observaciones y mediciones directas de las propiedades geométricas y físicas del cuerpo deformado. Solo las propiedades geométricas son necesarias si el análisis subsiguiente será puramente cinemático; pero para análisis dinámicos posteriores se necesitan las propiedades físicas tales como elasticidad, y ductibilidad.

Análisis cinemático: de los datos del análisis geométrico se realiza una aproximación para reconstruir los movimientos (deformación, rotación, traslación, etc.) que han tenido lugar dentro del cuerpo durante la deformación. El análisis cinemático puede hacerse de dos formas:

1. los rasgos geométricos de un cuerpo deformado puede ser interpretado directamente en términos de conceptos cinemáticos en la suposición empírica que la naturaleza del orden geométrico del cuerpo refleja el orden de los desplazamientos

diferenciales, rotación y deformaciones que están presentes durante la deformación de un cuerpo policristalino real.

2. el estado final observado de un cuerpo deformado es comparado con algún estado inicial asumido, y se propone un desarrollo cinemático. Pero siempre de una misma observación y una misma suposición se puede obtener mas de una reconstrucción cinemática.

Análisis dinámico (incluyendo cinemático): el propósito del análisis dinámico es reconstruir los esfuerzos dentro de un cuerpo geológico y las fuerzas externas e internas y superficies de tracción o fuerzas del cuerpo en reacción. El análisis debe ser aplicado preferiblemente solo a cuerpos con límites bien definidos y con una estructura interna diferente de los cuerpos que le rodeen.

Los análisis estructurales antes citados se realizan sobre la base de la descripción de los dominios presentes en la fábrica de las rocas, dentro de los cuales existen dos grandes grupos: *dominios cristalográficos y los no cristalográficos.*

A nivel microscópico realizamos el análisis microestructural, el cual comprendió el estudio de las estructuras orientadas de las rocas, las cuales se caracterizan por el hecho de que determinados elementos de los minerales formadores de rocas, como el plano de crucero, el alargamiento, los ejes ópticos, poseen estadísticamente una posición regular, por ejemplo, descansan sobre uno o varios planos, estando sometidos a una o varias direcciones.

Las estructuras orientadas en las rocas pueden aparecer como resultado de varios factores dentro de los cuales podemos citar la sedimentación de los componentes de un medio móvil o inmóvil, deformación de las rocas bajo la acción de esfuerzos tectónicos, o debido a otros procesos (Volfson et al, 1982). Entre los procesos citados anteriormente el de interés para nosotros es la deformación tectónica, la cual provoca en otros efectos la orientación de los minerales. Este fenómeno cuando afecta las rocas provocan movimientos diferenciales de unos granos con respecto a otros, o la deformación de los propios granos según los planos

de traslación o de bifurcación, es decir, según determinados planos de las redes cristalinas, siendo la deformación total de las rocas el resultado sumario de tales movimientos.

Para facilitar el análisis de los movimientos internos de la roca, que aparecen durante las deformaciones y se manifiestan fundamentalmente en la orientación de los granos minerales que la componen, así como para la comparación de la dirección de estos movimientos con los elementos mesoestructurales, en el análisis se adopta el sistema de toma de muestras orientadas (ver figura 2.1).

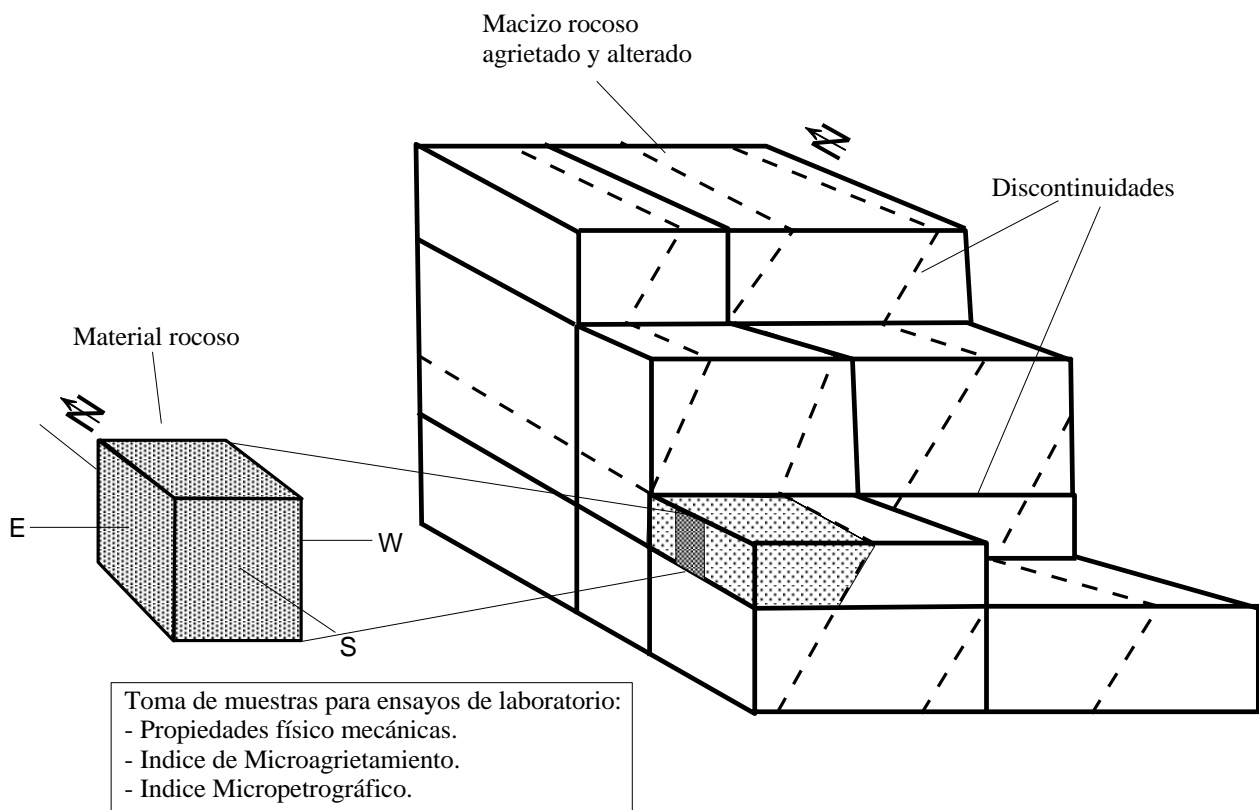


Figura 2.1 Esquema que muestra la toma de muestras orientadas empleadas en el análisis estructural (ejemplo de un macizo agrietado).

A fin de estudiar los elementos de fábrica en el macizo según la estructura interior del mismo, fue necesario tomar muestras orientadas. Para lo cual, directamente en un plano bien revelado en el afloramiento, con un lápiz se marcan las líneas del rumbo y de buzamiento, midiéndose los elementos de yacencia de este plano. Después se quita la

muestra con las líneas marcadas en ella con sumo cuidado para que no se fragmente. En nuestro caso se prepararon secciones pulidas de forma cúbica (1x1x1 cm) con tres caras pulidas para determinar con mejor precisión los rasgos estructurales en tres direcciones diferentes.

El análisis de las mismas se realizó con un microscopio de luz reflejada, usando fundamentalmente el aumento 20x40 . Los dominios microscópicos tales como pliegues, líneas de clivaje, microgrietas y dirección preferencial de granos minerales fueron delimitados anotándose los datos de orientación en fichas preparadas para este objetivo.

Como en las secciones se miden sólo una fracción de un dominio particular, se empleó una metodología que permitió obtener la mayor cantidad de información explorando toda el área de las muestras; el procedimiento consistió en hacer una serie de líneas de medición paralelas a través de la sección pulida y una transversal intermedia a las anteriores, manteniéndose en una dirección constante con respecto a la platina.

El procedimiento usado para el ploteo de las direcciones medidas microscópicamente es el mismo que para los datos mesoscópicos. Los datos se plotean en diagramas de rosetas manteniendo iguales los intervalos de contorno para todos los diagramas , realizándose uno para cada dominio, y referimos todas las mediciones y diagramas a una microsección. Los principales dominios medidos fueron microgrietas, pliegues, líneas de clivaje, y dirección preferencial de granos minerales.

Los trabajos a escala mesoscópica, se realizaron en los diferentes afloramientos encontrados en la región de Moa, el área del yacimiento, así como en los causes de los ríos presentes en el mismo (Yagrumaje, los Lirios y arroyo la Vaca). En cada afloramiento se midieron los elementos de yacencia de las grietas, además de las características de las mismas tales como apertura, espaciamiento entre grietas, persistencia o continuidad, relleno, humedad o flujos de agua, y las características de la superficie de las mismas. Toda esta información fue anotada y sintetizada en fichas realizadas al efecto (ver tablas 2.1 y 2.2).

Para la descripción de las características citadas encima fueron usadas una serie de clasificaciones propuestas por Barton N. (1978). En la tabla 2.3 tenemos para la apertura tres clases, cerradas, moderadamente abiertas y abiertas, que a su vez se dividen en seis subclases. En la tabla 2.4 se describe el espaciamiento, el cual tiene siete tipos que van desde grietas extremadamente cerradas a espaciamientos extremos y en la tabla 2.5 tenemos la descripción de la continuidad o persistencia de las trazas de las grietas.

INFORMACION GENERAL			HOJA DE DATOS PARA DESCRIPCION DE LA MASA ROCOSA						
No. Punto	Lugar		Día	Mes	Año	Geólogo		Orientación	
		Fecha						X:	Y:
Tipo de localidad				Dimensiones					Fotografía
1. Afloramiento natural				1. > 10 m ²					Sketch
2. Excavación				2. 5 - 10 m ²					
3. Pozo				3. 1 - 5 m ²					
4. Trinchera				4. < 1 m ²					
5. Túnel									
6. Línea de reconocimiento									
INFORMACION DEL MATERIAL ROCOSO									
Color				Tamaño de grano					
1. Claro	1. Sonrosado	1. Rosado	1. Rosado	1. Muy grueso (> 60 mm)				Resistencia	1. Medida
2. Oscuro	2. Rojizo	2. Rojo	2. Rojo	2. Grueso (2 - 60 mm)		Resistencia a la compresión	1. Muy fuerte (> 100 N/m ²)		2. Estimada
	3. Amarillo	3. Amarillo	3. Amarillo	3. Medio (60 micrones - 2 mm)			2. Fuerte (50 - 100 N/m ²)		
	4. Carmelitoso	4. Carmelita	4. Carmelita	4. Fino (2 - 60 micrones)			3. Mod. Fuerte (12.5 - 50 N/m ²)	Tipo de roca	
	5. Aceitunado	5. Verde olivo	5. Verde olivo	5. Muy fino (< de 2 micrones)			4. Mod. Débil (5 - 12.5 N/m ²)	Descripción:	
	6. Verdoso	6. Verde	6. Verde				5. Débil (1.5 - 5 N/m ²)		
	7. Azulado	7. Azul	7. Azul				6. Débil / duro (600-1250 KN/m ²)		
	8. Grisáceo	8. Blanco	8. Blanco				7. Muy duro (300 - 600 KN/m ²)		
		9. Gris	9. Gris				8. Duro (150 - 300 KN/m ²)		
		0. Negro	0. Negro				9. Firme (80 - 150 N/m ²)		
							0. Blando (40 - 80 N/m ²)		
INFORMACION DEL MACIZO ROCOSO									
Estructura						Estado de meteorización	1. Fresca		
1. Bloques		Tamaño de bloque	1. Muy grande (> 8 m ³)				2. Levemente		
2. Tabular			2. Grande (0.2 - 8 m ³)				3. Moderadamente	Número de familias de grietas principales	
3. Columnar			3. Medio (0.008 - 0.2 m ³)				4. Altamente		
			4. Pequeño (0.0002 - 0.008 m ³)				5. Completamente		
			5. Muy pequeño (< 0.0002 m ³)				6. Suelo residual		

Tabla 2.1 Ficha utilizada en la descripción del macizo rocoso.

Apertura	Descripción	Tipo
< 0.1 mm	Muy cerrado	Cerradas
0.1 – 0.25 mm	Cerrado	
0.25 – 0.5 mm	Parcialmente abierto	
0.5 – 0.25 mm	Abierto	Moderadamente abiertas
2.5 – 10 mm	Moderadamente ancha	
> 10 mm	Ancha	
1 – 10 cm	Muy ancha	Abiertas
10 – 100 cm	Extremadamente ancha	
> 100 cm	Caverna	

Tabla 2.3 Clasificación y descripción de la apertura del agrietamiento (Barton N., 1978).

Descripción	Espaciamiento (mm)
Extremadamente cerrado	< 20
Muy cerrado	20 – 60
Cerrado	60 – 200
Moderadamente espaciado	200 – 600
Espaciado	600 – 2000
Muy espaciado	2000 – 6000
Extremadamente espaciado	> 6000

Tabla 2.4 Clasificación del espaciamiento de las familias de grietas.

Descripción	Persistencia (m)
Muy baja	< 1
Baja	1 – 3
Media	3 – 10
Alta	10 – 20
Muy alta	> 20

Tabla 2.5 Clasificación de la persistencia de las trazas de las grietas.

Además de estas mediciones se realizaron estudios de estructuras geológicas de interés encontradas en el área, tales como estructuras plegadas, zonas de cizallas (shear), zonas milonitizadas, y mineralización asociadas a sistemas de grietas preferenciales.

2.2 Metodología de evaluación de las rocas meteorizadas.

Para el estudio de este proceso geológico desde el punto de vista geomecánico nos basamos en metodologías propuestas por diferentes investigadores (Zhao J., 1994 a,b, Kilic R., 1995), las cuales incluyen trabajos de reconocimiento, descripción y estimación de índices en el campo, tales como el color de la roca, humedad, dureza relativa, grado de alteración, características estructurales, etc., además incluyen trabajos de laboratorio donde se determinan las propiedades resistentes de las rocas y suelos, velocidades de las ondas longitudinales a través de las muestras de rocas y la descripción microscópica de los elementos de fábricas presentes en las mismas.

La clasificación de las rocas serpentizadas para propósitos ingenieriles está basado en las características de las rocas determinadas en el campo y en el laboratorio (Almaguer Y., 1998). Fueron aplicados un complejo de métodos basados en inspección visual y en ensayos relativamente sencillos (Barton, 1972, 1976, 1978; Wu, 1978; Hudson, 1979).

Para realizar la clasificación presentada, fueron usados varios criterios dentro de los cuales podemos citar descripción de la roca, incluyendo color, fábrica, relación roca/suelo; índices de resistencia, incluyendo resistencia a la compresión uniaxial y modulo de elasticidad; porosidad del material; índice de espaciamiento de las fracturas e índice de calidad de la masa rocosa (RQD); permeabilidad relativa de la masa rocosa y microíndices, incluyendo el índice de microfractura.

La descripción del macizo y del material rocoso fue esencialmente por reconocimiento visual usando la terminología siguiente (Barton N., 1978, Zhao J., 1994 a,b, Kilic R., 1995):

Grado de decoloración. Este rasgo diagnóstico es usado para clasificar la meteorización. La decoloración es solo uno de los varios fenómenos que pueden ocurrir cuando comienza la descomposición química.

Grado de descomposición química. El término específico tiene el propósito de definir el grado de meteorización de los minerales que van alterándose a otros más estables. Ya que el efecto del fenómeno es usualmente visible, este término es adecuado para describir la descomposición de las rocas serpentizadas.

Grado de desintegración física. Aunque la meteorización física no tiene gran desarrollo si se tienen en cuenta algunos elementos que pueden encontrarse en las fábricas de las rocas tales como límites de granos abiertos y microfracturamiento intensivo, que nos sirven para describir los efectos de la misma.

Presencia de la fábrica original. La descripción de la fábrica original (incluyendo textura) puede ser usado para distinguir algunos grados de meteorización, pues la misma va cambiando a medida que la roca se altera a suelo residual.

Relación roca suelo. Se ha reconocido que la relación de roca con respecto a la cantidad de suelo en las rocas descompuestas es un índice del grado de meteorización. Esta relación se refiere a al porcentaje de núcleos rocosos en los bloques del macizo rocoso.

Además de el reconocimiento visual de algunas características del macizo rocoso, se emplearon algunos índices físico-mecánicos obtenidos de ensayos realizados y de investigaciones realizadas anteriormente. Los mismos los enumeramos a continuación.

Índice de resistencia de la roca (axial). La resistencia de la roca disminuye durante la meteorización, siendo uno de los índices más importantes para clasificar la alteración de las mismas (Bieniawski, 1967, 1974).

Elasticidad del material rocoso. La fracturación que acompaña la meteorización, y el reemplazamiento de minerales frágiles por arcillas blandas, resulta en una significativa reducción del módulo de elasticidad (Baynes et al., 1978; Bebáis, 1985). Se ha notado que con el incremento de la meteorización, el módulo de elasticidad decrece linealmente con la disminución de la resistencia a la compresión uniaxial (Zhao J., 1994 a,b, Kilic R., 1995).

Velocidad sónica. El cambio del módulo de elasticidad y de la porosidad del material rocoso puede ser reflejado en el cambio de la velocidad sónica, porque la velocidad es función de las características anteriormente citadas.

Porosidad de la roca intacta. Durante el progreso de la meteorización, la tendencia general es incrementarse el contenido de humedad y la porosidad, mientras que la densidad disminuye. El cambio de la densidad y el contenido de humedad es el resultado directo del incremento de la porosidad, causada por la solución y fracturación que acompaña la meteorización. La porosidad puede determinarse a través de examinación con microscopio, ensayos de permeabilidad, medición de la velocidad sónica y otras mediciones geofísicas.

Índice de espaciamiento de las fracturas e índice de calidad de la roca (RQD). El espaciamiento de las fracturas generalmente decrece con el incremento de la meteorización. Por lo tanto el índice de espaciamiento de las fracturas puede ser un indicador de la meteorización para las rocas. El RQD (Rock Quality Designation) es ampliamente utilizado para clasificar las masas rocosas. Este es una función del espaciamiento y de las condiciones de las fracturas, por tanto el RQD es una medida del grado de meteorización (Bieniawski, 1967, 1974).

Permeabilidad relativa del macizo rocoso. El cambio de la porosidad que ocurre durante la meteorización afecta la permeabilidad del material rocoso y del macizo rocoso. Sin embargo, particularmente en estadios avanzados, algunos factores, tales como el desarrollo y dispersión de minerales arcillosos, y la deposición de cementos secundarios, pueden reducir la permeabilidad.

Índice de microfractura y micropetrográfico. Es determinado en el laboratorio examinando microscópicamente el material de la roca, y es de considerable valor. Estos índices se usan para suplementar y refinar la clasificación de campo (Zhao J., 1994 a,b, Kilic R., 1995).

El índice micropetrográfico es definido como la diferencia del porcentaje de minerales primarios entre el porcentaje de minerales secundarios. Y el índice de microfractura es el número de microgrietas en un centímetro lineal de una sección delgada o pulida, incluyendo límites de granos decoloradas y/o abiertos, microgrietas rellenas, poros y microgrietas transgranulares en el material rocoso.

A partir de estos índices descritos, fue aplicado el índice de alteración unificado (K_c), propuesto por Kilic R. (1995), el cual depende de la velocidad de las ondas longitudinales a través de la roca, de la resistencia uniaxial y de la absorción de agua en por ciento en peso.

La siguiente expresión es un ejemplo de cómo se obtiene el valor de la alteración con respecto a la velocidad de las ondas P :

$$K = 1 - a/i$$

Y con respecto a la absorción de agua, se tiene:

$$K = [1 - a/i]$$

donde:

K : alteración con respecto a la velocidad de las ondas, a la resistencia uniaxial y a la absorción de agua.

i : velocidad de las ondas, resistencia uniaxial y absorción de agua de la roca fresca.

a : velocidad de las ondas, resistencia uniaxial y absorción de agua de la roca alterada.

De esta manera el índice unificado de alteración se obtiene de acuerdo a la expresión:

$$K_C = K_V K_{\sigma} K_a$$

donde:

K_V : alteración de la roca con respecto al paso de la velocidad de las ondas sísmicas P .

K_{σ} : alteración de la roca con respecto a la carga unitaria.

K_A : alteración de la roca con respecto a la absorción de agua dado por la humedad de la roca.

En la tabla 2.6 que continuación se expone, se representan los rangos de valores de K_c , K_v , K_a y K para clasificar la alteración de las rocas (Kilic R. 1995)

Clase	Descripción	K_c	K_v	K_{σ}	K_a
I	Fresco	0	0	0	0
II	Bajo	0.01-0.1	0,0-0,2	0,0-0,2	0,0-0,03
III	Moderado	0,1-1.0	0,2-0,4	0,2-0,4	0,3-0,6
IV	Alto	1,0-10	0,4-0,6	0,4-0,8	0,6-35
V	Muy alto	mayor de 10	mayor de 0,60	mayor de 0,80	mayor de 35

Tabla 2.6 Clasificación de las rocas de acuerdo a los índices de alteración.

2.3 Metodología de clasificación geomecánica del macizo rocoso.

Para la clasificación geomecánica del macizo rocoso escogimos la propuesta por Romana (1985). La misma consiste en la determinación de factores de ajuste adecuados para aplicar la clasificación **RMR** de Bieniawski a los taludes. Tras su publicación, la clasificación ha tenido buena acogida en el campo de la geotecnia y el propio Bieniawski la ha recomendado para su aplicación en taludes.

La clasificación contiene elementos claves para su aplicación a los taludes, dentro de los cuales podemos citar la caracterización global de la masa rocosa (incluyendo frecuencia, estado y agua en las juntas), evaluación de la diferencia entre los rumbos de la cara del talud y de las familias predominantes de discontinuidades y de la diferencia entre los buzamientos de la cara del talud y de las familias predominantes, ya que esa diferencia controla la emergencia de las juntas en la cara del talud, condición necesaria para las roturas planas y/o en cuña, y también la oblicuidad de la resultante de las tensiones que actúan sobre la junta; además, considera la relación entre el buzamiento de las juntas con los valores normales de la fricción (para roturas planas y/o cuña) y realiza una comparación entre las tensiones tangenciales (a lo largo de las juntas con riesgo de rotura por vuelco) con la fricción que puede desarrollarse en ellas.

El índice SMR para la clasificación de taludes se obtiene del **RMR** sumando un factor de ajuste, que es función de la orientación de las juntas y un factor de excavación que depende del método utilizado (ver tabla 2.7).

Tabla 2.7 Factor de ajuste para las juntas (Romana, 1985).

Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	$ \alpha_j - \alpha_s $	$> 30^0$	$30^0 - 20^0$	$20^0 - 10^0$	$10^0 - 5^0$	< 5
T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
P/T	F_1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	$ \beta_j $	$< 20^0$	$20^0 - 30^0$	$30^0 - 35^0$	$35^0 - 45^0$	$> 45^0$
	F_2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F_2	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	$> 10^0$	$10^0 - 0^0$	0^0	$0 - (-10^0)$	$< -10^0$
T	$\beta_j + \beta_s$	$< 110^0$	$110^0 - 120^0$	$> 120^0$		--
P/T	F_3	0	-6	-25	-50	-60

P. rotura plana

T. rotura por vuelco

α_s . dirección de buzamiento del talud

α_j . Dirección de buzamiento de las juntas

β_s . Buzamiento del talud

β_j . buzamiento de las juntas

El factor de ajuste de las juntas es producto de tres subfactores:

F_1 depende del paralelismo entre el rumbo de las juntas y de la cara del talud. Varía entre 1.0 (cuando ambos rumbos son paralelos) y 0.15 (cuando el rumbo entre ambos es mayor de 30^0 y la probabilidad de rotura es muy baja). Estos valores empíricos se ajustan a la expresión:

$$F_1 = (1 - \text{sen } \alpha_j - \alpha_s)^2$$

Siendo los valores de α_j y α_s los valores del buzamiento de la junta (α_j) y del talud (α_s).

F_2 depende del buzamiento de la junta en la rotura plana. En cierto sentido es una medida de la probabilidad de la resistencia al esfuerzo cortante de la junta. Varía entre 1.0 (para juntas con buzamiento superior a 45^0) y 0.15 (para juntas con buzamiento inferior a 20^0). Fue establecido empíricamente pero se ajusta a la ecuación:

$$F_2 = \text{Tg}^2 \beta_j$$

Donde β_j es el buzamiento de la junta. F_2 vale 1.0 para rotura por vuelco.

F_3 refleja la relación entre los buzamientos de la junta y el talud. Se mantienen los valores propuestos por Bieniawski en 1976 que son siempre negativos.

Para roturas planas F_3 expresa la probabilidad de que las juntas afloren en el talud. Se supone que las condiciones son “normales” cuando el buzamiento medio de la familia de juntas es igual a la del talud y por lo tanto aflorarán unas pocas juntas. Cuando el talud buza más que las juntas, casi todas afloran y las condiciones serán “muy desfavorables” lo que supone un valor de F_3 de -60 (para $\beta_s - \beta_j > 10^0$), o “desfavorables” lo que supone un valor de F_3 de -50 (para $0 < \beta_s - \beta_j < 10^0$). La diferencia de F_3 “normal” (que es -25) es muy grande.

Para la rotura por vuelco no se supone que puedan existir condiciones desfavorables, o muy desfavorables, ya que el vuelco rara vez produce roturas bruscas y en muchos casos los taludes con vuelcos se mantienen.

F₄ factor de ajuste según el método de excavación.

- Los **taludes naturales** son mas estables, a causa de los procesos previos de erosión sufridos por el talud, y de los mecanismos internos de protección que muchos de ellos poseen (vegetación, desecación superficial, drenaje torrencial, etc.) $F_4 = +15$.
- el **precorte** aumenta la estabilidad de los taludes en media clase $F_4 = +10$.
- las técnicas de **voladura suave (recorte)**, bien ejecutadas, también aumentan la estabilidad de los taludes, $F_4 = +8$.
- las **voladuras normales** aplicadas con métodos razonables no modifican la estabilidad, $F_4 = 0$.
- las **voladuras defectuosas** son muy frecuentes y pueden dañar seriamente la estabilidad, $F_4 = -8$.
- la **excavación mecánica** de los taludes por ripado sólo es posible cuando el macizo rocoso está muy fracturado o la roca blanda. Con frecuencia se combina con prevoladuras poco cuidadas. Las caras del talud presentan dificultades de acabado. Por ello el método ni mejora ni empeora la estabilidad, $F_4 = 0$.

El valor final del índice de clasificación **SMR** es:

$$SMR = RMR + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4$$

El procedimiento a seguir es obtener el índice SMR para cada una de las familias de juntas. Se adoptará para el talud el valor menor del índice SMR obtenido para cada familia. Según el valor del índice **SMR** se obtienen cinco clases de estabilidad (ver tabla 2.8).

Clase	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Tabla 2.8 Clases de estabilidad según los valores del SMR.

Métodos de sostenimiento sugeridos por la clasificación **SMR**.

Las medidas pueden agruparse en 6 clases diferentes:

- Sin sostenimiento

$$SMR > 65$$

- Ninguna
 - Saneamiento
- Protección $45 < SMR < 70$
 - Zanjas de pie
 - Vallas (de pie o de talud)
 - Redes (sobre la superficie del talud)
 - Refuerzo $30 < SMR < 75$
 - Bulones
 - Anclajes
 - Hormigón $20 < SMR < 60$
 - Gunita
 - Hormigón dental
 - Contrafuertes y/o vigas
 - Muros de pie
 - Drenaje $10 < SMR < 40$
 - Superficial
 - Profundo
 - Reexcavación $10 < SMR < 30$
 - Tendido
 - Muros de contención

Para facilitar el análisis de estabilidad de los taludes, fueron confeccionadas fichas y usadas en la recopilación y síntesis de la información de campo (ver tabla 2.9). en las mismas se recogen datos sobre la geometría de los taludes, de la masa desplazada, del agrietamiento y tipos de discontinuidades, además se recogen datos referentes a la existencia de flujos de agua, se ofrece un dibujo de la situación observada en cada talud o deslizamiento.

COORDENADAS	X:	Y:	Z:	PRESENCIA DE FLUJOS DE AGUA:	
TIPO DE MOVIMIENTO				OBSERVACIONES:	
Rotacional	<input type="text"/>	Suelo	<input type="checkbox"/> Residual		
Planar	<input type="text"/>		Coluvial	<input type="text"/>	
Cuña	<input type="text"/>				
Vuelco	<input type="text"/>	Roca	<input type="checkbox"/>		
Derrubio	<input type="text"/>				
Otros	<input type="text"/>				
TIPO DE FORMACION:				DIBUJO DE LA MASA DESPLAZADA	
CAUSAS:				<div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div>	
POTENCIA DE LA MASA DESPLAZADA (m)					
Máxima	<input type="text"/>				
Mínima	<input type="text"/>				
Dimensiones de la masa (m)					
En sentido del movimiento		<input type="text"/>			
Perpendicular al movimiento		<input type="text"/>			
DATOS ACERCA DEL TALUD					
Dirección	<input type="text"/>	Inclinación	<input type="text"/>		
Altura	<input type="text"/>				
Discontinuidades:					
Tipo: <input type="text"/>					
Rumbo	Acimut	Buzamiento	Espaciamiento	Observaciones	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
				NOMBRE DEL OBSERVADOR:	
				FECHA:	

Tabla 2.9 Ficha elaborada para la colección de los datos de los taludes y deslizamientos.

2.4 Método de cálculo del factor de seguridad.

El método empleado en el análisis la estabilidad de los taludes es el propuesto por Hoek y Bray en 1977 (Inst. Tec. Geo-Min. Esp., 1991), para el calculo del factor de seguridad según rotura tipo cuña.

Se le llama rotura por cuña a aquella producida a través de dos discontinuidades dispuestas oblicuamente a la superficie del talud, con la línea de intersección de ambas aflorando en la superficie del mismo y buzando en sentido desfavorable. Este tipo de rotura se origina preferentemente en macizos rocosos en los que se da la disposición adecuada, en orientación y buzamiento de las discontinuidades.

Si se representa una sección vertical del talud por la línea de intersección de los dos planos sobre los que se desliza la cuña (ver figura 2.2), la condición geométrica que hace posible el deslizamiento es:

$$\psi_i < \psi_{ti}$$

ψ_i : ángulo de inclinación de la línea de intersección, cuya dirección es la dirección del deslizamiento.

ψ_{ti} : ángulo de inclinación del talud, medido en la sección vertical indicada, que sólo será igual al ángulo del talud, ψ_t si la línea de intersección está contenida en una sección perpendicular al mismo.

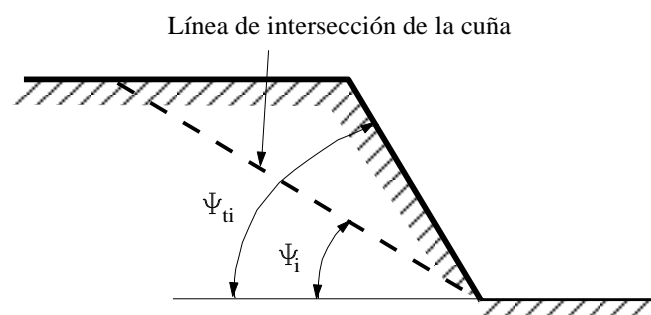


Figura 2.2. sección vertical del talud por la línea de intersección. La condición de rotura por cuñas es $\psi_i < \psi_{ti}$.

A continuación se plantea el problema en el caso más general. Se considera la cuña representada en la figura 2.3; la cuña está definida geoméricamente por el plano del

talud, el plano situado por encima de la cresta del mismo, los planos de deslizamiento A y B y una grieta de tracción que se puede suponer plana y a la que se llamará plano C.

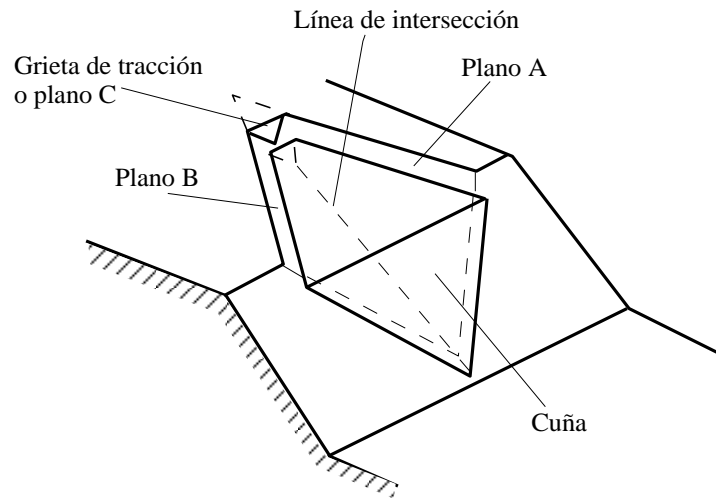


Figura 2.3. Definición geométrica de la cuña.

Se considera la acción de presiones intersticiales sobre los planos A, B y C y la acción de un terremoto cuyo efecto se asimila estáticamente a una aceleración horizontal a_H y otra vertical a_V (ver figura 2.4).

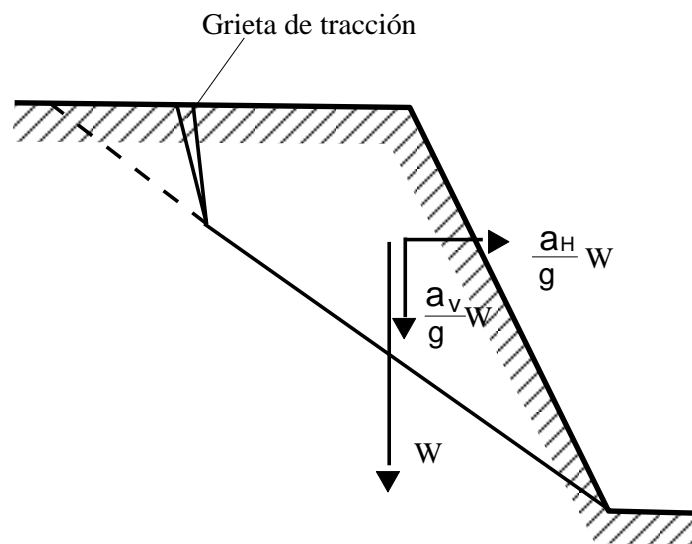


Figura 2.4. Sección vertical del talud por la línea de intersección. Efecto del terremoto sobre la cuña.

Las fuerzas actuantes son las siguientes:

U_A , U_B : resultantes de presiones intersticiales sobre los planos A y B. Actúan normalmente a dichos planos.

V: resultante de presiones intersticiales sobre el plano C. Actúa normalmente a dicho plano.

$W_V = W(1+a_v/g)$. Fuerza vertical debida al peso de la cuña y a la acción del terremoto.

$W_H = Wa_H/g$. Fuerza horizontal debida al terremoto. Está contenida en el plano vertical que contiene a la línea de intersección por ser esta la disposición pésima.

W: peso de la cuña.

G: aceleración de la gravedad.

El factor de seguridad FS se obtiene como cociente entre las fuerzas resistentes del terreno y las fuerzas que tienden a provocar el deslizamiento. Se supone despreciable el efecto sobre la estabilidad de la cuña de los momentos de las fuerzas actuantes. La expresión que define el FS es:

$$FS = \frac{c_A' A_A + c_B' A_B + N_A \operatorname{tg} \varphi_A' + N_B \operatorname{tg} \varphi_B'}{F_D}$$

Donde:

c_A' , c_B' : cohesión efectiva en las superficies de deslizamiento A y B.

φ_A' , φ_B' : ángulo de rozamiento interno efectivo en las superficies de deslizamiento A y B.

$N_A = W_{VA} - W_{HA} - U_B - V_B$. es la reacción normal efectiva sobre el plano B.

$F_D = W_{VD} + W_{HD} + V_D$. Es la resultante de las componentes de las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento.

Hoek y Bray simplificaron, el cálculo del factor de seguridad ante roturas tipo cuña. A continuación se describe lo expuesto por ellos (Inst. Tec. Geo-Min. Esp., 1991).

Se considera una cuña sin grieta de tracción, con el mismo ángulo de rozamiento en las dos superficies deslizantes y cohesión nula en ambas. El macizo está seco y no existe acción sísmica. En estas condiciones:

$$U_A = U_B = V = W_H = c_A' = c_B' = 0$$

$$W_V = W$$

$$\varphi_A' = \varphi_B' = \varphi'$$

La única fuerza actuante es el peso W que se descompone en las tres direcciones indicadas. La componente en la dirección del deslizamiento se obtiene fácilmente de la sección vertical del talud por la línea de intersección, representada en la figura 2.5.

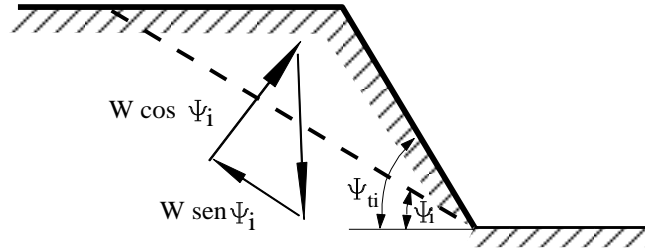


Figura 2.5. Descomposición vectorial del peso de la cuña en una sección vertical del talud por la línea de intersección (Inst. Tec. Geo-Min. Esp., 1991).

La componente normal a la línea de intersección, $W \cos \psi_i$, se descompone en las dos reacciones normales sobre los planos A y B, N_A y N_B . En este análisis se llamará siempre plano A, a aquel que forma menor ángulo con la horizontal.

Aplicando el equilibrio de fuerzas horizontales y verticales en una sección de la cuña perpendicular a la línea de intersección se obtiene:

$$N_A \operatorname{sen}(\beta - \xi/2) = N_B \operatorname{sen}(\beta + \xi/2)$$

$$N_A \cos(\beta - \xi/2) - N_B \cos(\beta + \xi/2) = W \cos \psi_i$$

Donde:

ξ : ángulo de apertura de la cuña o ángulo que forman los plano A y B.

β : ángulo que forma con la horizontal la bisectriz de la cuña.

De las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$N_A + N_B = \frac{W \cos \psi_i \operatorname{sen} \beta}{\operatorname{sen}(\xi/2)}$$

El factor de seguridad tiene la expresión:

$$FS = \frac{(N_A + N_B) \operatorname{tg} \varphi'}{W \operatorname{sen} \psi_i}$$

sustituyendo y simplificando se obtiene:

$$FS = \frac{\operatorname{sen} \beta}{\operatorname{sen}(\xi/2)} \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \psi_i} \quad \text{ó} \quad FS_c = K \cdot FS_p$$

siendo:

FS_c : factor de seguridad de una cuña sin cohesión y con terreno seco.

FS_p : factor de seguridad en rotura planar sin cohesión y con terreno seco, teniendo el plano de rotura una inclinación ψ_i .

K : factor de cuña que depende de los ángulos β y ξ .

Los ángulos β y ξ no se pueden medir directamente sobre el terreno sino que se obtienen a partir de la proyección estereográfica

En caso de considerar el terreno seco y cohesión nula la expresión del factor de seguridad queda:

$$FS = A \operatorname{tg} \varphi_A' + B \operatorname{tg} \varphi_B'$$

Es fácil apreciar que el valor de FS obtenido a partir de esta expresión es independiente de la altura del talud y de la dirección del plano del talud.

Los coeficientes adimensionales A y B definidos anteriormente se pueden obtener bien a partir de las expresiones dadas o bien a partir de los ábacos realizados por Hoek y Bray en 1967 (Inst. Tec. Geo-Min. Esp., 1991). Dichos ábacos presentan la ventaja de proporcionar los valores de A y B en función de los buzamientos y direcciones de buzamientos de los planos A y B, valores angulares que pueden obtenerse directamente en el terreno.

A partir de la aplicación lógica y racional de los métodos descritos anteriormente, se realizó la evaluación geomecánica integral del macizo rocoso, con vista al cálculo de la estabilidad de los taludes dentro del yacimiento Punta Gorda. En la figura 2.6 se muestra un organigrama, donde se refleja la interacción de los diferentes métodos empleados en las distintas etapas de trabajo, pasando de los métodos de campo usados para el reconocimiento, descripción y evaluación de las características de los taludes y de los movimientos encontrados en el área del yacimiento, además de la medición de los elementos yacencia de las discontinuidades; luego fue realizado el procesamiento de la información obtenida, preparación y análisis de las muestras orientadas a partir de técnicas de evaluación estructural, análisis de los datos de grietas mediante el uso de la proyección estereográfica con ayuda del software DIPS 2.2 (Hoek et al, 1982), y la evaluación preliminar de la estabilidad de los taludes mediante la misma técnica,

además, fueron aplicadas las clasificaciones geomecánicas (RQD, RMR y SMR). Posteriormente con todos los resultados obtenidos, y conociendo el método de fallo de los taludes, fue aplicado el método de cálculo correspondiente a la rotura por cuñas propuesto por Hoek y Bray (1967), para cuantificar el factor de seguridad de los taludes analizados.

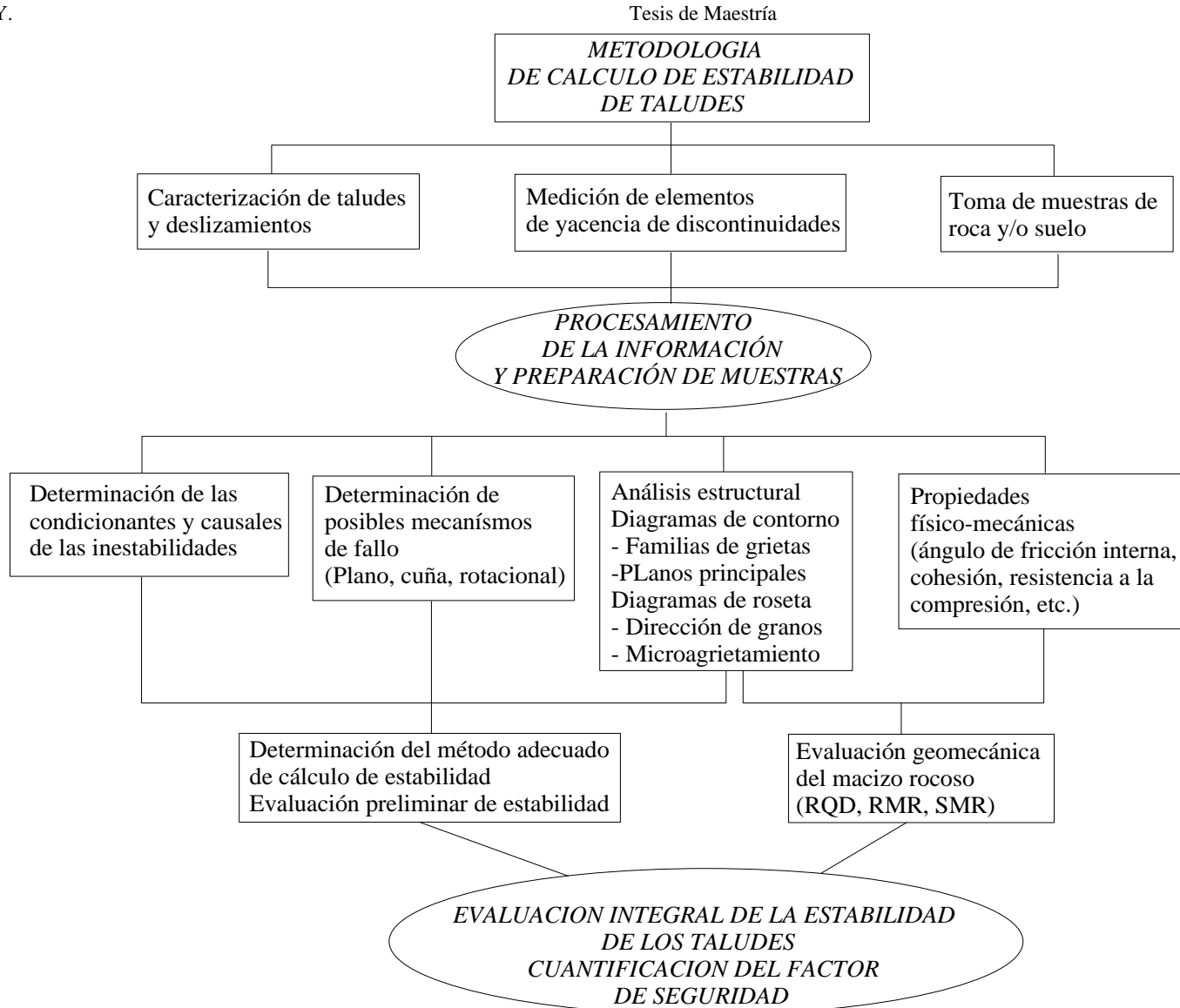


Figura 2.6 Organigramma general de la metodología empleada para la evaluación de la estabilidad de los taludes en el yacimiento Punta Gorda.

Capítulo III

Resultados de la evaluación geomecánica. Aplicación en la estabilidad de taludes en el yacimiento Punta Gorda.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la evaluación geomecánica del macizo rocoso, la cual consistió en un estudio de los dominios presentes en la fábrica, en la caracterización de la meteorización desde el punto de vista ingenieril y de las propiedades acuíferas de las rocas, además de una evaluación de la estabilidad de los taludes con la ayuda de las técnicas de proyección estereográfica y de los métodos de cálculo del factor de seguridad.

3.1 Análisis estructural.

El análisis estructural realizó a dos escalas de trabajo, una a nivel microscópico y otra mesoscópico en los diferentes afloramientos encontrados en el área de estudio.

En el estudio microscópico fueron analizados elementos de la fábrica de la roca tales como mediciones de las direcciones preferenciales de los granos minerales, microgrietas y líneas de clivaje. Las mismas fueron realizadas sobre la base de los bloques morfotectónicos propuestos por Rodríguez Infante (1998) y los resultados de las mediciones las ofrecemos de dos áreas o bloques estudiados, el bloque morfotectónico Cabaña Norte y El Toldo (ver mapa 3.1).

Bloque cabaña Norte.

En cuanto a la dirección preferencial de los granos minerales podemos observar en el diagrama de roseta (figura 3.1), la existencia de una dirección, E-W, lo cual nos indica una compresión en dirección N-S.

En la figura 3.2 podemos ver el comportamiento del microagrietamiento. En la misma existen dos direcciones principales:

Dirección 325° ($N35^{\circ} W$): revela la acción esfuerzos con una dirección N-S, o sea, suponiendo esto, forma un ángulo de 35° con la dirección del esfuerzo principal, donde actúan los esfuerzos principales secundarios ((2) o de cizalla.

Dirección 295° ($N65^{\circ}W$): este segundo sistema puede estar asociado con el cambio de la dirección de los esfuerzos principales hacia el este.

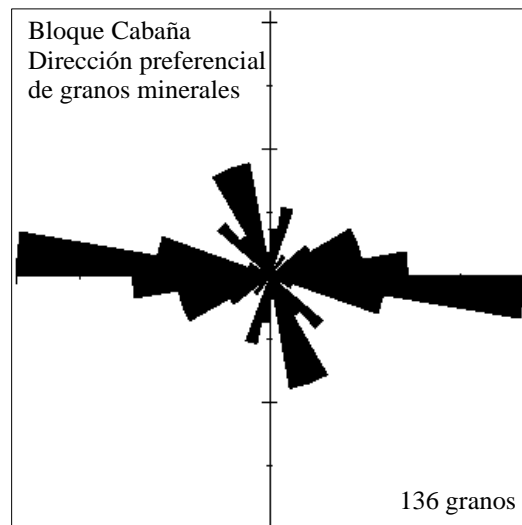


Figura 3.1 Diagrama de roseta de la dirección preferencial de los granos minerales en el bloque morfotectónico Cabaña.

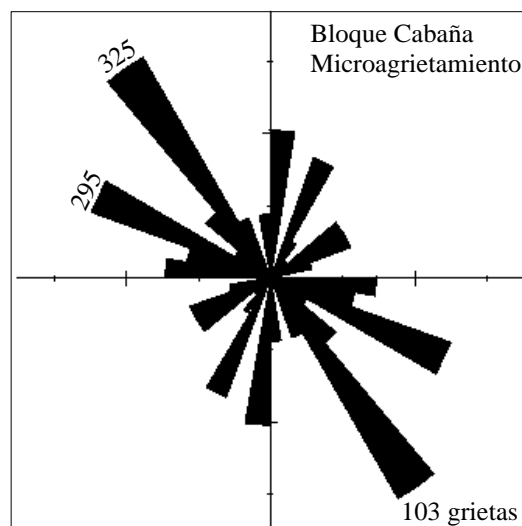


Figura 3.2 Diagrama de roseta del microagrietamiento medido en el bloque morfotectónico Cabaña.

Aparte de estos dominios anteriores, determinados en las fábricas debemos señalar la existencia de algunas microestructuras de interés, tales como, pequeños sistemas de pliegues fallados por esfuerzos continuos, con aspecto de microcabalgamientos con orientación N74°E (ver figura 3.3) revelando alguna compresión hacia esta dirección, la cual se observa también la figura 3.1 con una pequeña concentración de direcciones de los granos minerales.

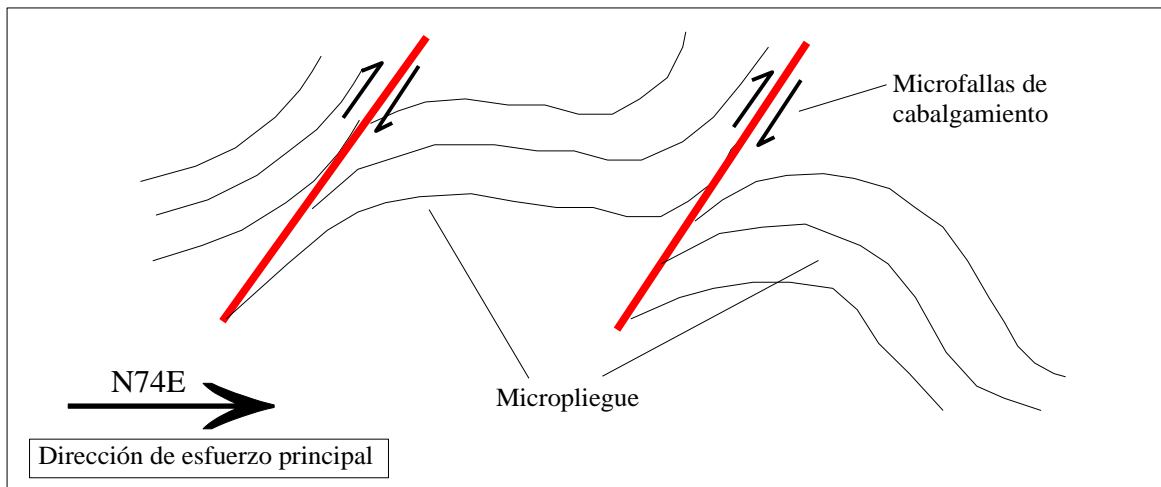


Figura 3.3 Estructura de cabalgamiento a nivel microscópico presentes en el bloque Cabaña.

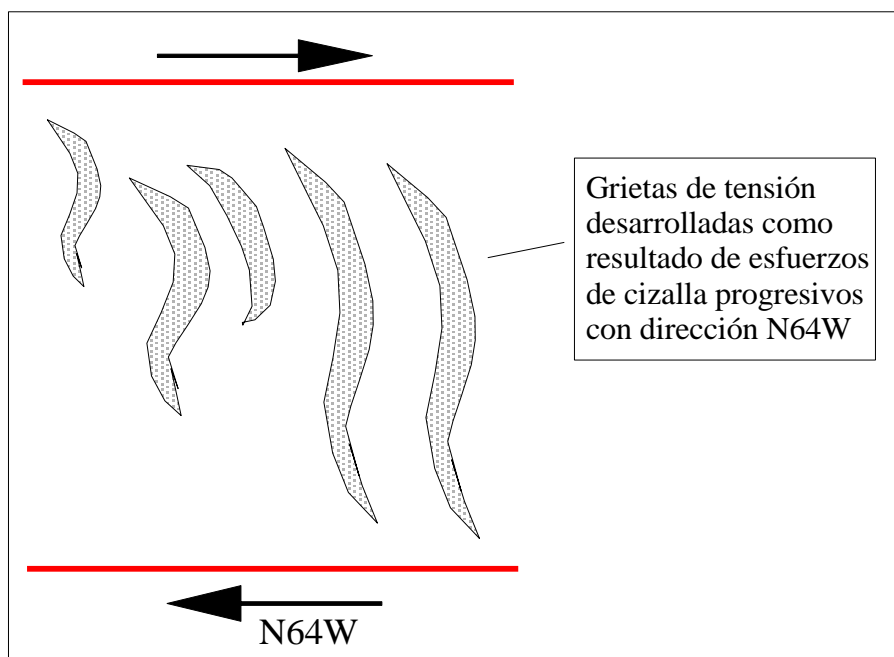


Figura 3.4 Estructuras típicas de zonas de cizalla. A nivel microscópico se observa como la ruptura de la roca no llega a ser total.

Además existen también estructuras típicas de zonas de cizallas, la cuales consisten en sistemas de grietas de tensión en forma de ese (S), con una orientación tal, que revelan movimientos generales hacia el este (ver figura 3.4).

Estudios mesoscópicos indican la presencia de planos de fallas con mineralización de magnesita, con elementos de yacencia 60o/30-50o (rumbo N30oW), las cuales por la posición espacial podrían asociarse a los planos de sobrecorrimiento de las escamas tectónicas; pero a la vez estos se encuentran afectados por una compresión con rumbo N60oW, la cual provocó plegamiento y luego la ruptura de los planos formándose retrocabalgamientos. En este bloque se midieron elementos de yacencia en afloramientos de los cuales a continuación presentamos los diagramas de contorno correspondientes:

En el diagrama de contorno del punto Gran Afloramiento, se observan cuatro familias de grietas (ver figura 3.5), las que presentan rumbos NW las consideramos representantes de los planos de sobrecorrimiento de las escamas tectónicas, las cuales fueron movidas de su posición inicial por compresiones hacia el oeste; y los sistemas N-NE parecen asociarse con grietas de tensión paralelas a los esfuerzos principales que comprimieron el macizo.

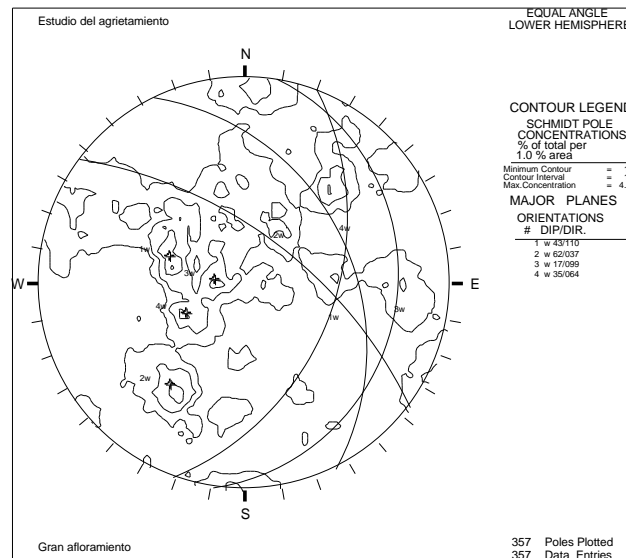


Figura 3.5 Diagrama de contorno y planos principales del agrietamiento en el punto Gran Afloramiento, bloque Cabañas.

En la figura 3.6, correspondiente al punto 1, se observa también la familia de dirección NW, y dos familias de rumbo NE que pueden asociarse a los esfuerzos compresivos dirigidos hacia el norte, formándose por esfuerzos de cizallas.

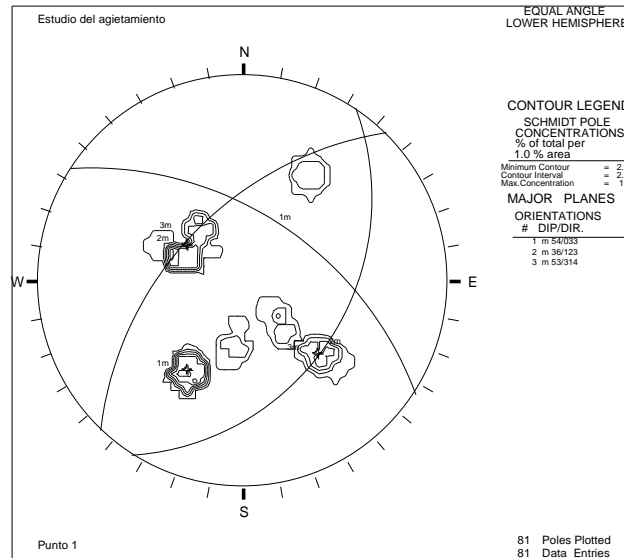


Figura 3.6 Diagrama de contorno y planos principales del agrietamiento en el punto 1, bloque Cabañas.

Bloque El Toldo.

La dirección preferencial de los granos indican una orientación de 315° (NW-SE) (ver figura 3.7). Esta orientación del dominio es la evidencia de que el macizo estuvo afectado por grandes esfuerzos de compresión perpendicularmente a esta dirección; pero comparándolo con la tectónica regional, donde los esfuerzos compresivos actuaron de sur a norte, se puede suponer entonces que el bloque sufrió una rotación, en sentido horario, alrededor de 45° .

De acuerdo al diagrama de microagrietamiento para este bloque (ver figura 3.8), tenemos dos direcciones predominantes 295° (N 65° W) y 315° (N 45° W), las cuales se pueden considerar formadas por los mismos esfuerzos, teniendo una pequeña variación en las direcciones por alguna rotación del bloque o un ligero cambio en la dirección de los esfuerzos actuantes. Los mismos pudiéramos asociarlos a una compresión N-S.

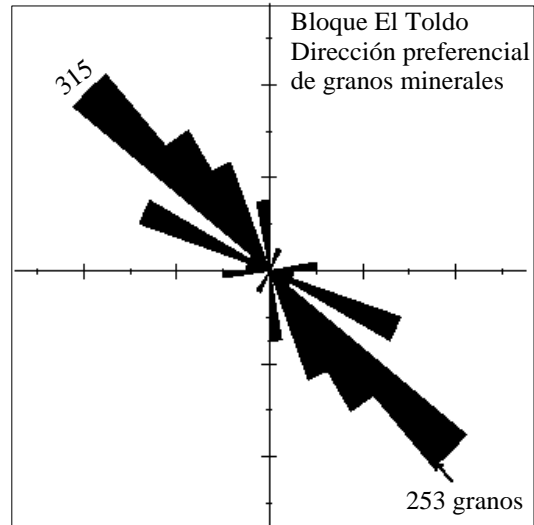


Figura 3.7 Diagrama de roseta de la dirección preferencial de los granos minerales en el bloque morfotectónico Moa.

En este bloque también fueron encontradas pequeñas estructuras relacionadas con esfuerzos de cizalla siniestros, que actuaron con rumbo N35°E (ver figura 3.9).

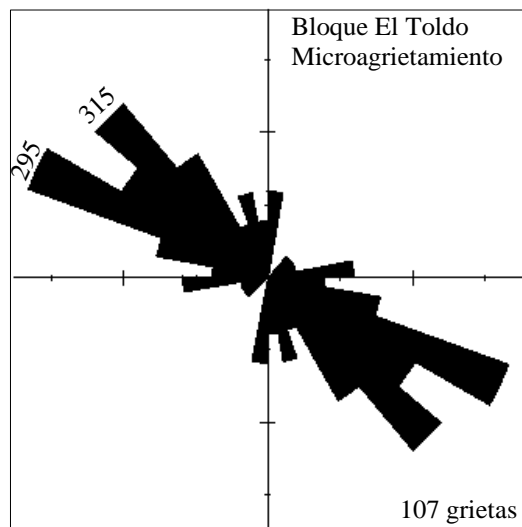


Figura 3.8 Diagrama de roseta del microgrietamiento medido en el bloque morfotectónico Moa.

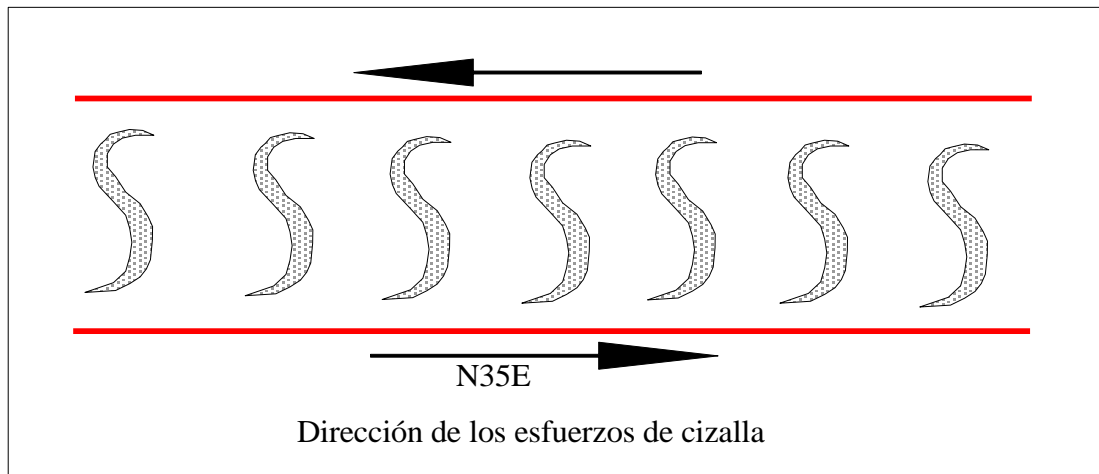


Figura 3.9 Estructuras microscópicas típicas de esfuerzos de cizalla presentes en el bloque Moa.

El estudio del agrietamiento realizado en este bloque siguió dos líneas principales, una para profundizar en el estudio cinemático y otra con el objetivo de servir de base para evaluación geomecánica de los taludes. De manera que, presentaremos los resultados de los diagramas de las principales familias de grietas y la clasificación geomecánica de los demás parámetros medidos, a partir de la metodología propuesta por Barton et al. (1978).

Las zonas de mediciones fueron en los causes de los ríos Yagrumaje, los Lirios, arroyo La Vaca y en fondo rocoso de los bloques explotados (ver tabla 3.1).

Área de mediciones	Número de familias	Buzamiento	Acimut de buzamiento	Apertura (cm)	Espaciamiento (cm)	Persistencia (m)	Rugosidad	Tipo de terminación de la grieta
Arroyo Los Lirios	1	81	94	1.01	20.31	0.90	70% - ondulada lisa 30% - plana rugosa	85% - d 15% - x
	2	62	46	0.84	28.56	1.44	100% - ondulada lisa	80% - d 20% - x
	3	58	150	1.2	22.25	1.01	100% - ondulada lisa	75% - d 25% - x
Arroyo La Vaca	1	60	191	0.38	10.71	0.45	68% - ond. – rugosa 32% - plana rugosa	68% - d 32% - x
	2	68	350	0.80	12.91	0.35	100% - ond. – rugosa	100% - d
	3	42	26	0.61	12.75	0.90	100% - plana rugosa	100% - x
Río Yagrumaje	1	50	86	-	-	-	-	-
	2	50	45	-	-	-	-	-
Bloque N-50	1	55	185	0.76	16.5	0.57	43% - pulida 43% - suave 14% - ondulada	-
	2	39	210	0.51	13.12	1.62	62% - plana 12% - ondulada 26% - pulida	-
	3	61	109	0.9333	14	0.333	68% - suave 18% - ondulada 14% rugosa	-

Tabla 3.1 Características generales del agrietamiento en el área del yacimiento Punta Gorda.

Río Los Lirios.

Existen tres familias fundamentales de grietas (ver figura 3.10 y tabla 3.2). Las aperturas son considerables, clasificadas como abiertas de forma general por las cuales fácilmente puede ocurrir la filtración de flujos de agua. Por las características de los espaciamentos y continuidad los bloques formados entre ellas son de pequeños tamaños, y las superficies

con bajo ángulo de rozamiento.

Arroyo los Lirios	Familia 1	Familia 2	Familia 3
Acimut	94	46	150
Buzamiento	81	62	58
Apertura (cm)	1.01	0.84	1.2
Clasificación	Muy abierta	Moderadamente abierta	Muy abierta
Espaciamiento (cm)	20.31	28.56	22.25
Clasificación	Moderado	Moderado	Moderado
Persistencia (m)	0.90	1.44	1.01
Clasificación	Muy baja	Baja	Baja
Superficie	Ondulada lisa	Ondulada lisa	Ondulada lisa
Terminación	D	D	D
Clasificación	Subsistemática	Subsistemática	Subsistemática

Tabla 3.2 Clasificación de los parámetros del agrietamiento en el río Los Lirios.

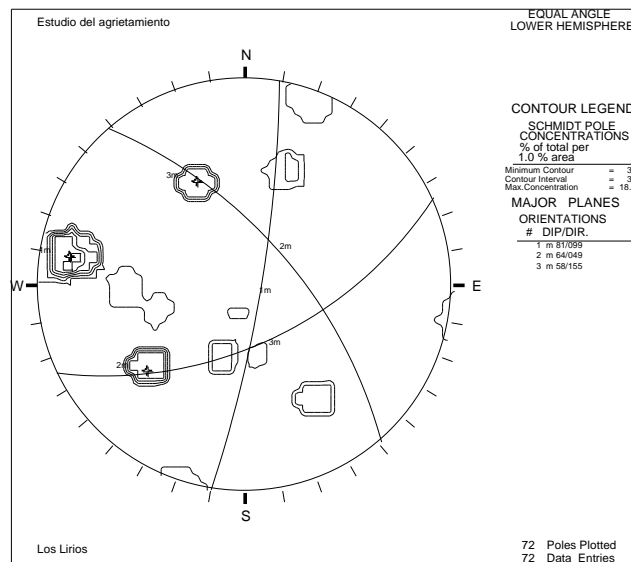


Figura 3.10 Diagrama de contorno y planos principales del agrietamiento en el cause del Río Los Lirios.

Río Yagrumaje.

En el cause de este río solo se pudieron medir los elementos de yacencia de las grietas. Las mediciones se realizaron en dos áreas, Yagrumaje y Yagrumaje parte baja (ver mapa 3.2).

En la zona Yagrumaje se determinaron dos familias de grietas (ver figura 3.11 y tabla 3.3), relacionadas con esfuerzos compresivos de dirección N-S; la familia 1 por esfuerzos de tracción, y la 2 correspondientes a cizallas.

Río Yagrumaje	Familia 1	Familia 2
Acimut	86	45
Buzamiento	50	50

Tabla 3.3 Familias de grietas principales medidas en el cause del río Yagrumaje.

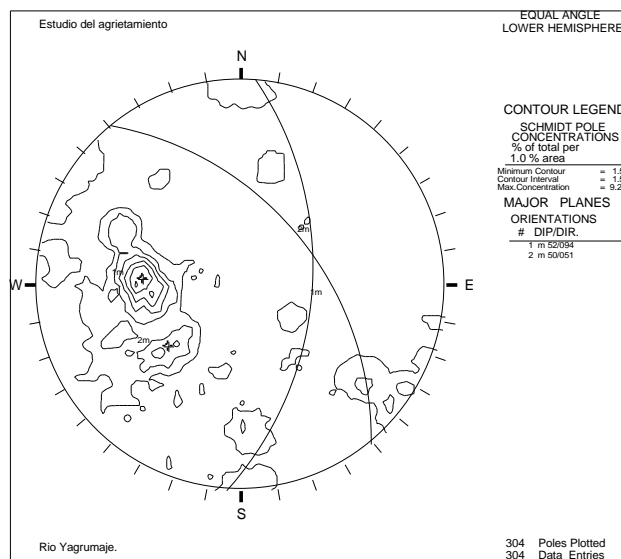


Figura 3.11 Diagrama de contorno y planos principales en el cause del Río Yagrumaje.

En la parte baja del cause (detrás del transportador), tenemos una situación anómala. Podemos observar en el diagrama de contorno (ver figura 3.12), la existencia de varias familias de grietas, de las cuales, los planos se disponen en forma de abanico o enrejado, siendo evidente la acción de esfuerzos tectónicos con varias direcciones que geológicamente pudiera ser una zona de nudo tectónico, por la conjunción de dos o más

fallas.

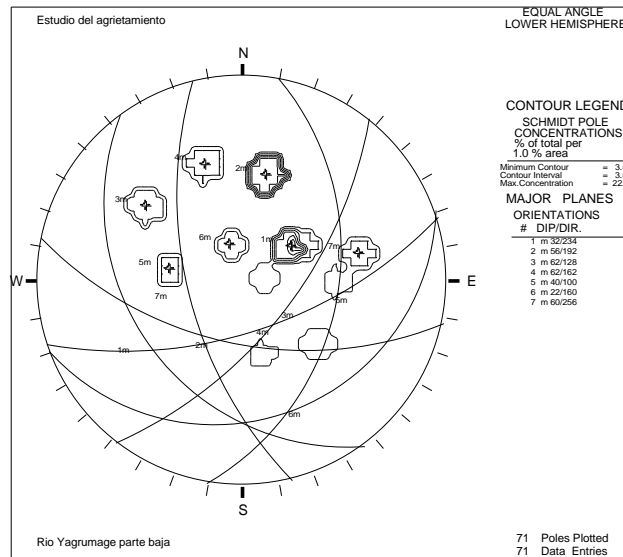


Figura 3.11 Diagrama de contorno y planos principales en el cause del Río Yagrumaje (parte baja).

Arroyo La Vaca.

En el cause se determinaron tres familias (ver figura 3.13 y mapa 3.2) con aperturas moderadas. Al parecer por las características de las superficies de las grietas de las familias 1 y 2 fueron producidas por esfuerzos de tracción; y por la posición que tienen las mismas, pudieran pertenecer a grietas formadas en la cúpula de las grandes estructuras, perpendiculares a la dirección de esfuerzos principales.

Arroyo La Vaca	Familia 1	Familia 2	Familia 3
Acimut	191	350	26
Buzamiento	68	68	42
Apertura (cm)	0.38	0.80	0.61
Clasificación	Moderadamente abierta	Moderadamente abierta	Moderadamente abierta
Espaciamiento (cm)	10.71	12.91	12.75
Clasificación	Cerrado	Cerrado	Cerrado
Persistencia (m)	0.45	0.35	0.90
Clasificación	Muy baja	Muy baja	Muy baja
Superficie	Ondulada rugosa	Ondulada rugosa	Plana rugosa
Terminación	D	D	X
Clasificación	Subsistemática	Subsistemática	Sistemática

Tabla 3.4 Clasificación de los parámetros del agrietamiento en el cause del Arroyo La Vaca.

El sistema 3 está formado por grietas de cizalla, formadas en la dirección de los esfuerzos principales secundarios y es la que le da la forma actual de los bloques debido a su sistematicidad.

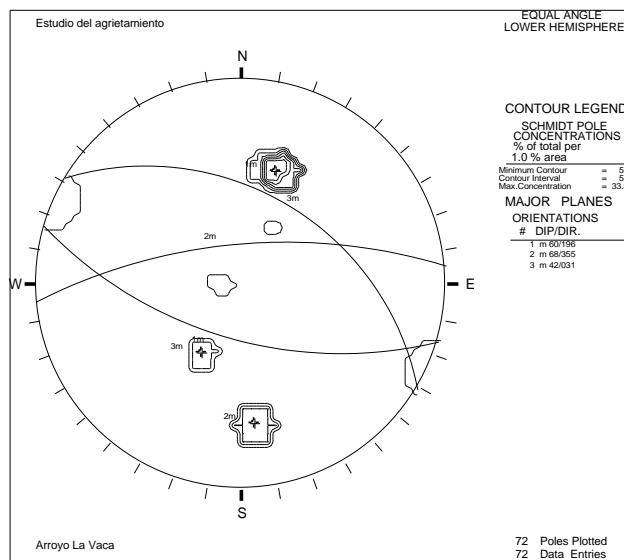


Figura 3.13 Diagrama de contorno y planos principales en el cause del arroyo La Vaca.

Bloque N - 50	Familia 1	Familia 2	Familia 3
Acimut	185	210	109
Buzamiento	55	39	61
Apertura (cm)	0.76	0.51	0.93
Clasificación	Moderadamente abierta	Moderadamente abierta	Moderadamente abierta
Espaciamiento (cm)	16.5	13.12	14
Clasificación	Cerrado	Cerrado	Cerrado
Persistencia (m)	0.57	1.62	0.33
Clasificación	Muy baja	Baja	Muy baja
Superficie	Pulida lisa	Plana	lisa

Tabla 3.5 Clasificación de los parámetros del agrietamiento en el bloque N-50.

Bloque N-50.

Dentro de la excavación realizada durante el minado en el bloque citado determinamos la existencia de tres familias de grietas. Las familias se comportan igual que en las áreas anteriores en cuanto a la apertura. Por la características de las superficies parece que las familias 1 y 2 son de cizalla (ver tabla 3.5).

Bloque R-49.

Dentro del bloque de explotación R-49 fue encontrada una estructura plegada en forma de anticlinal en la cual fueron medidas todos los sistemas de grietas; la consideramos de gran valor geológico porque es una prueba de la respuesta del macizo serpentizado a los esfuerzos tectónicos a los cuales estuvo sometido (ver figura 3.14 y tabla 3.6).

Tabla 3.6 Clasificación de los parámetros de los sistemas de grietas del pliegue.

Pliegue	Familia 1	Familia 2	Familia 3	Familia 4
Acimut	88	22	40	80
Buzamiento	230	164	316	340
Apertura (cm)	0.44	1.34	3.25	0.30
Clasificación	Moderadamente ancha	Muy ancha	Muy ancha	Moderadamente ancha
Espaciamiento (cm)	10.6	14.4	26.25	50
Clasificación	Cerrado	Cerrado	Moderado	Moderado
Persistencia (m)	10	20	30	3
Clasificación	Alta	Alta	Muy alta	Media
Superficie	Plana	Ondulada lisa	Ondulada	Ondulada lisa

De acuerdo a las características de las superficies de las familias de grietas y a su posición

en la estructura determinamos que la familia 1 se corresponde con grietas de tracción formadas paralelas al esfuerzo principal mayor, el cual actuó hacia el NW. Las familias 2 y 3 se corresponden con grietas de fricción formadas paralelamente entre sí dándole una configuración pseudoestratificada al macizo rocoso observándose en los flancos de la estructura.

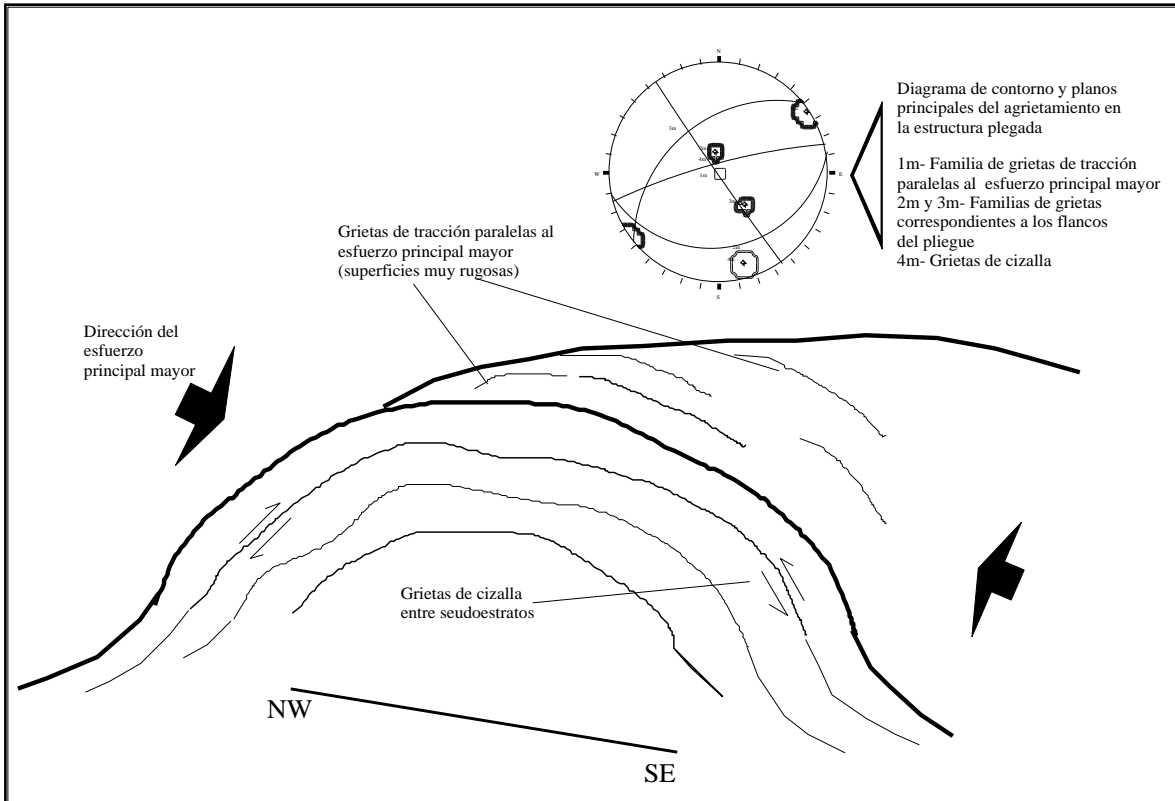


Figura 3.14 Diagrama de contorno y planos de las familias de grietas principales en la estructura plegada. El eje está inclinado al NE. Debajo, esquema del pliegue con la dirección de los esfuerzos principales y la distribución del agrietamiento.

Para tener una idea global de las características estructurales del área del yacimiento se hizo un diagrama de contorno con todos los datos (ver figura 3.15), observándose el predominio de tres familias de grietas, una con dirección NS, la segunda sublatitudinal y la última NW.

A partir del análisis estructural realizado, podemos concluir que el macizo rocoso estuvo afectado por esfuerzos de compresión norte-sur, provocando la compresión de los granos minerales y dándole dirección preferencial EW. Además estuvo afectado por una

compresión hacia el oeste, provocando estructuras plegadas en zonas donde la roca se comportó plásticamente (bloque Toldo), y estructuras de cabalgamiento en zonas donde los esfuerzos sobrepasaron los límites de resistencia de la roca (bloque cabañas). En el caso del bloque El Toldo, parece haber experimentado rotación en sentido horario alrededor de 45° , si asumimos que la dirección de los esfuerzos compresivos principales actuaron de sur a norte (Rodríguez, 1999).

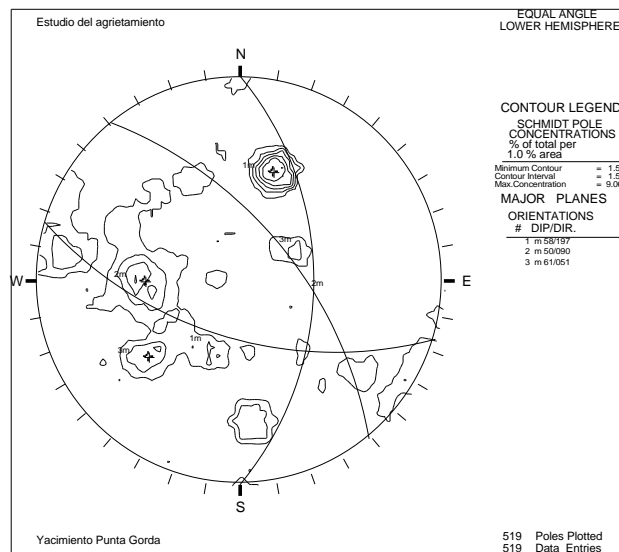


Figura 3.15 Diagrama de contorno y planos principales del área del yacimiento.

En base a los resultados obtenidos en el análisis estructural, presentamos un esquema de la estructura del macizo rocoso, con la orientación de los esfuerzos principales conjuntamente con los sistemas de grietas asociados a estos (ver figura 3.16). En el se observan pares conjugados de grietas de cizallas formando ángulo agudo con la fuerza de deformación (S-N) y grietas de tensión paralelas este esfuerzo y perpendiculares al eje de la estructura, formadas inicialmente. En la segunda condición de deformación, al seguir actuando la compresión, se produce una curvatura elástica del macizo, formándose grietas de tensión paralelas al eje y sistemas de grietas de cizalla paralelas también al eje, situadas entre los pseudoestratos originados por la misma curvatura.

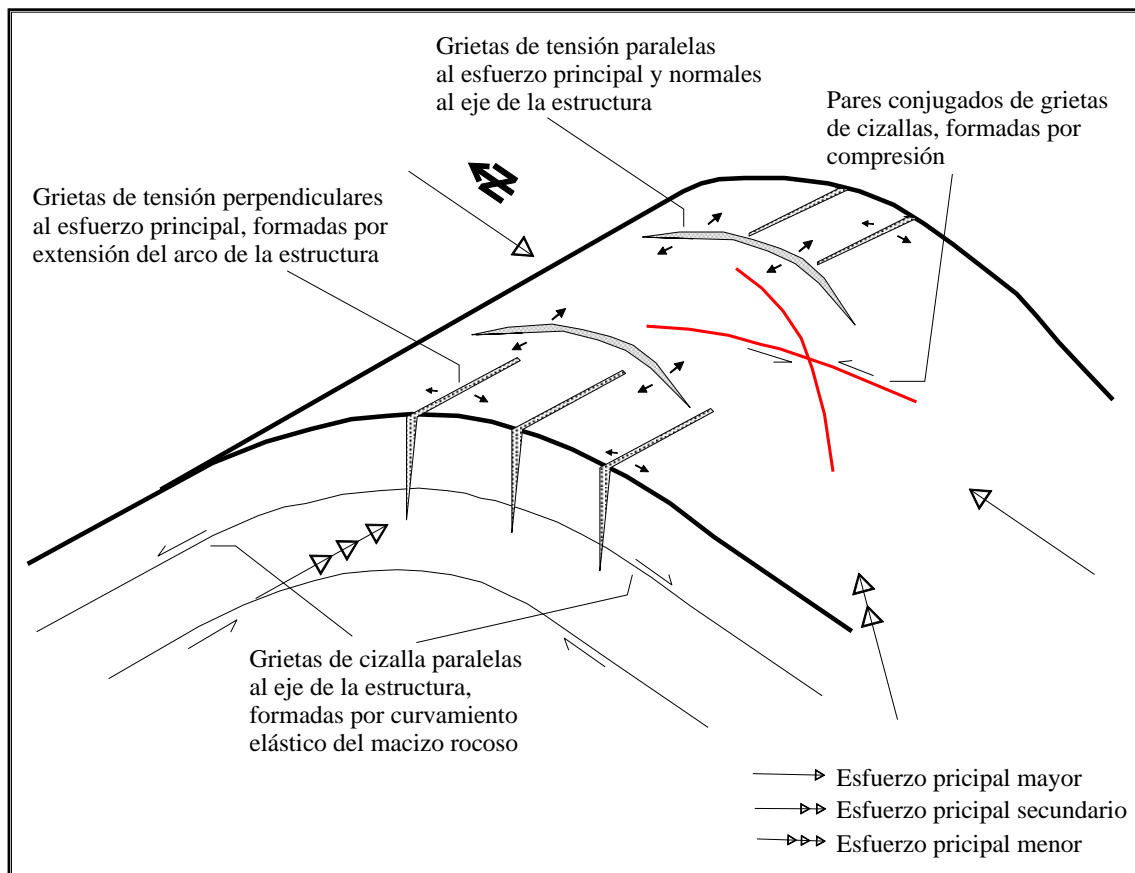


Figura 3.16 Esquema de la geometría y sistemas de fracturas observadas en el macizo serpentinitico de la región de Moa.

3.2 Análisis de la meteorización.

La descripción ingenieril del fenómeno de meteorización en el área de estudio se hizo mediante a partir de índices, los cuales nos permitieron determinar los diferentes grados de meteorización en el perfil rocoso. Los mismos fueron usados en dependencia de su efectividad para determinar los rasgos característicos de cada grado, de esta manera tenemos índices tales como resistencia axial y permeabilidad, que nos brindan criterios para analizar todos los grados de meteorización, y tenemos otros como el RQD, que solo se puede usar hasta el grado altamente meteorizado, porque en grados superiores la roca en estado de suelo no se le puede aplicar el mismo. En la tabla 3.7 mostramos los índices utilizados para cada grado de meteorización.

Uno de los resultados obtenidos acerca de la meteorización de las rocas serpentinizadas fue en base a la aplicación del índice de alteración unificado (K_c). En la tabla 3.8 se muestran los resultados.

Clase y grado de meteorización		Roca fresca (I)	Débilmente meteorizada (II)	Moderadamente meteorizada (III)	Altamente meteorizada (IV)	Extremadamente meteorizada (V)	Suelo residual (VI)	
Inspección visual	Material de roca						Presencia de textura original	
		Grado de decoloración y desintegración física						
		Grado de descomposición química de piroxenos y olivino						
							Presencia de humus y raíces	
	Macizo rocoso	Decoloración en las juntas						
		Relación roca/suelo						
		Apertura y meteorización a través de las juntas						
Propiedades físicas y mecánicas	Material de roca	Resistencia a la tracción						
		Módulo de elasticidad y resistencia a la compresión uniaxial						
		Permeabilidad del material de roca						
		Porosidad, contenido de humedad y densidad						
		Velocidad sónica						
	Índice micropetrográfico y de microfractura							
	Macizo rocoso	Espaciamiento fracturas y RQD						
Permeabilidad relativa del macizo rocoso								

Tabla 3.7 Métodos utilizados para definir los grados de meteorización de las rocas serpentinizadas.

Clase	Descripción	K_c	K_v	K_{α}	K_a
I	Fresco	0	0	0	0
II	Bajo	0,07	0,018	0,15	0,01
III	Moderado	0,62	0,33	0,25	0,54
IV	Alto	7	0,42	0,67	23
V	Muy alto	12	0,72	0,95	42

Tabla 3.8 Clasificación de las rocas de acuerdo a los índices de alteración obtenidos.

De la aplicación de los índices micropetrográfico y de microfractura se pudo determinar el grado de alteración sobre la base del conteo del microagrietamiento y del porcentaje de minerales secundarios formados por la descomposición de la roca. En la tabla 3.9 se muestran los resultados de los mismos. En la tabla se puede observar una correspondencia entre el aumento del grado de alteración y descomposición de las rocas y el aumento del microagrietamiento y del porcentaje de minerales secundarios dado por el avance de la meteorización a través de las microfracturas.

Clase de meteorización	Grado	Micropetrográfico	Microfractura
Roca fresca	I	> 15	> 5
Levemente meteorizado	II	7 - 15	5 - 8
Moderadamente meteorizado	III	5 - 7	8 - 14
Altamente meteorizado	IV	3 - 5	14 - 25
Completamente meteorizado	V	< 3	< 25

Tabla 3.9 Resultados de la aplicación de los microíndices en las rocas serpentinizadas.

Sistema de clasificación propuesto para las rocas meteorizadas.

De la aplicación conjunta de los diferentes métodos resultó un sistema de clasificación de las rocas serpentínicas meteorizadas (ver tabla 3.10), el cual introduce una descripción ingenieril de la meteorización. En el sistema propuesto se combinan el uso una identificación y descripción geológica, el reconocimiento de propiedades ingenieriles y ensayos de laboratorio. La descripción y clasificación del material rocoso meteorizado propuesto está basado en la información geológica obtenida por la inspección visual y reconocimiento de rasgos típicos de la desintegración física y descomposición química de las rocas en los afloramientos, y en muestras de núcleos de perforación, además, de la información mecánica, física e hidráulica derivada de ensayos de campo y laboratorio, suplementados con observaciones microscópicas. El sistema propuesto esta basado en la identificación de varios grados de meteorización y en la proporción volumétrica de estos materiales con respecto a las discontinuidades.

Un rasgo importante de esta clasificación propuesta es que mostramos para cada clase el modo de fallo de taludes asociado a estas. De esta manera tenemos modo de fallo no estructural en el horizonte más meteorizado (grado VI), y en los demás grados se observa la influencia del control estructural fundamentalmente del agrietamiento y la esquistosidad; en los grados II, IV y V la roca con agrietamiento espaciado falla a través de las discontinuidades (planar, cuña, vuelco), pero a medida que la intensidad del agrietamiento se intensifica, la roca tiene un comportamiento tipo suelo, o sea que los movimientos son circulares.

Término	Grado	Descripción	RQD (%)	Roca/suelo (% roca)	Resistencia	Modo de fallo	Tipo de fallo
Roca fresca	I	No hay signos visibles de material meteorizado. La roca puede tener algunas grietas manchadas de óxidos de Fe.	90-100	95-100	Muy alta	Controlada por discontinuidades (grietas en las rocas serpentinizadas, clivaje y esquistosidad) (estructural)	Agrietamiento espaciado: Planar, cuña, vuelco, combinados.
Débilmente meteorizada	II	Manchas en las superficies de las discontinuidades. Meteorización desigual a través de la fábrica de la roca. La resistencia es parecida a la roca fresca. Mas del 90% es roca.	70-90	85-95	Muy alta a 45-55 % de la resistencia de la roca fresca		Agrietamiento cerrado: Circular, combinados (circular/cuña, planar/cuña)
Moderadamente meteorizada	III	La roca está manchada de limonita. Posee alguna resistencia, grandes piezas no pueden ser rotas con la mano. La roca fresca o decolorada se presenta como una estructura discontinua o en núcleos rocosos. Entre 50% - 90% es roca	30-70	55-85	25 % de la resistencia de la roca fresca		Fallos planares, en cuña a través de discontinuidades. Circular con agrietamiento estrechamente espaciado.
Altamente meteorizada	IV	Está tan debilitada por la meteorización que grandes piezas pueden ser separadas o desintegradas con la mano. Se pueden obtener núcleos perforando cuidadosamente. La fábrica original está intacta. Menos del 50% es roca.	10-30	15-55	12 % de la resistencia de la roca fresca	Material controlado por discontinuidades (clivaje fuerte, esquistosidad) (estructural)	Circular Cuña a través de grietas relícticas. Complejos
Extrem. meteorizada	V	Roca completamente descompuesta pero la fábrica es reconocible. No se pueden recuperar núcleos. Puede ser excavado con la mano con algún esfuerzo si está húmedo. Resistencia muy baja comparada con la roca fresca. Mas del 90% es suelo.	0-10	0-15	Extremadamente baja	Material controlado por grietas relícticas (estructural)	Erosión No circular Circular
Suelo residual	VI	La textura de la roca no es reconocible. Puede ser fácilmente excavado con la mano. Resistencia muy baja comparada con la roca fresca. Las capas superficiales contienen raíces de plantas y humus.	0	0	Extremadamente baja	No hay control estructural (no estructural)	

Tabla 3.10 Clasificación ingenieril del grado de meteorización propuesta para las rocas serpentinizadas.

3.3 Estudio de las propiedades acuíferas de las rocas.

El estudio hidrogeológico para la estabilidad de los taludes en el yacimiento Punta Gorda es de gran importancia no solo por los efectos de la presión hidrostática presente en el material laterítico (alta humedad natural, $w = 36 - 40\%$), sino por el hecho que el agua se mueva y ablande los estratos inferiores del perfil. Así la hidrogeología del yacimiento estará determinada por los flujos de aguas superficiales y subterráneas y por las condiciones climáticas, y la pendiente del terreno.

En primer lugar se debe precisar que en el Yacimiento Punta Gorda se identifica un solo acuífero. El manto acuífero se encuentra limitado en su base impermeable en la roca madre y en su parte superior por los ocreos intermedios. Su condición de acuífero se expresa porque además de almacenar agua, la trasmite a través de los espacios manifestados en el agrietamiento y el microagrietamiento de la roca serpentizada

Sobre la roca intensamente agrietada y alterada se encuentra la laterita con una alta concentración de material arcilloso, arcilloso arenoso capaz de contener, absorber y muy poco o lentamente transmitir el agua aunque puede admitir recargas importantes, de ahí su alta capacidad acuífera y humedad natural y que se denomina acuitardo.

En el corte aparecen suelos arcilloso y arcillas que pueden contener, retener y absorber agua pero no transmitirla, nos referimos a aquellas rocas que tiene la clasificación de acuicluso.

En el caso de los taludes en el yacimiento y de su estabilidad, acuitardo, y acuicluso que no dan agua en la excavación, pueden soportar presiones hidrostáticas que pueden ser la causa de roturas y ablandamiento del material de los taludes. En estos casos las fuerzas motoras se incrementarían debido al incremento de la presión hidrostática y no al flujo.

La forma del nivel freático en la ladera natural del yacimiento con dirección principal norte es consecuencia de diversos factores: la topografía del terreno y la geología del mismo (litología y tectónica regional y local) la cual nos brinda una permeabilidad variable. La

corteza de suelo laterítico solo influye en la posición del nivel piezométrico lo que provoca que existan zonas con alto contenido de agua y humedad.

Estudios del gasto realizado en el río Yagrumaje indican los cambios producidos a lo largo de su trayectoria; ver tabla 3.11.

Punto	Ubicación	Fecha	Gasto (m ³ /s)	Periodo
1	Límite de los bloques S-R/49	mayo-abril-95	0,85	lluvia
		mayo-96	0,76	lluvia
		mayo-97	0,70	seca
		julio-97	0,68	
2	Bloque P/56	abril-mayo-95	0,82	lluvia
		mayo-96	0,84	seca
		mayo-97	0,76	
		julio-97	0,64	
3	Bloque M/54	mayo-97	0,58	seca
		julio-97	0,46	
4	Bloque L/49(cerca del camino) hay un cambio del curso aguas abajo.	Mayo-96	0,58	lluvia
		mayo-97	0,47	seca
		julio-97	0,40	seca
		septiembre	0,89	lluvia
5	Bloque L/49	abril-mayo-95	0,85	
		mayo-96	0,76	lluvia
		mayo-97	0,70	seca
		julio-97	0,68	
		septiembre-97	0,93	
6	Bloque K/49. Debajo de líneas de alta tensión.	abril-mayo-95	No se midió.	no
		mayo-96	0,86	lluvia
		mayo-97	0,84	seca
		julio-97	0,70	seca
		septiembre-97	1,24	lluvia

Tabla 3.11 Resultados de las mediciones del gasto en el cause del Río Yagrumaje.

El agua que está presente en el yacimiento es producto del escurrimiento superficial, que se infiltra según la dirección predominante de los sistemas principales de fallas, además el río Yagrumaje, a lo largo de su trayectoria pierde una cantidad considerable de su caudal a través de sistemas de fallas con dirección NW que cortan el cause y se internan el macizo permitiendo la infiltración del agua a la zona del yacimiento, esto se puede observar en los gastos del río Yagrumaje, los cuales cambian durante su curso incluso en el tramo recto NS (bloques KL/49). El agua penetra a través de flujos por medio de las lineaciones tectónicas distribuyéndose a través del interior de la red de facturación del macizo rocoso cuyo

movimiento también tiene incidencia negativa en la resistencia al corte de las rocas y suelos de la mina.

Un gran número de manantiales del yacimiento Punta Gorda aparecen en cotas entre 90 y 94 metros de altura y coinciden con el drenaje subterráneo y la tectónica de falla N-S que atraviesa al mismo. Estos manantiales afloran en el contacto de la roca serpentizada con la corteza laterítica con un drenaje de dirección NW y N-S.

La relación entre el flujo de las aguas subterráneas del yacimiento y el agrietamiento de las rocas es evidente. Hoek y Bray (1977), propusieron un ábaco que relaciona el coeficiente de permeabilidad y el espaciado del agrietamiento de las rocas tomando como expresión:

$$k = g e / 12.v. b$$

donde:

e: apertura de las juntas.

v: viscosidad del agua (0,0101 cm²/seg. para agua destilada a 20 grados centígrados).

b: espaciado entre las grietas.

g: aceleración de la gravedad .

Ha quedado de manifiesto la relación entre ambos parámetros, lo que también implica la relación entre el esfuerzo normal aplicado a la fractura y la permeabilidad, al variar las aperturas según la magnitud de los esfuerzos. En la tabla 3.12 resumimos los valores del coeficiente de permeabilidad para las rocas serpentizadas y suelos lateríticos.

Coefficiente de permeabilidad para las rocas serpentinizada y suelos lateríticos.				
	k (cm/s)	Roca intacta	Roca fracturada	Suelo laterítico
Prácticamente impermeable	10^{-10}	Roca dura; gabros, diabasa serpentinita con grietas cerradas o cementadas.		Arcilla homogénea de alta mineralización composición montmorillonítica nontronita.
	10^{-9}			
	10^{-8}			
	10^{-7}			
Baja descarga mal drenaje	10^{-6}	Roca semidura agrietada y meteorizada.	Las grietas están rellenas de material arcilloso	Suelo laterítico arcilloso arenoso muy fino
	10^{-5}			
	10^{-4}			
	10^{-3}			
Alta descarga drenaje libre	10^{-2}	Roca semidura agrietada y meteorizada.	Roca agrietada	Laterita ferruginosa. Laterita con alto contenido de pedregones y material arenoso fino, aparecen bloques de rocas
	10^{-1}		Roca con grietas abiertas.	
	10		Rocas muy agrietadas.	
	10^2			

Tabla 3.12 Coeficiente de permeabilidad para las rocas serpentinizadas.

3.4 Evaluación geomecánica del macizo rocoso.

Los primeros trabajos realizados con vista al análisis geomecánico fueron de reconocimiento del área del yacimiento para caracterizar los taludes y los deslizamientos existentes. A continuación presentamos una síntesis de los elementos mas importantes registrados en las fichas usadas en la etapa de campo para este objetivo, y la posición de los taludes en el área se pueden ver en el mapa 3.3.

Talud 1 (Acimut: 0° , Inclinación: 70° , Bloque: N-50). Se observa un movimiento combinado rotacional/cuña, donde al parecer la causa ha sido un fuerte aguacero. El material deslizado es suelo laterítico de color amarillento donde existe una capa de ocre con concreciones ferruginosas en su superficie y serpentinita muy agrietada y alterada en su borde inferior, la masa desplazada presenta una potencia máxima de 20 m, y mínima de 15m; su longitud en sentido del movimiento es de 30m y perpendicular al movimiento 80

m. No existe vegetación y en las paredes es nula la existencia de flujos de agua, pero su base constituye el borde de un embalse por lo que el pie presenta una gran humedad. Cabe destacar que la corona no es semicircular sino que describe la forma de un triángulo y el avance del movimiento de la masa tiene una dirección preferencial de Este a Oeste

Talud 2 (Acimut: 350° , Inclinación: 75° , Bloque: N-50). Existe un movimiento rotacional pero desarrollado en el horizonte superior de ocres con abundantes concreciones ferruginosas de color carmelita oscuro, donde la masa desplazada presenta una potencia máxima desplazada de 15 m, su longitud en sentido del movimiento es de 5 m y perpendicular al movimiento de 15 m. No existe presencia de agua, ni de vegetación y el movimiento se encuentra en progreso hacia el Oeste y la corona tiene forma triangular típico de roturas tipo cuña.

Talud 3 (Acimut: 20° , Inclinación: 70° , Bloque: N-49). Se manifiesta un movimiento rotacional en suelo laterítico eluvial de color carmelita amarillento, donde la potencia máxima de la masa desplazada es de 12 m, con una longitud en sentido del movimiento de 60 m y perpendicular al movimiento de 20 m, no existe presencia de agua ni de vegetación. Este movimiento no fue reciente pues no se conservan los escalones y el material desplazado ha sido erosionado por las lluvias.

Talud 4 (Acimut: 0° , Inclinación: 73° , Bloque: Q-50). Se observa un deslizamiento rotacional en suelo laterítico de color carmelita rojizo donde la masa desplazada tiene una potencia máxima de 20 m, su longitud en sentido del movimiento es de 40 m y perpendicular al movimiento de 35 m. No existe vegetación alguna y en la base del mismo se observan pequeñas corrientes de agua superficial. Este movimiento no fue reciente pero aun se conservan algunos escalones y en el escarpe principal se observan superficies alisadas por la fricción durante el movimiento.

Talud 6 (Acimut: 65° , Inclinación: 65° , Bloque: R-52). Aparece movimiento combinado rotacional/cuña en suelo laterítico de color carmelita rojizo, siendo las lluvias la posible causal. La masa desplazada presenta una potencia de 15 m, y las dimensiones tanto en el

sentido como perpendicular al movimiento son de 15 m. En la superficie del mismo se observa vegetación reforestada, sus lados están muy humedecidos y existen pequeñas corrientes de agua superficiales en el frente de la masa desplazada.

Talud 8 (Acimut: 0° , Inclinación: 70° , Bloque: Q-49). Existe deslizamiento combinado cuña/planar en suelo laterítico de color carmelita amarillento cuya posible causa han sido las lluvias. La corona describe la forma de un triángulo. Tiene una potencia máxima de 8 m, con dimensiones en sentido del movimiento de 15 m y perpendicular al movimiento 25m. No existe vegetación, hay abundantes flujos de agua en la base del mismo, no es muy antiguo y existen presencia de intercalaciones de capas de arcillas rojizas.

Talud 10 (Acimut: 28° , Inclinación: 75° , Bloque: N-50). El movimiento observado es rotacional en suelo laterítico de color carmelita amarillento, la corona en forma triangular. La masa desplazada presenta una potencia máxima de 40 m y mínima de 5 m, su longitud en sentido del movimiento es de 60 m y perpendicular al movimiento de 50 m. Existe vegetación autóctona y pequeños flujos de agua en la base y unos metros mas arriba que circulan por grietas presentes en el material.

Para evaluar el macizo rocoso aplicando las clasificaciones seleccionadas para este objetivo (RMR y SMR), se utilizaron los datos obtenidos fundamentalmente en el reconocimiento de campo, el análisis estructural, en el cual se determinaron los principales sistemas de grietas y la caracterización geomecánica de los diferentes parámetros de las mismas; además de utilizar los datos de las características físico mecánicas de las rocas determinadas con los ensayos de laboratorio (ver tabla 3.13).

Propiedades	Serpentinitas		
	Mínimo	Máximo	Promedio
Densidad seca (g/cm ³)	2.34	2.90	2.65
Densidad saturada (g/cm ³)	2.41	2.93	2.69
Peso específico	2.69	2.91	2.50
Absorción (% en peso)	2.22	4.67	3.46
Absorción (% en volumen)	2.55	6.93	4.76
Porosidad (%)	0.96	11.90	6.44
Velocidad ondas P, en seco (m/s)	1220	3722	2473
Velocidad ondas P, saturada (m/s)	1098	2995	2048.3
Resistencia uniaxial (Kg/cm ²)	17.25	126.00	7179

Tabla 3.13 Propiedades mecánicas de las rocas serpentinizadas.

Además del estudio de las rocas duras y semiduras, se hizo un análisis de las características físico mecánicas del perfil de meteorización. En la figura 3.17 se muestran las características típicas de los horizontes ingeniero geológicos presentes en los taludes del yacimiento Punta Gorda; como se observa, existen cuatro horizontes los cuales se diferencian por su comportamiento mecánico y las propiedades físicas.

En la parte superior del corte existen grietas de tracción, las cuales se forman siguiendo discontinuidades relícticas presentes en la corteza laterítica, que se extienden desde el substrato rocoso hasta la superficie; a través de este agrietamiento se infiltran las aguas superficiales aumentando las presiones dentro de estas. El horizonte inferior es el más importante ya que constituye la base de los taludes y es el que corresponde con el horizonte acuífero, el cual está formado por serpentinita agrietada y altamente meteorizada, de manera que los sistemas de grietas presentan rellenos arenoso-arcillosos sobresaturados, con flujo de agua y bajo ángulo de fricción (residual). En este horizonte existen sistemas de grietas orientados en el mismo sentido de los taludes o formando cuñas y con buzamientos menores que los taludes, a través de los cuales se producen los movimientos del terreno.

Aparte de estas condiciones naturales que provocan inestabilidades, el factor antrópico manifiesto en las cortas mineras altera el equilibrio del sistema geomecánico roca/suelo, ya que se realizan hasta este horizonte inferior provocando el flujo de las aguas subterráneas

descalzando el pie de los taludes. Además estas aguas no encuentran buen drenaje y se acumulan formando grandes embalses que contribuyen a mantener gran humedad en la corteza laterítica que los circunda.

IV- Suelo laterítico color rojo vino oscuro con abundantes concreciones de hierro. Constituido por arcilla arenosa, húmedo, medio plástico, de consistencia muy blanda.

Índice de poros: 2.56

Índice de plasticidad: 17 %

Cohesión: 95 KPa

Ángulo de fricción: 30 grados

III- Suelo laterítico carmelita rojizo. Constituido por arcilla plástica con intercalaciones de arcilla arenosa, poco compacto, húmedo.

Índice de poros: 2.95

Índice de plasticidad: 21 %

Cohesión: 70 KPa

Ángulo de fricción: 17 grados

II- Suelo laterítico carmelita rojizo con vetas negras. Constituido por arcilla muy plástica, semisaturado, poco compacto, alta resistencia en estado seco.

Índice de poros: 2.25

Índice de plasticidad: 32 %

Cohesión: 105 KPa

Ángulo de fricción: 28 grados

I- Suelo serpentinitico de color verde amarillento. Constituido por arcilla plástica, húmeda, poco compacto. Presenta fragmentos de roca muy meteorizada. Constituye el horizonte acuífero.

Índice de poros: 2.70

Índice plástico: 26 %

Cohesión: 102 KPa

Ángulo de fricción: 15 grados

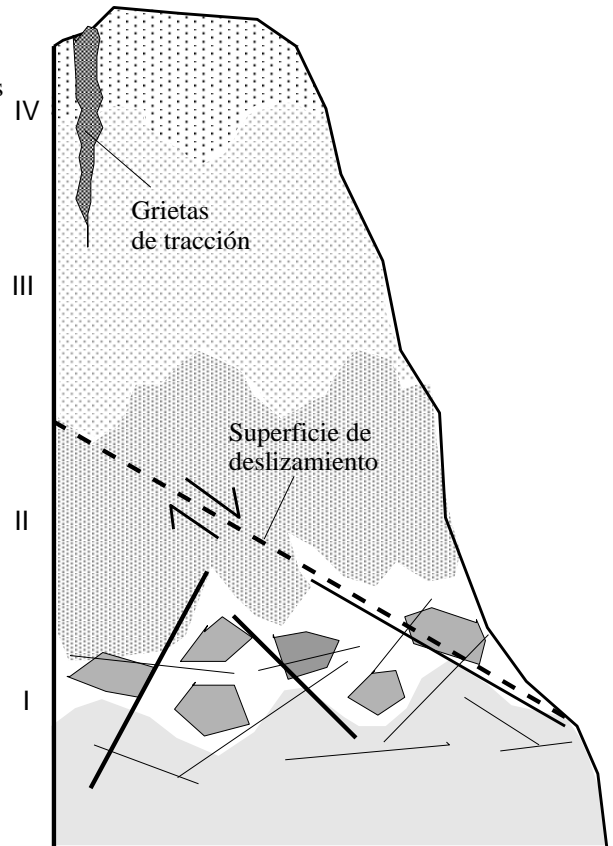


Figura 3.17 Esquema del perfil ingeniero geológico típico de los taludes del Yacimiento Punta Gorda.

En la tabla 3.14 se presentan los resultados de la evaluación geomecánica de los taludes a partir de la aplicación del índice SMR (incluye el RQD y RMR). Los principales resultados son que los valores obtenidos del SMR clasifican la estabilidad de los taludes de mala a muy mala, solo el talud 1 es menos inestable, presentando una situación normal de inestabilidad. Para cada talud se señalan en negrita los valores y sistemas de grietas críticos, los cuales le confieren a los taludes inestabilidad total a través de algunas familias grietas o en forma de cuña, o de grandes roturas por planos continuos o por la masa de roca/suelo.

A partir de estos resultados se concluye con las propuestas para el tratamiento más adecuado en cada caso, predominando la corrección de los taludes fundamentalmente en la disminución de la inclinación de los mismos, para evitar los movimientos de masas por dominio estructural. En los casos críticos se propone la reexcavación puesto que las condiciones del agrietamiento (yacencia, humedad/flujo de agua, alteración, rugosidad y resistencia de las superficies y relleno) son muy desfavorables y se pueden involucrar en los movimientos grandes volúmenes de material laterítico.

3.5 Análisis de estabilidad de taludes en el yacimiento Punta Gorda.

Evaluación preliminar.

La evaluación preliminar de la estabilidad de los taludes se hizo con la ayuda de la técnica de proyección estereográfica, aplicando la metodología propuesta por Hoek y Bray (1977). Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 3.17 a la 3.24.

Se puede observar en todos los diagramas, que el modo de fallo de los taludes se corresponde a roturas tipo cuña, con dirección de movimiento predominante hacia el NE, correspondiéndose esto con lo observado en el campo, o sea, que los deslizamientos en los taludes orientados hacia el norte, comenzaron por el extremo derecho (desde el E) y están progresando hacia el oeste.

En la situación mostrada en los diagramas se cumplen además las condiciones para que exista inestabilidad en los taludes. Con relación a los ángulos de inclinación vemos que los taludes presentan mayor pendiente que la línea de intersección de las cuñas formadas, de manera que es posible que se manifieste el movimiento de las mismas en el sentido que señalan las flechas de los diagramas. Además, al comparar los ángulos de los taludes y el de las cuñas con el ángulo de fricción de las superficies de fallo, ocurre lo mismo, o sea, el ángulo de fricción es mucho menor que los demás.

Talud	Familia	RMR	SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas	Tratamiento
1	1	44	46	III	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático
	2	47	48	III	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático
	3	53	54	III	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático
2	1	44	< 10	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
	2	44	< 10	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
	3	34	< 10	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
3	1	34	25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas	Corrección
	2	34	25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas	Corrección
	3	24	< 10	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
4	1	34	25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas	Corrección
	2	21	12	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
	3	34	25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas	Corrección
6	1	34	26	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas	Corrección
	2	34	< 10	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
	3	34	< 10	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
8	1	44	35	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas	Corrección
	2	24	15	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
	3	34	26	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas	Corrección
10	1	31	22	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas	Corrección
	2	34	25	IV	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas	Corrección
	3	34	< 10	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación

Tabla 3.14 Resultados de la evaluación geomecánica de los taludes a partir del índice SMR.

Se puede observar en todos los diagramas, que el modo de fallo de los taludes se corresponde a roturas tipo cuña, con dirección de movimiento predominante hacia el NE, correspondiéndose esto con lo observado en el campo, o sea, que los deslizamientos en los taludes orientados hacia el norte, comenzaron por el extremo derecho (desde el E) y están

progresando hacia el oeste.

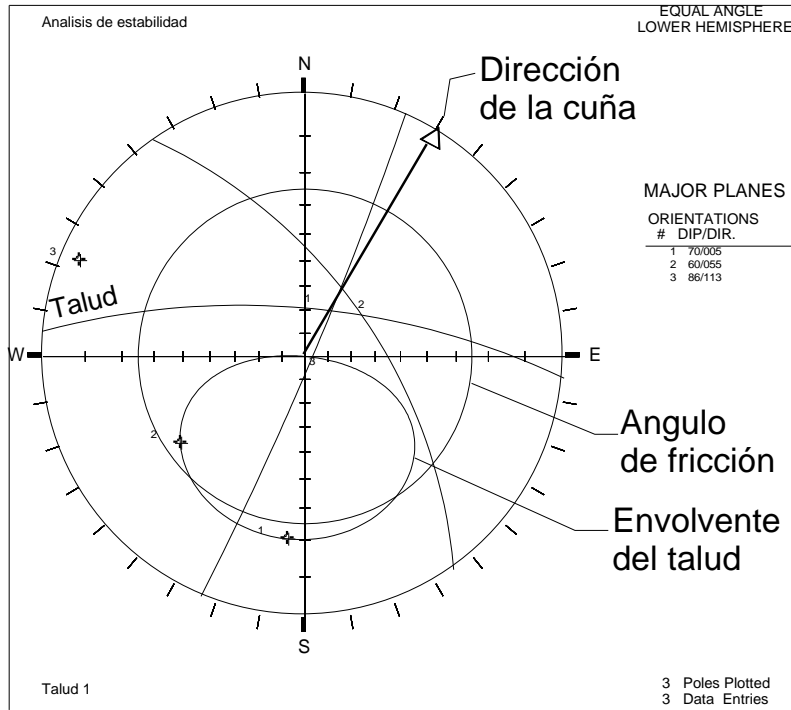


Figura 3.17 Valoración de la estabilidad del talud 1.

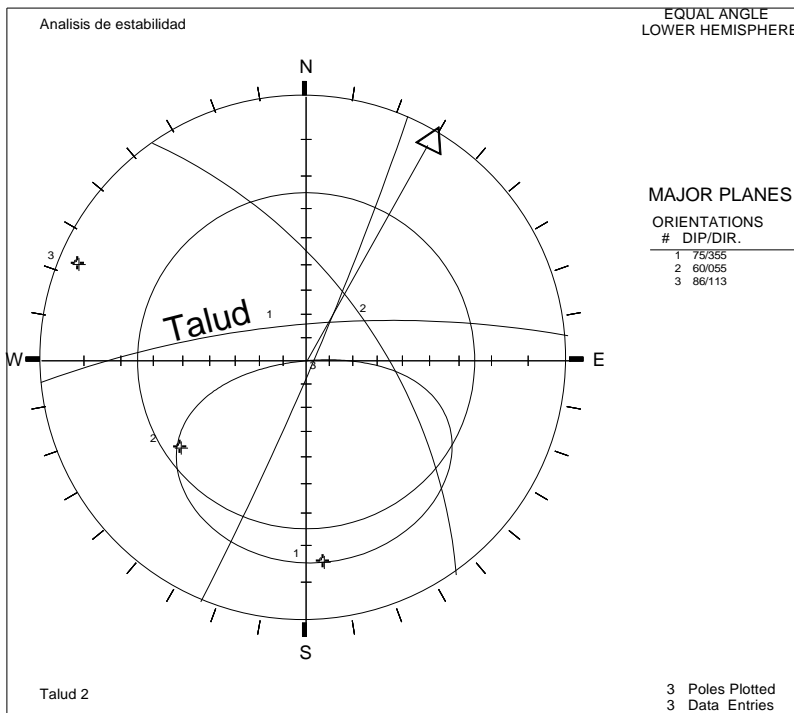


Figura 3.18 Valoración de la estabilidad del talud 2.

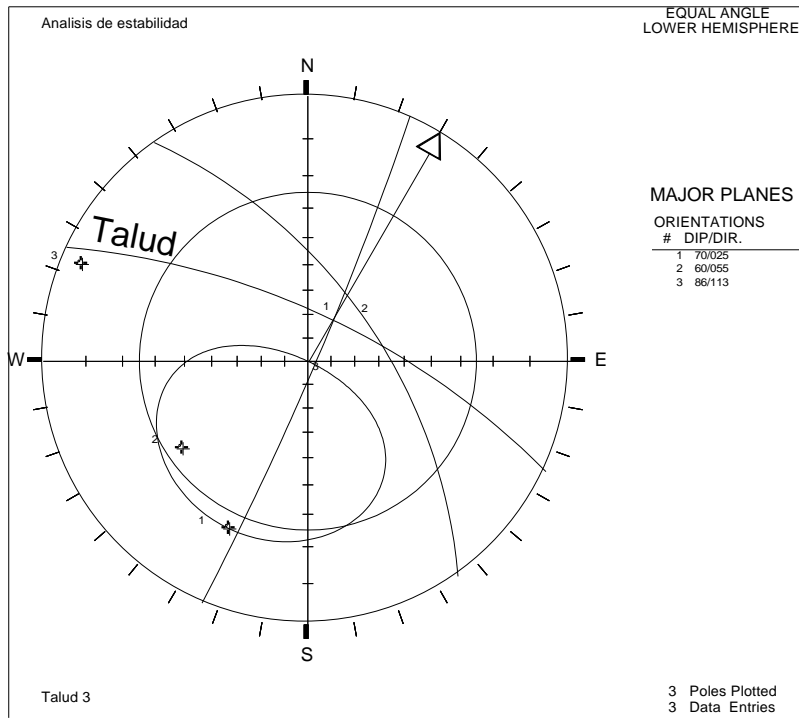


Figura 3.19 Valoración de la estabilidad del talud 3.

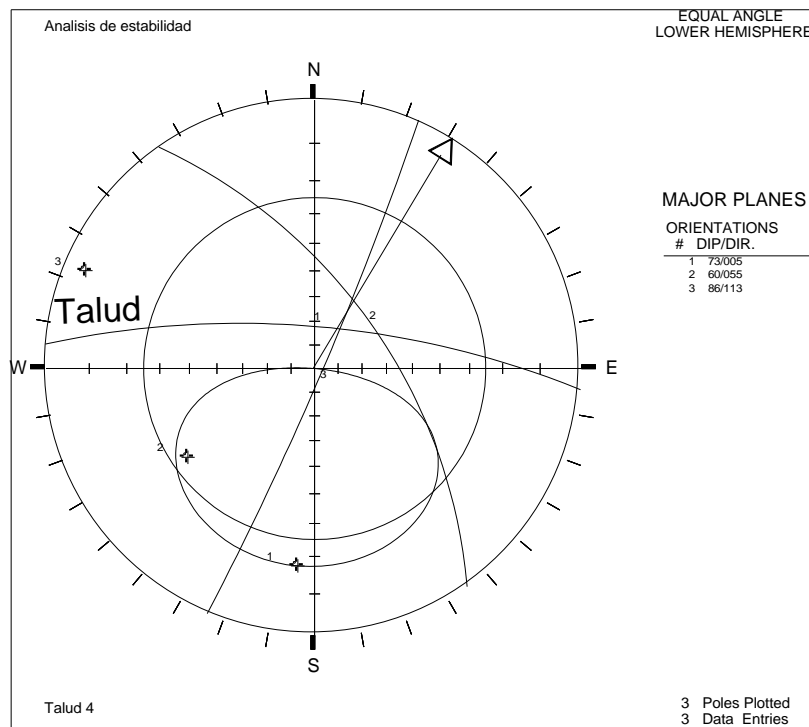


Figura 3.20 Valoración de la estabilidad del talud 4.

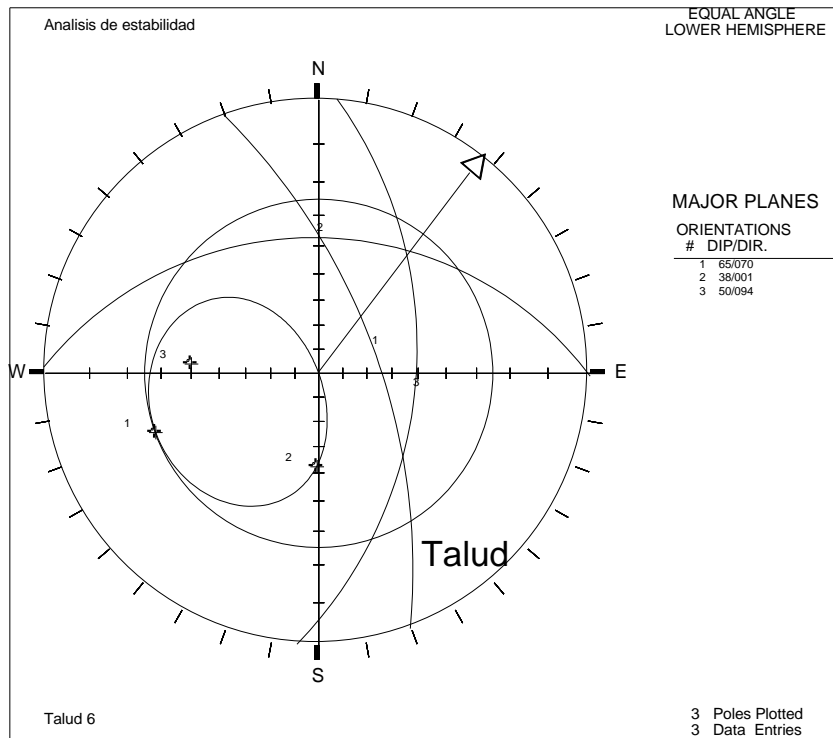


Figura 3.21 Valoración de la estabilidad del talud 6.

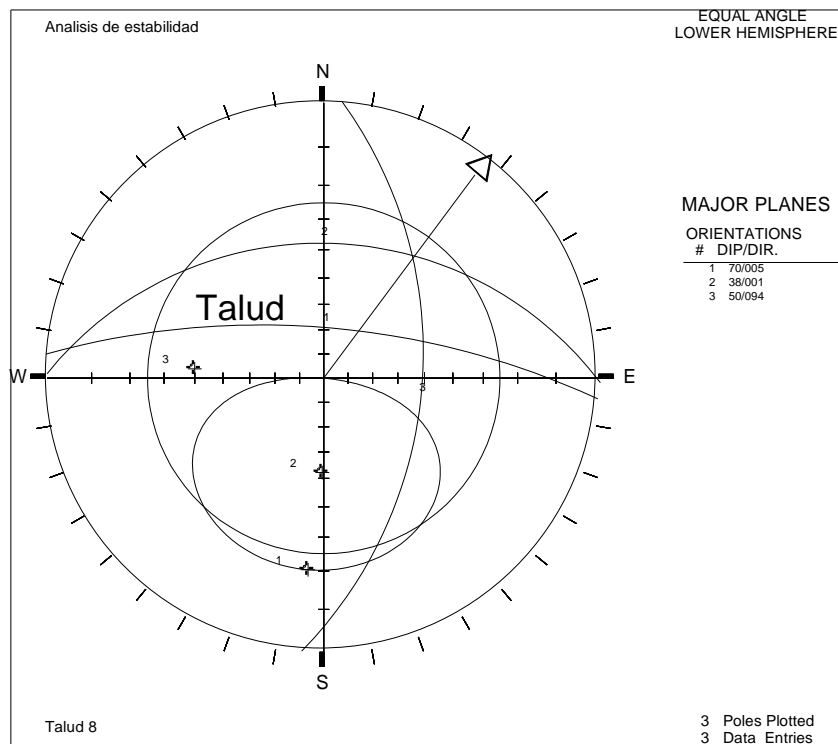


Figura 3.22 Valoración de la estabilidad del talud 8.

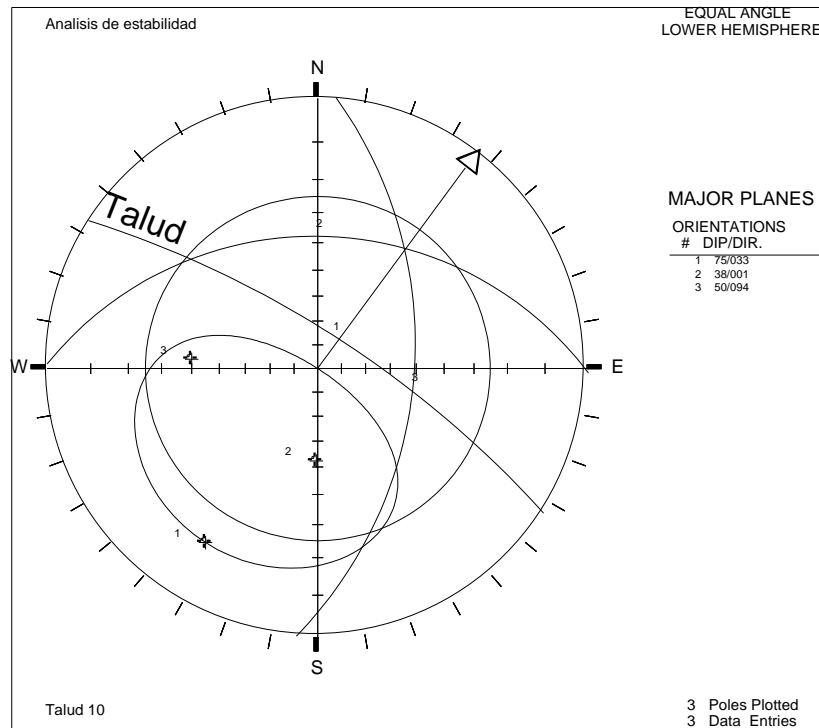


Figura 3.23 Valoración de la estabilidad del talud 10.

En los diagramas de las figuras 3.21 y 3.22 tenemos de manifiesto modos de fallos combinados con roturas tipo cuña y traslacionales. Este fenómeno es muy típico en estas cortezas de meteorización, y está dado fundamentalmente por el control estructural de los movimientos, provocando que las superficies de fallo sigan superficies preexistentes (relícticas) y avancen fundamentalmente en el sentido de las cuñas formadas.

Cálculo del factor de seguridad.

Después de obtener los datos necesarios acerca de los movimientos, el tipo de material, sus propiedades, el agrietamiento y otras características, aplicamos el método de cálculo propuesto por Hoek y Bray (1977) anteriormente descrito (ver tabla 3.15).

Talud	Planos de la cuña	Inclinación	Dirección	Ángulo de fricción	A	B	$FS = Atg \varphi_A' + Btg \varphi_B'$
1, 2, 3, 4.	A	60	50	25.5	0.7	0.3	0.47
	B	86	108				
	Dif.	26	58				
6, 8, 10.	A	38	356	25.5	1.2	0.65	0.882
	B	50	89				
	Dif.	12	267				

Tabla 3.15 Factores de seguridad determinados en los taludes del yacimiento Punta Gorda.

Como se puede observar en las tablas anteriores los resultados del factor de seguridad tienen valores menores que uno (1.00), significando esto que son inestables bajo las condiciones encontradas, correspondiéndose con lo hallado en el campo. Existen varias condicionantes de estas inestabilidades, una es que la posición de los taludes con respecto a los sistemas de grietas predominantes es desfavorable pues en el análisis se determinó que esta disposición crean roturas tipo cuña mediante las cuales el material desplazado se mueve hacia el Este, corroborado con lo visto en el campo, además el buzamiento de la línea de intersección de las cuñas es menor que la inclinación de los taludes lo que facilita el movimiento; otro elemento esencial es que el ángulo de fricción estimado de la superficie de fallo es menor que el ángulo de inclinación de la cuña y del talud, lo que completa el cuadro inestable según el agrietamiento y sus características. Aparte de las condicionantes anteriores se suma además la humedad del material la cual provoca ablandamiento y disminución de la cohesión entre las partículas; los flujos de agua a través de las grietas y fisuras aumentan las presiones intersticiales disminuyendo considerablemente las tensiones efectivas.

Este mismo procedimiento fue aplicado en los taludes en los cuales están emplazadas las excavadoras; los resultados se presentan en la tabla 3.16. De acuerdo a los resultados obtenidos del factor de seguridad (FS) vemos que los taludes de las excavadoras 1, 2, 4 y 6 son inestables, de manera que se debe prestar especial atención a los mismos en cuanto a las condiciones de inestabilidad, mediante esto se evidencia la fuerte influencia de sistemas de grietas sobre la tipología y estabilidad de los taludes. Como caso estable tenemos el talud DA3, con factor de seguridad mayor de 3.

Talud DA	Planos de la cuña	Inclinación	Dirección	Ángulo de fricción	A	B	$FS = Atg \varphi_A' + Btg \varphi_B'$
1, 2, 6	A	60	50	25.5	0.7	0.3	0.47
	B	86	108				
	Dif.	26	58				
3	A	57	196	25.5	3.4	3	3.05
	B	65	356				
	Dif.	8	160				

Tabla 3.16 Factores de seguridad de los taludes en los cuales están emplazadas las excavadoras.

La naturaleza del material dentro del yacimiento tiene una estrecha relación con el tipo de inestabilidad que puede producirse, condicionando y pudiendo estimarse de antemano la susceptibilidad de cada material, a que se desarrolle un movimiento determinado, los cuales se dividen en tres grupos: macizo rocoso, suelo y material de relleno.

La naturaleza de las rocas serpentínicas que forma el macizo rocoso en el substrato del yacimiento, implica una problemática determinada por su comportamiento ante la estabilidad de taludes. El macizo rocoso constituye un medio discontinuo que esencialmente se compone de bloques sólidos separados por discontinuidades. A partir de esta definición, se puede deducir que las propiedades tenso-deformacionales del macizo son de naturaleza anisotrópica, generalmente por las características de las discontinuidades que presenta (estratificación, diaclasas, fallas, esquistosidad, líneas de debilidad, etc), así como de las características de la roca y su historia evolutiva. Es por eso que de las discontinuidades se deben considerar el tipo y origen, distribución espacial, tamaño y continuidad, espaciamiento, rugosidad, naturaleza del relleno, presencia de agua, etc., y de la roca, su naturaleza, características resistentes, meteorización, alterabilidad, etc. Los tipos de rotura encontradas en el medio responden a superficies preexistentes, aunque por estar fuertemente fracturado se desarrollan además superficies de corte, similares a las producidas en suelos, es por eso que la forma final de los deslizamientos son circulares. El conocimiento del conjunto de características mencionadas constituyeron el paso previo en el análisis de estabilidad de taludes en el medio roca – suelo.

CONCLUSIONES
y
RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.

Según los resultados del análisis estructural, el macizo rocoso fue afectado por esfuerzos en distintas direcciones: esfuerzos compresivos con dirección N-S que provocaron la formación de varios sistemas de grietas; esfuerzos compresivos hacia el NW, que generaron estructuras plegadas (bloque El Toldo) o de sobrecorrimiento (bloque Cabaña Norte); y esfuerzos tangenciales que originaron una compresión hacia el E, formándose estructuras de cizallas. Del estudio de la orientación de los granos minerales se evidencia una rotación en sentido horario de 45° del bloque El Toldo con respecto al bloque Cabañas.

A partir del análisis de agrietamiento se determinaron cuatro sistemas de grietas principales: las direcciones NS, NW, NE y EW predominantes en el bloque El Toldo y las direcciones NS, NE y NW en el bloque Cabañas. Hacia la parte baja del río Yagrumaje en el bloque El Toldo se detecta una zona de anomalía tectónica dada por la forma enrejada de los planos de grietas.

El macizo rocoso se comporta como una gran estructura arqueada o plegada, con grietas de tensión formadas por la extensión del arco de la estructura y grietas de cizalla conjugadas y paralelas al eje de las estructuras formadas por curvamiento elástico del macizo, confiriéndole una forma pseudoestratificada.

Del análisis geotécnico de la meteorización tenemos seis grados fundamentales de alteración, en los cuales se manifiestan diferentes tipos de movimientos determinados por la estructura, las propiedades físico-mecánicas y por el grado de alteración. Así tenemos entre los grados I y III el predominio de fallos planares y en forma de cuña con agrietamiento espaciado, y para espaciamiento muy cerrado fallos circulares. A medida que aumenta la alteración (IV-VI) los movimientos se producen a través de grietas relícticas, formándose deslizamientos complejos.

Según el estudio de las propiedades acuíferas tenemos varios horizontes de importancia geotécnica debido a su comportamiento; el acuicluso y acuitardo donde las inestabilidades están dadas por el incremento de las presiones hidrostáticas y el horizonte acuífero donde la inestabilidad es por los flujos de agua.

Una parte de las aguas subterráneas del yacimiento es aportado por las aguas del río Yagrumaje, las cuales se infiltran a través de sistemas de fallas con dirección NW que se internan dentro del macizo.

De acuerdo a la evaluación geomecánica aplicada (SMR) la calidad del macizo se comporta de mala a muy mala y las inestabilidades están dadas a través de algunas familias grietas o en forma de cuña, o de grandes roturas por planos continuos por la masa roca/suelo. El tratamiento más adecuado es la corrección de los taludes fundamentalmente disminuyendo la inclinación de los mismos. En los casos críticos se debe reexcavar puesto que las condiciones del agrietamiento son muy desfavorables.

En la evaluación de estabilidad con la técnica de proyección estereográfica, se determinó que el tipo de movimiento que predomina es deslizamiento en forma de cuña, con movimientos dirigidos hacia el NE. Además aparece en menor medida la combinación planar-cuña.

Los factores de seguridad (FS) dan valores menores que 1.00, corroborando lo visto en el campo y los resultados de las técnicas anteriores.

RECOMENDACIONES.

Recomendamos continuar profundizando en el estudio de los movimientos de masa en las cortezas lateríticas, para conocer mejor la naturaleza, distribución espacial y temporal de los mismos, así como la influencia de los movimientos neotectónicos sobre la ocurrencia de estos.

Para la construcción de los taludes dentro del área del yacimiento se debe tener en cuenta la posición de los mismos con respecto a los sistemas discontinuidades predominantes para que exista menos riesgo de que se produzcan inestabilidades en los mismos o tomar medidas de antemano para evitar los movimientos.

Para un mejor control, toma de decisiones y mejor planificación minera recomendamos implementar un sistema de información geográfico en el yacimiento Punta Gorda, mediante el cual se establezcan las zonas de riesgos por deslizamientos, conjugadas con otros fenómenos tales como meteorización, inundaciones, etc.