



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
GEÓLOGO**

TEMA: Estudio Ingeniero-geológico en la etapa de ideas conceptuales para la construcción de la Planta de Ferroníquel Minera SA.

TUTOR: Msc. José Alejandro Carmenate Fernández.



DIPLOMANTE: Rayner Roberto Lamorú Mediaceja.

Julio del 2010

AGRADECIMIENTOS.

- La confección de esta tesis ha sido posible gracias a la ayuda incondicional de muchas personas que dieron lo mejor de sí para poder salir adelante. Quiero agradecer eternamente a todas esas personas que aportaron de sí un granito de arena, también aquellas que de una forma u otra ayudaron a mi formación como profesional:
- Agradecer infinitamente a mi familia por el apoyo que siempre me mostraron a pesar de los problemas que se presentaron en el camino de estos cinco años.
- Agradecer de todo corazón a mi madre, mi padre, mi hermana Y a mi tía Iveette por el apoyo incondicional para mi futura formación profesional.
- Agradecer a Yenizena Sarria Cintra por haberme ayudado mucho, apoyado y soportado en estos cinco años.
- A mis amigos de cuarto, Daubel, Pedro, a Mandela por ayudarme y haber compartido estos cinco años en la universidad.
- Agradecer de todo corazón a mis compañeros de grupo por haberme soportado por estos cinco años.
- Agradecer al Ing. Michael Pica Borrel por haberme ayudado en mi formación como profesional y en la confección de la tesis, a mi amigo Sergio Cabo de Villa por su amistad y apoyo incondicional, a la Ing. Karina Milanes Silvera por su apoyo.
- Agradecer a la empresa Geocuba Oriente Norte por la ayuda y el apoyo que nos dieron, en especial a la Ing. Tatiana Ricardo por ser tan preocupada y dado su apoyo.
- Dar mi eterno agradecimiento al claustro de profesores que de una forma u otra contribuyeron a mi formación; pero en especial a mi tutor José Carenate, a su esposa y también excelente profesora Beatriz Riverón, agradecer también al profesor Constantino de Miguel por su apoyo, a la profesora, Alina Rodríguez Infante porque sus regaños me sirvieron de experiencia.
- Quisiera agradecer de todo corazón a todas aquellas personas que me quieren de corazón y no están aquí presente conmigo sin dejar de mencionar a Terezinha Capelo que con sus consejos en me ayudó mucho a mi formación.



DEDICATORIA

A mis padres Liseette y Roberto, a mi tía Iveette, y a mi primo Rey y su esposa Vivian. A la Revolución Cubana por haberme dado la oportunidad de hacerme un profesional.



PENSAMIENTO

“Ser cultos es la única manera de ser libres”.

~José Martín~



ÍNDICE

Agradecimientos.....	i
Dedicatoria.....	ii
Pensamiento	iii
Índice.....	iv
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
 Introducción.....	 1
 CAPÍTULO I.....	 15
1.1 Generalidades.....	15
1.2 Características Geológicas.....	18
1.3 Geología del área de estudio.....	19
1.4 Características litológicas del área de estudio.....	20
1.5 Características Tectónicas.....	24
1.6 Condiciones Hidrogeológicas.....	27
1.7 Procesos Geodinámicos y Antrópicos.....	29
 CAPÍTULO II.....	 34
2.1 Volumen y metodología de la investigación.....	34
2.2 Metodología utilizada.....	35
2.3 Metodología de obtención de las variables que intervienen en la conveniencia Ingeniero - geológica para obras de cimentaciones.....	42
 CAPÍTULO III.....	 51
3.1 Análisis de las capas ingeniero – geológicas	51
3.2 Análisis de conveniencia.....	55
 Conclusiones.....	 71
Recomendaciones.....	72
Bibliografía.....	73
Anexos	

RESUMEN

El presente trabajo titulado: **Estudio Ingeniero-geológico en la etapa de ideas conceptuales para la construcción de la planta Ferroníquel Minera SA**, tiene como objetivo determinar la conveniencia ingeniero-geológica para la construcción de la planta, a través de la caracterización geomecánica del macizo rocoso presente en el área de estudio, así como determinar los principales procesos geológicos, tipos litológicos y estructuras tectónicas presentes en el área de estudio, además de caracterizar desde el punto de vista ingeniero-geológico el área de estudio. La metodología aplicada consta de tres etapas fundamentales: Etapa preliminar, Etapa de campo y Etapa de procesamiento y análisis de los resultados, en las cuales se realizan una amplia caracterización de las estructuras presentes y fenómenos que afectan el área de estudio. Se realiza un análisis de la calidad del macizo rocoso a través del índice RQD (Rock Quality Designation), se realizaron mediciones de elementos de yacencia para determinar las principales estructuras, el procesamiento de la información se determinó a partir de programas de computación, interpretación de fotos aerocósmicas, además de técnicas de proyección estereográficas. Como resultados se obtuvieron las capas ingeniero-geológicas con capacidad para la cimentación, los principales procesos y fenómenos geológicos que afectan el área de estudio, así como las propiedades físico-mecánicas.



ABSTRACT

This present investigation titled **“The geological-engineering study, in the stage of conceptual ideas, for the construction of the Ferroníquel Minera SA Plant”**, has as its objective to determine the geological engineering convenience for the construction of the plant, through the geo-mechanical characterization of the base rock in the area of study, also to determine the principle geological processes, types of lithology and tectonic structures present in the area of study moreover to characterize from a geological engineering point of view the area of study. The methodology used consists of three fundamental stages: The preliminary stage, the field work stage and the stage of processing and analyzing the results, in all of which was realized an ample characterization of the present phenomena and structures that affect the study area. An analysis of the quality of the base rock was carried out using the RQD (Rock Quality Designation) indice; the elements of appearance of the rock were measured to determine the principle structures. The processing of the information was realized using computational programs, interpretation of aero cosmic photos in addition to stereographic projection techniques. As a result, the geological engineering level with the capacity to sustain the foundation of the plant was obtained; the principle geological phenomena and processed affecting the area of study were identified in addition to the physical-mechanical properties of the rock.



INTRODUCCIÓN.

La ingeniería geológica surge con el desarrollo de las grandes obras públicas y el crecimiento urbano, diferenciándose como especialidad de la geología a mediados del siglo XX. El desarrollo alcanzado por otras ciencias afines, como la mecánica de suelo y la mecánica de rocas, configuraron los principios de la geotécnica moderna, dentro de la cual la ingeniería geológica representa la visión más completa para la solución de los problemas constructivos. (González de Vallejo 2002)

En los albores del siglo XXI, los problemas del desarrollo sostenible, en un frágil equilibrio medioambiental, sometido a la inevitable confrontación entre las consecuencias del progreso y los procesos geológicos, hacen de los estudios ingenieros geológicos una obligatoriedad en la construcción de cualquier proyecto, pues garantizan la estabilidad y la confiabilidad de los mismos.

El conocimiento de las propiedades y características geomecánicas del macizo rocoso es una labor primordial en la caracterización de los mismos, y para ello es de vital importancia los trabajos de campo en la conformación o realización de proyectos de construcción con diversos grados de complejidad. Por ello, el desarrollo progresivo y sistemático de los trabajos de campos para afloramientos de rocas, permite recuperar la información clásica que evalúa el comportamiento de los macizos rocosos, así como el diseño de las fases de investigación más avanzadas y en su conjunto la interpretación de los resultados esperados. Serán por tanto las propiedades físicas de las rocas las que determinan su comportamiento mecánico

A raíz del cese de los convenios de colaboración de Cuba con los países del Consejo de Ayuda Mutua Económica y la desintegración de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, se hizo necesaria la mixtificación de la economía, de la cual es pilar importante la industria niquelífera que necesitó no sólo de la búsqueda de mercado para la venta de sus productos, sino también de inversiones que garantizarán su desarrollo tecnológico bajo las regulaciones y exigencias de la tecnología contemporánea. Un resultado de estas inversiones lo constituye el convenio entre la República de Venezuela y Cuba donde se acordó la creación de una compañía Mixta denominada Ferroníquel Minera SA, la cual tendrá como objetivo primario el procesamiento del mineral saprolítico utilizados en el anterior proceso de obtención de níquel. Como respuesta a la solicitud se realizó el estudio

ingeniero-geológico para la etapa de ingeniería básica de la zona de emplazamiento de la planta de producción, ubicada en la concesión minera Moa occidental, que presenta el siguiente diseño de investigación:

Problema: Necesidad de establecer la conveniencia Ingeniero Geológica de la zona para la construcción de la planta de Ferroníquel Minera SA.

Objeto de Estudio: Rocas y suelos del área de la planta Ferroníquel Minera SA.

Objetivo General: Determinar la conveniencia ingeniero-geológica para la construcción de la planta de Ferroníquel Minera SA, a través de la caracterización geomecánica del macizo rocoso.

Objetivos Específicos:

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de suelos y rocas en el área de estudio.
- Determinar principales tipos litológicos y estructuras tectónicas que definen el comportamiento geotécnico y geomecánico de los macizos rocosos.
- Determinar el perfil geólogo-geofísico con sus propiedades físico-mecánicas.
- Caracterizar desde el punto de vista ingeniero-geológico el área de estudio.

Hipótesis: Si se logra determinar las propiedades físicas, mecánicas de suelos y rocas; además de establecer los principales tipos litológicos y estructuras tectónicas que definen el comportamiento geotécnico y geomecánico de los macizos rocosos entonces se podrá determinar la conveniencia ingeniero-geológica y constructiva del área en estudio, idónea para llevar a cabo la construcción de la planta Ferroníquel Minera SA.

Aportes científicos:

- Determinación de los principales tipos litológicos y estructuras tectónicas que definen el comportamiento geotécnico y geomecánico de los macizos rocosos, a partir de las propiedades físico - mecánicas de suelos y rocas en el área de construcción de la planta Ferroníquel Minera SA.
- Determinación de la conveniencia ingeniero-geológica en el área de construcción de la planta Ferroníquel minera SA.

Marco Teórico Conceptual de la Investigación.

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión en sus tres facetas. **Física**, debida a cambios térmicos (lo que origina dilataciones diferenciales entre los diferentes minerales y da lugar a fisuras internas, y a la acción del agua (arrastres de fragmentos ya erosionados), estas acciones físicas tienden a romper la roca inicial y dividirlas en fragmentos de tamaños cada vez mas pequeños. (González de Vallejo, 2002)

Química, originada por fenómenos de hidratación, disolución, oxidación, cementación. Esta acción por lo tanto tiende a disgregar como a cementar, queriendo decir, ayudando a la acción física y posteriormente a cementar los productos formados.

Biológica producida por actividad bacteriana, induciendo putrefacciones de materiales orgánicos y mezclando el producto con otras partículas de origen físico químico.

Desde el punto de vista de la ingeniería geológica, el suelo se define como un conjunto de agregados minerales unidos por fuerzas débiles de contacto, separados por medios mecánicos de poca energía o por agitación de agua. La materia sólida que constituye el suelo presenta composición química según la roca o rocas que dieron origen al suelo y las transformaciones ocasionadas por la erosión de esas partículas, por lo que puede encontrarse materia orgánica (muy deformable), sales diversas, carbonatos (que ayudan a cementar las partículas). Para estudiar el material complejo como el suelo (con diferente tamaño de partículas y composición) es necesario seguir una metodología con definiciones y sistemas de evaluación de propiedades, de forma que lo constituya un lenguaje fácilmente comprensible para los técnicos. Así se han clasificado los suelos en cuatro grupos en función de su granulometría (Normas D.I.N., A.S.T.M, A.E.N.O.R, etc.): (González de Vallejo 2002).

Gravas, con tamaño de grano entre 8-10cm y 2mm, se caracterizan porque los granos son observables a simple vista, no retienen el agua por la inactividad de su superficie y los grandes huecos existentes entre partículas.

Arenas, con partículas comprendidas entre 2 y 0,060mm, todavía son observables a simple vista. Cuando se mezcla con el agua no forma agregados continuos, separándose con facilidad.

Limos, con partículas comprendidas entre 0,060mm y 0,002mm (indicando algunas normativas que esta debe de ser de 0,005mm, pero no hay apenas consecuencias prácticas entre ambas distinciones).

Arcillas, formadas de por partículas de tamaños inferiores a limos (0,002mm). Se trata ya de partículas de tamaño gel y se necesita que haya ocurrido transformaciones químicas para llegar a estos tamaños. Están formadas por minerales principalmente silicatados, constituidos por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos unidas por enlaces covalentes débiles, pudiendo entrar las moléculas de agua entre las cadenas produciendo, a veces, aumento de volumen (recuperables cuando el agua se evapora).

Para la base teórica de la investigación se realizan consultas de las bibliografías relacionadas con la temática tratada. Desde el punto de vista conceptual, se parte de las definiciones de suelos matriz rocosa, discontinuidad, macizo rocoso y que a continuación se analizan:

Matriz rocosa, es el material exento de discontinuidades, o los bloques de roca intacta que quedan entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral. Mecánicamente queda caracterizada por su densidad, resistencia y deformabilidad.

Discontinuidad, es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de una matriz rocosa en un macizo rocoso. Generalmente la resistencia a la tracción de los planos de discontinuidades es muy baja o nula. Su comportamiento mecánico queda caracterizado por su resistencia al corte o, en su caso, por la del material de relleno, confiriendo al macizo un comportamiento geomecánico e hidráulico discontinuo, condicionado por la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad.

Macizo rocoso, es el conjunto de bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diversos tipos que afectan el medio rocoso. Mecánicamente los macizos rocosos son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneo, prácticamente puede considerarse que presentan una resistencia a la tracción nula.

Heterogeneidad, las zonas con diferentes litologías, grado de alteración, o meteorización, contenido en agua etc., pueden presentar propiedades muy diferentes.

Anisotropía, la presencia de planos de debilidad de orientaciones preferentes (estratificación, laminación, familia de diaclasa tectónica) implica diferentes propiedades y comportamiento mecánico en función de la dirección correcta. También la orientación de los esfuerzos que se ejercen sobre el material rocoso que puede implicar una anisotropía asociada al estado tensional.

Saprolito o regolito en ocasiones se denomina al macizo rocoso meteorizado que conserva la estructura rocosa, aun que la composición de la roca matriz se haya alterado y tenga menos resistencia que la roca sana, pudiendo además presentar las discontinuidades originales del macizo, u otros planos de debilidad por alteración preferencial.

Agrietamiento, no es más que el grado de fracturación que presenta una roca, cualquier fractura natural planar que no sea una falla, estratificación o clivaje y que sea mayor que el tamaño de los granos minerales de la roca (Suppe, 1985).

Meteorización, no es más que los procesos de desintegración mecánica y descomposición química, originadas por variaciones de temperatura, la acción del agua, oxígeno, ácido carbónico y organismos, al quedarse expuestas a la superficie terrestre las rocas se tornan inestables y empiezan a desintegrarse por la acción de diversos factores.

Algunos trabajos sobre estudios de macizos rocosos en el mundo y en Cuba

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. (Almaguer, Y 2001).

Algunos acercamientos al estudio del agrietamiento fueron realizados por McMahon (1971), Maranhos (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.

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 Bartón, 1974, pero hay muy pocas referencias publicadas sobre la aplicación de la clasificación del RMR a los taludes. La descripción y caracterización de macizos rocosos con fines geotécnicos adentrándonos en más detalles entre sus principales objetivos

Rayner Roberto Lamorú Mediaceja.

ubicamos la identificación y determinación de las condiciones y propiedades observables en el campo, que posteriormente a partir de estudios adicionales ver con mayor visión el comportamiento en su estado natural.

Es por ello que las investigaciones ingeniero geológicas in situ son esenciales para la construcción de obras de ingeniería, para ello el diseño de las mismas constituye un arte que requiere además de un buen criterio y experiencia, la planificación adecuada, el empleo de métodos de investigación apropiados, datos representativos, resultados relevantes e informes expuestos con precisión y claridad. La ingeniería geológica, como ciencia aplicada a la ingeniería y al medio ambiente, tiene una gran transcendencia económica, abarcando desde los estudios geotécnicos para la edificación de edificios hasta las grandes obras públicas y de infraestructura, y aportando soluciones constructivas acordes con la naturaleza geológica del terreno y el medio ambiente. La ingeniería geológica es la ciencia aplicada al estudio y solución de los problemas de la ingeniería y el medio ambiente producidos como consecuencia de la interacción entre las actividades humanas y el medio geológico.

El fin de la ingeniería geológica es asegurar que los factores geológicos condicionantes de las obras de ingeniería sean tenidos en cuenta e interpretado adecuadamente, así como evitar o mitigar las consecuencias de los riesgos geológicos. La importancia de la ingeniería geológica se manifiesta en dos grandes campos de actuación. El primero corresponde a los proyectos y obras de ingeniería donde el terreno constituye el soporte, el material de excavación, de almacenamiento, o de construcción. Dentro de este ámbito se incluyen las principales obras de infraestructuras, edificación, obras hidráulicas, marítimas, plantas industriales, explotaciones mineras, centrales de energía etc. La participación de la ingeniería geológica en estas actividades es fundamental al contribuir a su seguridad y economía. El segundo campo se refiere a la prevención, mitigación y controles de los riesgos geológicos, así como los impactos ambientales de las obras públicas, actividades industriales, mineros o urbanos. En el segundo ámbito de actuación la importancia económica y las repercusiones sociales y ambientales son difíciles de valorar, y pueden llegar a ser muy altas o incalculables, dependiendo de los daños y la reducción de pérdidas si se aplican medidas de prevención. La investigación del terreno mediante métodos y técnicas de reconocimiento y ensayos, así como el análisis y la modelación, tanto de los

Rayner Roberto Lamorú Mediaceja.

materiales como de los procesos geológicos forman parte esencial de esta disciplina. En primer lugar, por su mayor importancia, están los riesgos geológicos, cuya incidencia puede afectar a la seguridad o viabilidad del proyecto. En segundo lugar están todos aquellos factores geológicos cuya presencia condiciona técnica y económicamente la obra. Además de incluir el conocimiento de las técnicas de investigación del subsuelo, tanto mecánicas, como instrumentales y geofísicas, así como los métodos de análisis y modelación del terreno. Para el desarrollo completo de dicha secuencia metodológica deben definirse tres tipos de modelos

- Modelo Geológico.
- Modelo Geomecánico.
- Modelo Geotécnico de comportamiento.

El **modelo geológico** representa la distribución espacial de los materiales, estructuras tectónicas, datos geomorfológicos e hidrogeológicos, entre otros presentes en el área de estudio y en su entorno de influencia. El **modelo geomecánico** representa la caracterización geotécnica e hidrogeológica de los materiales y su clasificación geomecánica. El **modelo geotécnico de comportamiento** representa la respuesta del terreno durante la construcción y después de la misma.

Esta metodología constituye la base de las aplicaciones de la ingeniería geológica. Infraestructuras para el transporte, Obras marítimas, portuarias, e hidráulicas, Edificación urbana, industrial y de servicio, Centrales de energía, minerías y canteras, Almacenamientos de residuos urbanos, industriales y radioactivos, Orden del territorio y planificación urbana, Protección civil y planes de emergencia.

El criterio de falla de Hoek-Brown se desarrolló, en un comienzo, para determinar la resistencia de los macizos de roca dura. Debido a la falta de alternativas adecuadas, el criterio se ha aplicado a una amplia variedad de macizos rocosos, incluyendo rocas de muy mala calidad, las que se podrían hasta clasificar como suelos desde el punto de vista de la ingeniería. El criterio es meramente empírico y, por lo tanto, no existen formas “correctas” de interpretar las diversas relaciones que se pueden obtener. Hoek y Brown (1995).

Este trabajo es un intento por explicar bien las cosas, presentar una interpretación del criterio que comprende todo el rango de tipos de macizo rocoso y que, se ha encontrado, funciona bien en la práctica.

El Criterio Generalizado De Hoek-Brown

El criterio de falla generalizado de Hoek-Brown para macizos rocosos fracturados está definido por:

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

Donde σ'_1 y σ'_3 son los esfuerzos efectivos principales mayor y menor, respectivamente, en la condición de falla, m_b es el valor de la constante m de Hoek-Brown para el macizo rocoso, s y a son constantes que dependen de las características del macizo rocoso y σ_{ci} es la resistencia a la compresión uniaxial de los trozos o bloques de roca intacta que conforman el macizo rocoso.

Es posible obtener algunas relaciones matemáticas exactas entre el criterio de Hoek-Brown, expresado en términos de los esfuerzos principales mayor y menor, y la envolvente de Mohr definida en términos de los esfuerzos normales y de corte. Sin embargo, estas relaciones son difíciles de manejar y el procedimiento original usado por Hoek-Brown es más práctico. En este procedimiento, la ecuación se emplea para generar una serie de valores triaxiales, simulando ensayos in situ a escala real.

Debe notarse que el rango de valores del esfuerzo principal menor, utilizado en los ensayos, es crítico para la determinación de valores confiables de estas dos constantes. En la derivación original de los parámetros σ_{ci} y m Hoek & Brown usaron el rango $0 < \sigma'_3 < 0,5\sigma_{ci}$ y, para ser consistente, es esencial que se use el mismo rango en cualquier serie de ensayos triaxiales sobre probetas de roca intacta.

En orden a utilizar el criterio de Hoek-Brown para evaluar la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos fracturados, se deben evaluar tres propiedades” del macizo rocoso. Estas son:

1. La resistencia en compresión no confinada σ_{ci} de los trozos de roca intacta en el macizo rocoso.
2. El valor de la constante m de Hoek-Brown para esta roca intacta.
3. El valor del Índice de Resistencia Geológica GSI para el macizo rocoso.

¿Qué es el **Geological Strength Index (GSI)**? Introducido por Hoek (1995), es un índice que indica la reducción de la resistencia de un macizo rocoso, con respecto a la roca intacta, para diferentes condiciones geológicas. Se define en terreno por observación de dos parámetros principales: estado de fracturamiento y calidad de las discontinuidades.

(Hoek 1995) propone un buen descriptor de la calidad del macizo rocoso, más rápido de estimar que RMR y en especial Q de Barton. Este se utiliza como una de las variables para obtener la resistencia del macizo rocoso mediante el criterio de falla de Hoek-Brown

Módulo de Deformación.

Serafim & Pereira propusieron una relación entre el módulo de deformación in situ y la clasificación RMR de Bieniawski. Esta relación se basa en análisis retrospectivos de las deformaciones observadas en fundaciones de presas, y se ha encontrado que funciona bien para el caso de macizos rocosos competentes o de buena calidad geotécnica. Sin embargo, para muchos macizos rocosos poco competentes o de peor calidad geotécnica parece predecir valores excesivos para el módulo de deformación.

Basándose en observaciones prácticas y en análisis retrospectivos del comportamiento observado en excavaciones en macizos rocosos poco competentes o de mala calidad geotécnica, se propone la siguiente modificación a la ecuación de Serafim & Pereira para aquellos casos donde $\sigma_{ci} < 100$ MPa:

$$E_m \text{ (GPa)} = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{\left(\frac{GSI - 10}{40}\right)}$$

Debe notarse que en esta ecuación el índice GSI ha sustituido al índice RMR, y que el módulo E_m se reduce progresivamente a medida que el valor de σ_{ci} decrece por debajo 100 MPa. Esta disminución se apoya en el razonamiento de que la deformación de los macizos rocosos de mejor calidad es controlada por las discontinuidades, mientras que, para macizos rocosos de peor calidad, la deformación de los trozos de la roca intacta contribuye al proceso de deformación total. Basándose en deformaciones observadas, la ecuación parece funcionar razonablemente bien en aquellos casos donde se ha aplicado. Sin embargo, en la

Rayner Roberto Lamorú Mediaceja.

medida que se disponga de más información relativa a observaciones de terreno se podría modificar esta relación.

La mayoría de los esquemas de clasificación multi-parámetros (Wickham et al., 1972, Bieniawski, 1973, 1989, y Barton et al., 1974) fueron desarrollados a partir de casos históricos de la ingeniería civil, en los cuales fueron incluidos todos los componentes de las características ingeniero-geológicas de la masa rocosa. Sin embargo, en el minado subterráneo en roca dura, especialmente en niveles profundos, el intemperismo de la masa rocosa y la influencia del agua usualmente no son importantes y pueden ser ignorados. Los diferentes sistemas de clasificación ponen diferente énfasis a los distintos parámetros, por lo que es recomendable que por lo menos se utilicen dos métodos en cualquier lugar durante la etapa inicial de un proyecto.

Las definiciones claras y concisas y los comentarios prácticos incluidos en estas descripciones son buenos ejemplos del tipo de información ingeniero-geológicas que es muy útil para el diseño en ingeniería. Las descripciones de Terzaghi (extraídas directamente de su publicación) son:

La roca estratificada consiste de estratos individuales con poca o ninguna resistencia contra la separación a lo largo de los límites entre los estratos. Los estratos pueden o no estar debilitados por diaclasas transversales. En tales rocas la condición de “astillamiento” es bastante común.

La roca con **fracturamiento en bloques y grietas** consiste de fragmentos de roca intacta o casi intacta, los cuales se encuentran completamente separados unos de otros e imperfectamente entrelazados. En tales rocas, las paredes verticales pueden requerir de sostenimiento lateral.

Las dos clasificaciones de la masa rocosa más ampliamente utilizadas son el RMR de Bieniawski (1976, 1989) y el Q de Barton et.al. (1974). Ambos métodos involucran parámetros geológicos, geométricos y diseño/ingeniería, para llegar a valores cuantitativos de la calidad de la masa rocosa. La similitud entre RMR y Q radica en el uso de parámetros idénticos o muy similares para el cálculo de la valoración de la calidad de la masa rocosa. Las diferencias entre ambos sistemas están en el peso que se da a parámetros similares y en el uso de distintos parámetros en uno u otro esquema.

RMR usa directamente la resistencia compresiva, mientras que Q solo considera la resistencia como una relación al esfuerzo in situ en roca competente. Ambos

Rayner Roberto Lamorú Mediaceja.

esquemas tratan con la geología y la geometría de la masa rocosa, pero de modos ligeramente diferentes. Ambos consideran el agua subterránea y ambos incluyen algún componente de la resistencia del material rocoso. Algún estimado de la orientación puede ser incorporado en Q usando las pautas presentadas por Barton et.al. (1974):

El estudio geotécnico de los desechos sólidos en el mundo ha surgido y se ha desarrollado prácticamente en las últimas tres décadas. Aún más joven es esta materia en Cuba, donde cuenta apenas tres lustros. Si bien la implementación de vertederos sanitarios data de 1976 con la creación del situado en calle 100 y autopista a Pinar del Río, el estudio del material residual urbano es aún más reciente, y tiene su fundamento en la nueva situación económica y social del país, matizada por la expansión de la ciudad y la necesidad de reciclar. En Cuba los estudios de los desechos sólidos urbanos se reducen a su cuantificación en peso y volumen por zonas de generación, caracterización de estos residuos, y ensayos geotécnicos elementales realizados en un antiguo estrato de tal material.

Los desechos sólidos urbanos monitoreados en 1976 pueden ser clasificados como altamente orgánicos, si se tiene en cuenta que un 59% de su contenido es materia orgánica fácilmente biodegradable, mientras que un 24.1%, correspondiente a papeles, cuero y textiles. Son degradables a mediano y largo plazo, lo cual influye en los asentamientos futuros y en el modelo matemático adoptado para predecirlos. Para las condiciones de humedad muestreadas en 1960 y las condiciones climáticas de Cuba, el índice de compresión en la consolidación secundaria adoptará valores próximos a $C_a=0.09e0$, teniendo en cuenta además las condiciones particulares de la zona de vertido.

Según Hernández Rossié y Macías González) tales residuos pueden ser compactados hasta una densidad entre 400Kg/m^3 y 500Kg/m^3 en (unción del equipo que se utilice, así como reducciones del volumen en el orden de 2.1 y 3.1, o sea, la mitad o un tercio del volumen original. Entiéndase por índice de formación, la masa de desechos que genera un habitante en el día. Se expresa en Kilogramo por habitante por día (kg/hab/día).



Talud en el que se observa una fuente de lixiviados que brotan espontáneamente evidenciando el estado de saturación en los desechos sepultados que constituyen un peligro de deslizamiento.

En relación a investigaciones realizadas en el territorio de Moa se encuentran las de Carmenate J. A., (1996) quien realiza una evaluación y clasificación de los suelos y rocas a partir de las propiedades físico-mecánicas dando como resultado un mapa ingeniero geológico a escala 1:10 000 y una zonificación de áreas susceptibles a la ocurrencia de fenómenos geológicos exógenos. Rodríguez A. (1999), quien profundiza en el conocimiento geólogo-tectónico del territorio de Moa y confecciona el mapa de riesgos debido a procesos tectónicos.

Carmenate A.Y y Guardado L.R (2003).Determinaron el análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo serpentinitico de la región de Moa como objetivo tiene analizar la estabilidad de los taludes, la metodología consistió en un análisis estructural, valoración geotécnica de los horizontes lateríticos, análisis de deslizamientos, aplicación de clasificaciones geomecánicas para taludes, determinación del tipo de rotura y aplicación del método de cálculo correspondiente para determinar el factor de seguridad de los taludes. Como resultados se brinda un análisis estructural mostrando las principales

Rayner Roberto Lamorú Mediaceja.

discontinuidades presentes en el macizo, además se muestra la calidad del macizo rocoso a partir de los índices geomecánicos RMR y SMR, se muestra el tipo de rotura por la posición relativa de los taludes con los sistemas de grietas principales y finalmente el cálculo del factor de seguridad para deslizamientos por rotura tipo cuña.

Basabe Veliz M.J y Ortiz Álvarez M (2003). Determinaron el estudio ingeniero-geológico de material de relleno para la laguna mangón, a partir de la evaluación de las propiedades físicas para los sedimentos no cohesivos o no consolidados. Como objetivos se básicos se trazaron determinar las propiedades físicas de los sedimentos cohesivos y determinar el espesor útil hasta el techo de la roca. La metodología consistió en realizar perforaciones, muestreo geológico, buceo autónomo, ensayos de laboratorios y posicionamiento hidrográfico. Como resultados obtenidos se infirió que el área en (Ha) evaluada la constituye una área de grano fino muy uniforme o mal graduada de baja capacidad de compactación con un contenido menor de 20% de restos esqueléticos. Esta arena no es idónea con la arena de playa de varadero por contener algún porcentaje de arcillas. Se puede utilizar como material de relleno de la laguna de mangón poseyendo una baja compactación, por lo que se recomienda añadirle un porcentaje de gravilla para elevar la capacidad de trabajo.



CAPITULO I. CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO.

Generalidades.

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, por lo que el relieve es 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, disminuyendo gradualmente hacia la costa. Los yacimientos se encuentran aproximadamente a unos 6,0km al SW de las instalaciones de la Empresa Mixta Moa Nickel S. A y al S-SW de la ciudad de Moa, provincia Holguín; ocupando el área de la concesión minera Moa Occidental II, que se localiza en la margen occidental del río Moa, en la zona que comprende los yacimientos Yamanigüey, Zona Sur, Atlantic, Pronóstico y Yamanigüey Oriental.

La Planta de Ferroníquel se ubica dentro de un área en forma de polígono irregular (Figura 1) con una superficie de 772 088 m² (77,2 ha) situada en el extremo NE de la Concesión Minera, con las coordenadas siguientes (Tabla 1):

Vértice	X	Y	Vértice	X	Y
1	694 600	217 924	10	695 428	217 447
2	694 710	217 836	11	695 293	217 270
3	694 926	218 000	12	695 056	217 319
4	695 200	218 000	13	694 998	217 299
5	695 376	218 150	14	694 920	217 153
6	695 552	218 059	15	694 854	217 100
7	695 552	217 881	16	694 765	217 047
8	695 698	217 649	17	694 431	217 844
9	695 712	217 483			

Tabla1. Coordenadas de la Planta de Ferroníquel Minera SA.

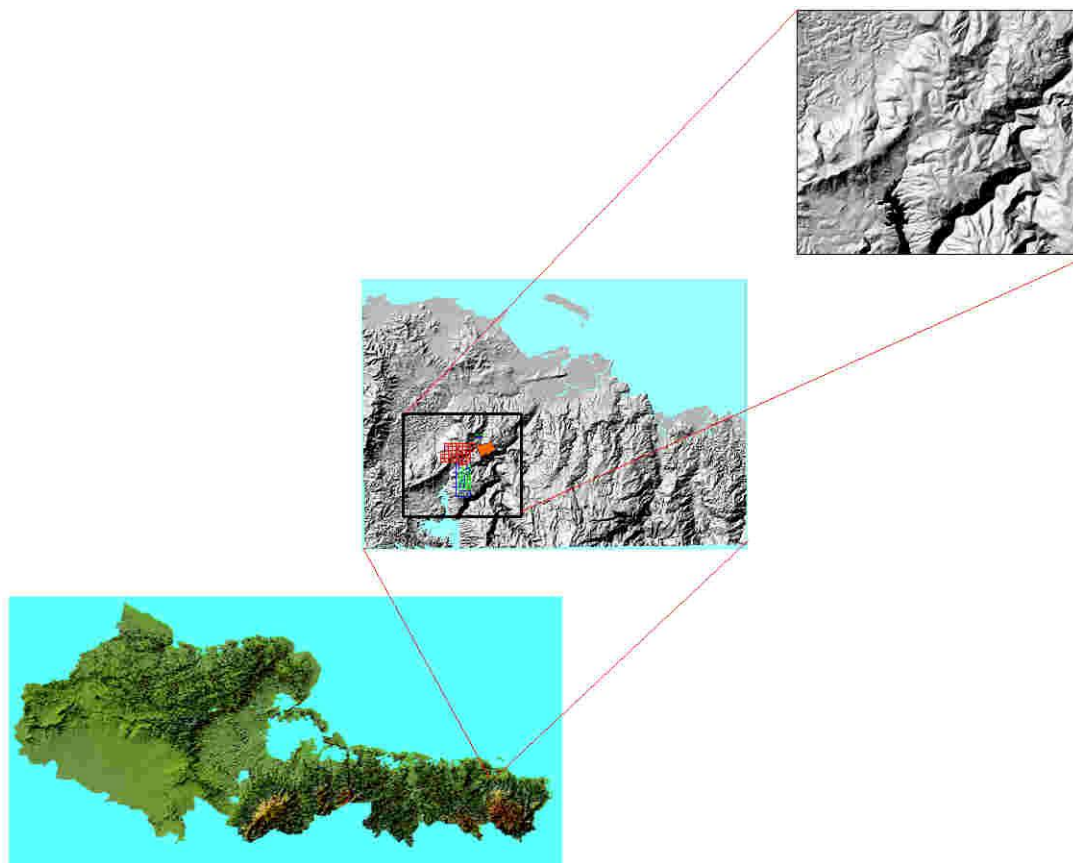


Figura 1. mapa de ubicación del área de estudio. Escala 1: 10 000

El municipio Moa presenta características climáticas muy propias, debido a su ubicación geográfica, relieve y dirección e intensidad predominante de los vientos. Estas se distinguen con claridad por las condiciones pluviométricas exclusivas del lugar, e incluso dentro del mismo territorio existen variaciones en los acumulados de precipitaciones debido a la diferencia de altitudes y la existencia de zonas a barlovento y sotavento. El régimen de temperaturas del aire es típico de la región Oriental, con un valor medio anual superior a 26°C, máximas y mínimas absolutas anuales de 36 y 12° C respectivamente.

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. Sobre los grabos 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 Comandante Ernesto Che Guevara y Las Camariocas en construcción.

El área de estudio forma parte del grupo orográfico Sagua-Baracoa, lo cual hace que el relieve sea predominantemente montañoso, principalmente al sur. Hacia el norte el relieve se hace más suave, disminuyendo gradualmente hacia la costa. La red fluvial está representada principalmente por el río Moa y sus afluentes. 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 relieve del área de la planta se caracteriza por ser colinoso y presentar algunas depresiones, en las localidades donde se encontraban profundos bolsones de lateritas y saprofitas, que fueron minados casi en su totalidad. En general se aprecia una alta rugosidad del relieve. Esta elevación se ve interrumpida hacia su extremo SE por un terreno elevado que se extiende desde el extremo sur del área hasta su extremo SW, esta elevación es alargada y asimétrica con una cota máxima de 226m siendo su eje sinuoso. Hacia el borde W del área el terreno se eleva suavemente como parte de la falda de una elevación cuyo eje se oriente al NE (Figura 2).

Se observan una gran cantidad de taludes artificiales estando la mayor concentración en una faja estrecha orientada del SE al NW que coincide con la presencia de una falla de acuerdo al estudio geológico. Otras fajas de taludes artificiales son más cortas y siguen fundamentalmente la orientación N-S.

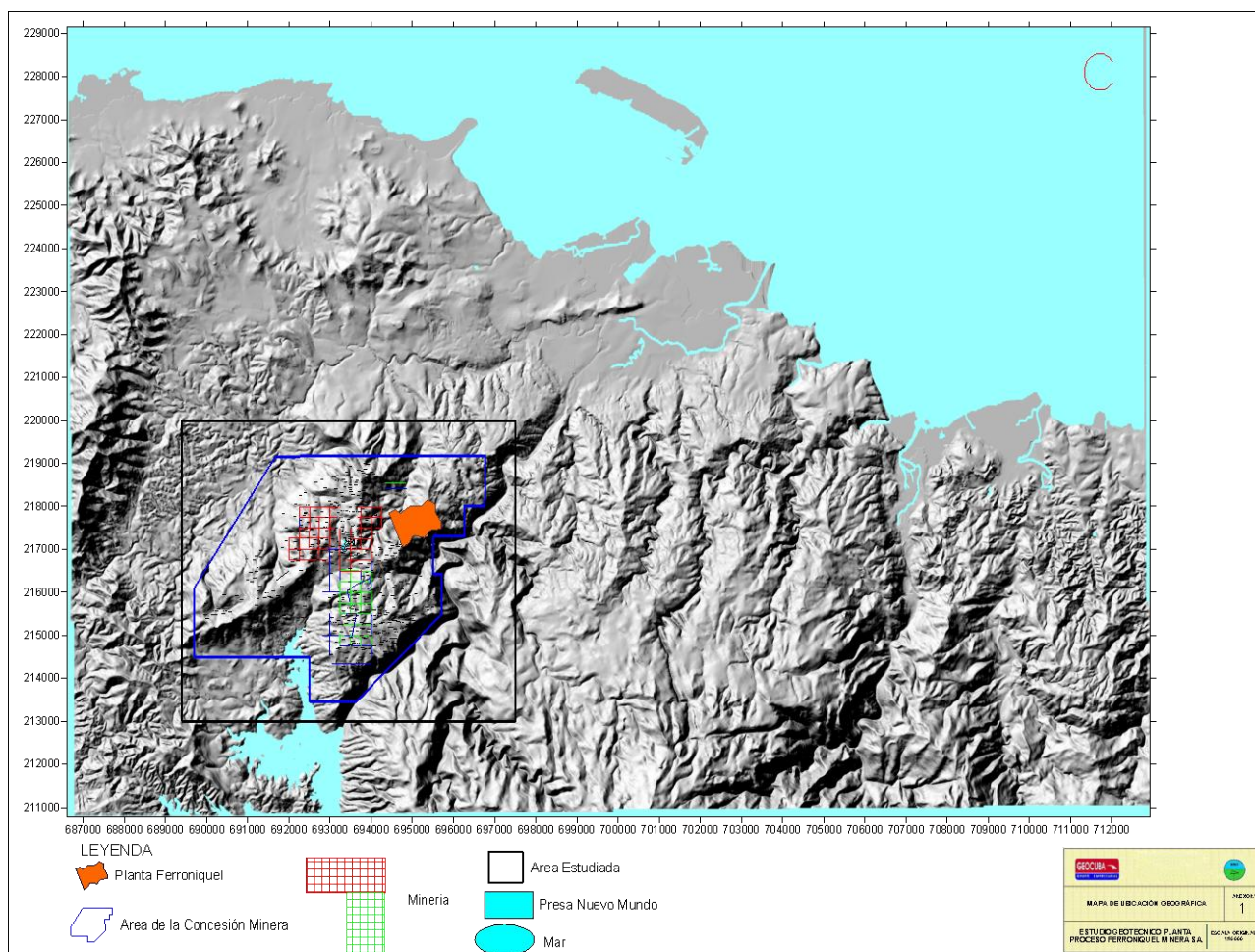


Figura 2. Modelo Digital del Terreno del área de estudio.

Características Geológicas

El Bloque Oriental Cubano presenta características geológicas muy particulares dentro del marco de la estructura geológica cubana. De ahí el gran interés que ha despertado en diversos investigadores (Adamovich y Chejovich, 1964; Cobiella, 1978; Quintas, 1989; Blanco y Proenza, 1993; Iturralde-Vinent, 1996), llevando a cabo estudios encaminados a profundizar en la estructura geológica cubana en general. Según Iturralde-Vinent, (1996) en la constitución geológica del archipiélago cubano se reconocen dos elementos estructurales principales: el cinturón plegado y el neoa autóctono.

El cinturón plegado según el autor, está constituido por terrenos oceánicos y continentales deformados y metamorizados de edad pre-Eoceno Medio, que ocupan en la actualidad una posición muy diferente a la original, representando las unidades

geológicas que lo integran grandes entidades paleogeográficas que marcaron la evolución del Caribe Noroccidental. El autor divide al cinturón plegado en unidades continentales y unidades oceánicas.

Las unidades oceánicas están constituidas por las ofiolitas septentrionales, las rocas del arco de islas volcánicas del Cretácico (Paleoarco), las secuencias de las cuencas de *piggy back* del Campaniense Tardío-Daniense, el arco de islas volcánico del Paleógeno y las rocas de las cuencas de *piggy back* del Eoceno Medio-Oligoceno. El neautóctono está constituido por materiales terrígenos carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado.

Geología del área de estudio

El área investigada está situada en una porción de la Concesión minera Moa Occidental explotado por la Empresa Pedro Sotto Alba. En esta zona quedan restos de la corteza de meteorización constituidas por saprolitas, conocidas en Cuba como ocre estructurales y la capa de ocre inestructurales, conocida como lateritas. (Figura 3)

La roca madre de la corteza de meteorización son las serpentinitas que de acuerdo a las fábricas secundarias presentan las siguientes clases: serpentinitas esquistosas, serpentinitas brechosas finas, serpentinitas brechosas medias, serpentinitas brechosas gruesas y serpentinitas macizas.

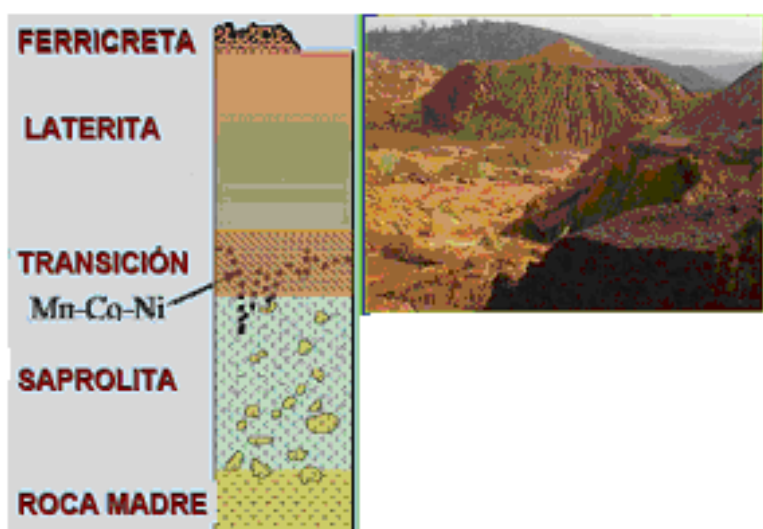


Figura 3. Corte ideal de la corteza de meteorización (tomado de Naturaleza geológica de Cuba de M. Iturralde Vinent).

Las serpentinitas presentan diferente grado de deformación, las más deformadas, como las esquistosas y brechosas finas y medias, se caracterizan por estar completamente serpentínizadas, mientras que las macizas y brechosas gruesas pueden presentar un menor grado de serpentización.

Características litológicas del área de estudio.

Brechas y esquistos serpentiniticos

Las brechas y esquistos de serpentinitas constituyen la roca madre de la corteza de meteorización siendo las más frecuentes las serpentinitas brechosas medias a finas y en menor medida esquistosas (Figura 4 y 5).



Figura 4.- Serpentinita brechosa media. Espejo de fricción en pequeña falla.



Figura 5. Serpentinita brechosa fina. Observe espejo de falla vertical.

Las serpentinitas esquistosas y brechosas finas se localizan en zonas de fallas y circundando grandes bloques de serpentinitas brechosas medias.

La variabilidad de los tipos de serpentinitas y la rugosidad de la superficie del basamento serpentinitico es grande. La rugosidad del fondo se incrementa notablemente en las zonas de fallas principales (Figura 6), presentando pináculos rocosos y bolsones de saprofitas y laterita alternos a los pináculos y relativamente estrechos. Las serpentinitas en las zonas de mayor rugosidad del fondo se presentan con un alto grado de agrietamiento. En los pináculos localizados en esta zona las serpentinitas se presentan menos meteorizadas hasta frescas en profundidad y mas meteorizadas hacia la parte superior de los pináculos, mientras que en los bolsones de saprolitas predomina la arcilla arenosa (ocre estructural).



Figura 6. Serpentinita esquistosa en zona de falla.

Corteza de meteorización.

La corteza de meteorización está representada por dos tipos litológicos o capas ingeniero-geológicas.

La capa ingeniero geológica inferior se corresponde con el horizonte de saprolitas (suelo limo-arcilloso y areno-limoso) denominado en Cuba como serpentinitas lixiviadas y ocre estructural. En esta capa se conservan los rasgos de las fábricas de las serpentinitas aunque la mayor parte de los minerales serpentiniticos se han transformado a minerales intermedios. La apariencia de esta capa es de una arena más gruesa en profundidad y más fina hacia el techo de la capa. El color es amarillo el cual va pasando a un color rojo amarillento (pardo) hacia el techo. El suelo en esta capa es friable y más permeable que la capa superior (ocre inestructural). La potencia de esta capa es mayor en las fábricas secundarias brechosas y en parte esquistosas de la roca madre y menor donde las rocas son más conservadas.

La capa superior (Figura 7), está constituida por minerales limoníticos y arcillas esmectíticas principalmente. En Cuba se conoce esta capa como ocre inestructural. Este suelo de color amarillo parduzco toma un color rojo más intenso hacia el techo a causa del aumento de minerales ferruginosos. La granulometría es muy fina y presenta una mayor cohesión que la capa inferior de arcilla limosa o arenosa. El límite entre estos suelos es difuso.



Figura 7. Parte alta del corte, en el área, donde se observa la capa superior. (Ocre inestructural) en su porción basal.

En el área de estudio los suelos arcilloso limoso y limoso arenosos (saprolita) predominan sobre los suelos areno gravosos (laterita), y se caracterizan por presentar un color pardo amarillento, pudiendo encontrarse masiva o con vestigios de finas bandas y esquistosidad, heredadas de las rocas que dieron origen a la corteza (Figura 8). Este suelo se localiza inmediatamente sobre la serpentinita poco meteorizada.



Figura 8. Muestra de saprolita arenosa.

La saprolita fina (limo arcilloso) es de color amarillo parduzco, de aspecto masivo y muy plástica.

En el mapa de espesores de los suelos, se aprecia que su potencia es muy variable, presentándose numerosos y grandes bolsones de mineral donde la potencia puede llegar hasta más de 23m. Los bolsones están circundados por crestas donde el espesor es pequeño. Las áreas de baja potencia en algunos casos forman fajas alargadas y sinuosas

Redepósitos

Se localizan redepósitos que alcanzan hasta 2m de potencia. Estos pueden ser brechosos pobremente estratificados con abundante matriz arcillosa ferruginosa. Los fragmentos mayoritariamente son de serpentinita y en menor medida de ópalo y calcedonia. En algunos sectores predominan redepósitos finamente estratificados, de grano fino, arcillosos, muy plásticos con intercalaciones arcillosas arenosas.

Características Tectónicas.

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., 2002)

Los movimientos de compresión hacia el norte culminaron con la probable colisión y obducción de las pale- unidades 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 Horst 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.

Características tectónicas generales de la región de Moa.

Desde el punto de vista tectónico la región de Moa en general y el área de emplazamiento de la Planta de Ferroníquel en particular es muy compleja,

Rayner Roberto Lamorú Mediaceja.

perteneciendo al sub-bloque morfotectónico “Calentura” que pertenece al Bloque “Moa”, donde predominan los desplazamientos hacia el noreste, con predominio de los planos de fractura con rumbo N 20° E según A. Rodríguez, 1999.

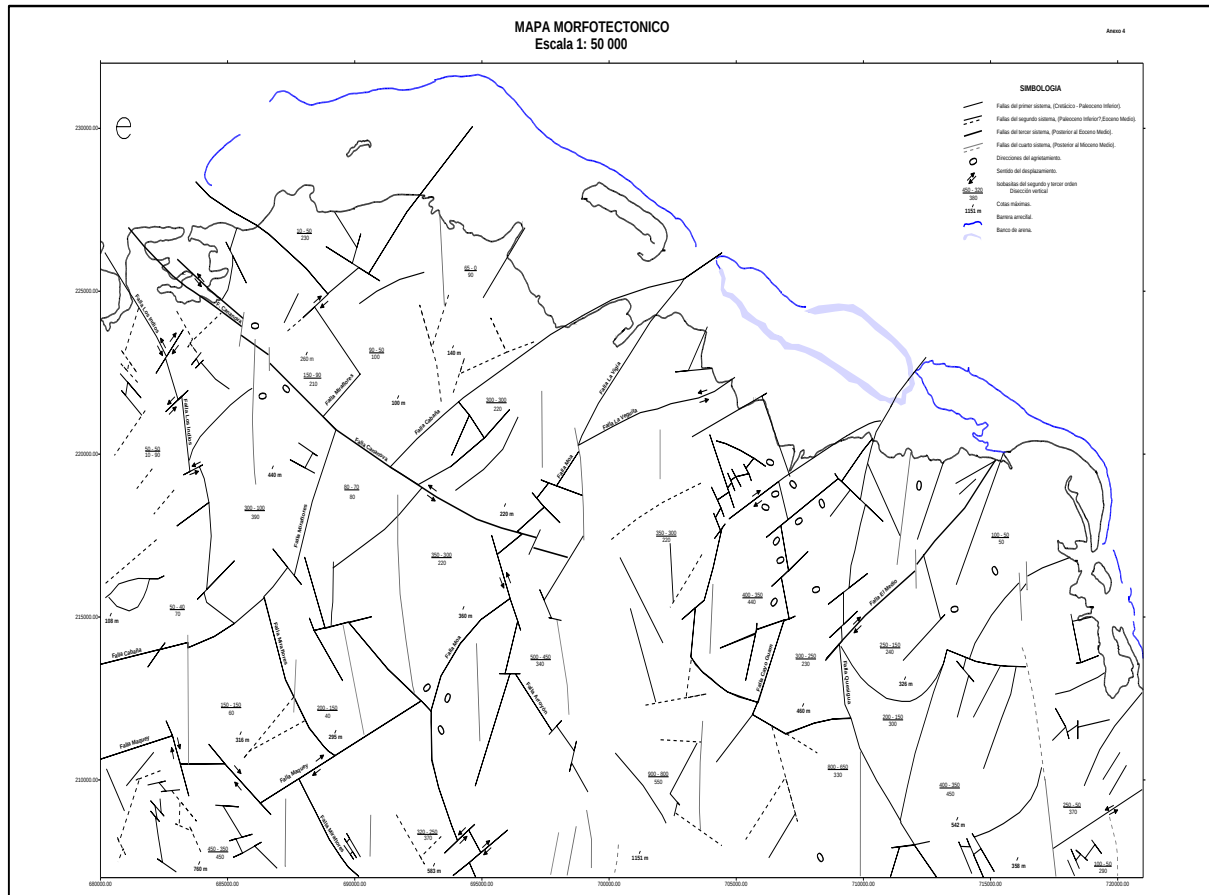


Figura 9. Mapa Morfotectónico de la región. (Modificado de Rodríguez, 2002).

El melange que caracteriza al área donde debe quedar emplazada la Planta, presumiblemente antes del Campaniano superior, formó parte de una antigua corteza oceánica que fue sometida a intensos esfuerzos de compresión, producto de un proceso de obducción, abortado en el Paleoceno Inferior debido a la ocurrencia del proceso de subducción entre la placa Caribe y la paleomicroplaca Gonaive que generó el arco de islas Sierra Maestra. A partir del Eoceno Medio hasta el Mioceno temprano el desarrollo de Cuba oriental fue de tipo platafórmico.

A partir del Mioceno la región ha estado influida por la actividad de la falla transformante de Bartlett que ha dado lugar al abombamiento de la corteza dando lugar a la formación de un gran morfoanticlinal (bloque oriental) y a la generación de fallas verticales y pliegues de tipo discontinuo (domos, cuencas estructurales y

braquipliegues). Del análisis de la evolución geológica de la zona de Moa se aprecia la complejidad lito-estructural de los distintos macizos rocosos presentes. Es común el alto nivel de agrietamiento, la presencia de fallas de carácter regional.

El área de ubicación de la Planta se encuentra entre dos estructuras de carácter regional, según Rodríguez A., 1999, confirmadas además en el estudio regional para la etapa de la ingeniería básica de la Planta de Ferroníquel (Figura10). Las mismas se detallan a continuación:

Falla Moa: Esta falla aunque se encuentra fuera de los límites de la concesión de la Planta, es desde el punto de vista regional 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 N 48° E, mientras que en su parte meridional tiene un rumbo N 25° W.

En la parte norte esta estructura se bifurca en dos tramos, uno de rumbo N 35° E denominado La Vigía y el otro de rumbo N 74° 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 arena, lo que constituye un indicador del sentido de los desplazamientos.

Falla Cananova: presenta un rumbo NW – SE en el extremo NE de la Planta, fue cartografiada a escala 1: 25 000 desde la Bahía de Yaguaneque hasta el poblado de Jucaral, presentando un rumbo predominante N 53° 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. Según el análisis de los métodos aplicados se pudo determinar que a través de la falla Cananova ocurre un desplazamiento horizontal máximo de 1500m hacia el noroeste del bloque norte respecto al sur y un movimiento rotacional izquierdo - antihorario - calculado en un valor medio de cuarenta grados de ese bloque norte. Hacia el sudeste los criterios de falla en superficie se pierden bruscamente al penetrar esta la meseta serpentinitica de potentes espesores de corteza que constituye el yacimiento Moa.

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.

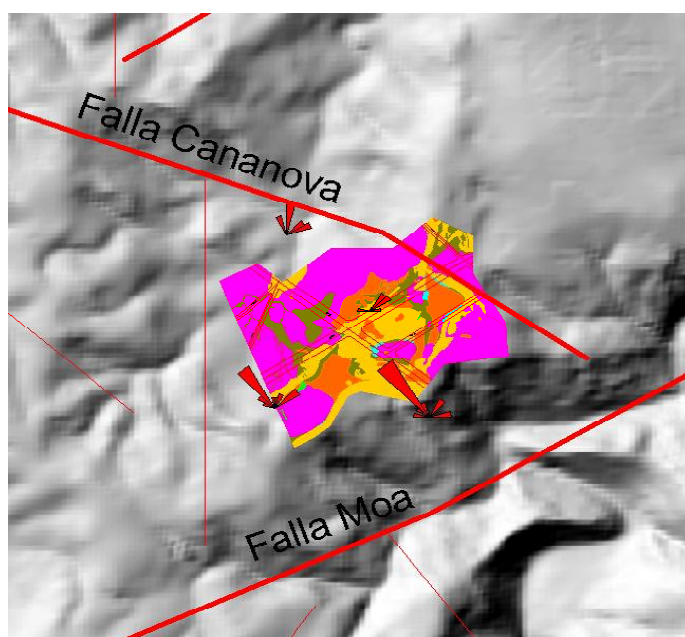


Figura 10. Estructuras que afectan el área de emplazamiento.

Condiciones Hidrogeológicas.

Las aguas subterráneas en la zona siguen la morfología del terreno, con flujos predominantes hacia el norte en la mayor parte del área, pudiendo tener sentido diferente y hasta opuesto hacia los principales cursos de aguas superficiales. El gradiente varía entre 0.03 y 31.7 (De Miguel, 1997, 2004; Blanco et al, 2004). Las

Rayner Roberto Lamorú Mediaceja.

rocas acuíferas (serpentinitas agrietadas), presentan un importante flujo por la zona del contacto con la corteza impermeable, donde se produce el movimiento lateral del agua, mientras que en las lateritas, con algunas excepciones (en los OIC y redepósitos), el movimiento del agua es fundamentalmente de ascenso capilar, el cual varía entre 0.0m a 25.5m.

La profundidad de las aguas subterráneas se encuentra entre 0 y > 20m, correspondiendo el nivel 0 a los cursos de aguas corrientes superficiales y a las excavaciones mineras que han descubierto las aguas subterráneas (De Miguel et al, 1998; De Miguel, 2004; Blanco et al, 2004). En sentido general la roca que mas predomina es la laterita y la permeabilidad en estas secuencias oscila entre 0.006 y 0.21 m/días, correspondiendo los valores más altos a los horizontes de ocre inestructurales con perdigones y los más bajos a los ocre estructurales.

Serpentinitas. Bajo este concepto se consideran a todas las ultramafitas serpentinizadas, serpentinitas e incluso pequeños cuerpos de gabro y/o diabasas presentes en el yacimiento de forma subordinada, incluyendo además las rocas lixiviadas. En sentido general la permeabilidad en estas secuencias está entre 0.004 y 0.430 m/días, aunque en zonas de intensa trituración, se pueden encontrar valores anómalos mayores de 2.00 m/días.

Los valores de la potencia acuífera se manifiestan entre 0 y 27.6m. Los más bajos corresponden a los drenes naturales y a la zona explotada. Los valores más altos corresponden a las áreas más elevadas del yacimiento. En el área predomina un complejo acuífero formado por un acuitardo o pseudo acuífero poroso en las lateritas donde existe un micro flujo, y un estrato acuífero de grietas en las brechas serpentiniticas, que pueden tener presiones locales (no determinadas) debido a la potencia de las lateritas y saprolita que yacen sobre ellas y que en partes superan los 10 m. En el área estudiada la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas es muy variada, oscilando desde menos de 2m hasta más de 10m, aunque las perforaciones ejecutadas no atravesaron la zona de agrietamiento de las rocas acuíferas; se puede estimar que por el desarrollo del intemperismo en ellas el espesor agrietado puede ser de unos 20 – 25m.

Procesos Geodinámicos y Antrópicos.

Meteorización.

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

Movimientos de masas.

Este proceso está vinculado a los movimientos de laderas naturales y taludes; generados por el proceso minero extractivo. Los mecanismos de rotura y las tipologías de los movimientos de masas desarrollados en las cortezas residuales, están condicionados por las características estructurales del macizo rocoso, aunque en las zonas de desarrollo de cortezas redepositadas, las condiciones geotécnicas de los materiales inciden con más fuerza sobre el tipo de movimiento.

Las propias condiciones naturales de las cortezas lateríticas como: alta humedad, granulometría muy fina, altos contenidos de minerales arcillosos, baja permeabilidad, así como la intensa actividad sismo-tectónica en la región y elevados índices pluviométricos, hacen que este fenómeno sea muy común y se convierta en un peligro latente, capaz de generar grandes riesgos no solo en la actividad minera sino en otros sectores del territorio.

Erosión.

Es un fenómeno muy difundido en el área. Es un proceso, que aunque se produce de forma natural en la potente corteza laterítica, se ha visto incrementado por la actividad antrópica, vinculada a la minería a cielo abierto y a la deforestación. La erosión laminar, que se desarrolla sobre la superficie de la corteza laterítica, arrastra las partículas fundamentalmente hacia la zona norte del yacimiento, donde el relieve es menos elevado, además de dirigirse hacia los cauces de los drenes naturales representados por el río Moa. Se observa además, un amplio desarrollo del acarreamiento, que aumenta sus dimensiones rápidamente en el tiempo.

Actividad antrópica.

La actividad antrópica desarrollada en la zona está representada por la actividad

minera, la minería se desarrolló en varias etapas que afectan en mayor o menor grado el entorno. Primeramente se hicieron actividades de destape de las menas lateríticas, eliminando la cobertura vegetal. En esta etapa, y producto a las grandes precipitaciones, se generaron arrastres de grandes volúmenes de sedimentos hacia los cauces de los ríos y arroyos.

Luego continuó la actividad extractiva, que generó una cantidad considerable de taludes con pendientes elevadas, relacionados con los frentes de explotación y la construcción de caminos mineros. Además, otro de los elementos negativos es la formación de embalses de aguas, en áreas internas del yacimiento, debido a la extracción. Como actividad paralela, se realizó la formación de escombreras, con los materiales estériles donde se desarrolla el proceso de reforestación y restauración. Sin embargo, en ocasiones estos sitios no se construyen con parámetros de altura.

Agrietamiento.

Para el estudio del agrietamiento en la zona de trabajo se tuvieron en cuenta los resultados indirectos obtenidos del procesamiento del modelo digital del terreno y las fotos aéreas, cósmicas y las mediciones directas realizadas en el campo conjuntamente con la aplicación de los métodos geofísicos.

Las mediciones en el campo permitieron corroborar las zonas de máxima intensidad en m/Ha obtenidas por vía indirecta. La dirección N20°E, que sigue aproximadamente el rumbo del río Moa parece ser la dirección predominante de la fracturación en la región.

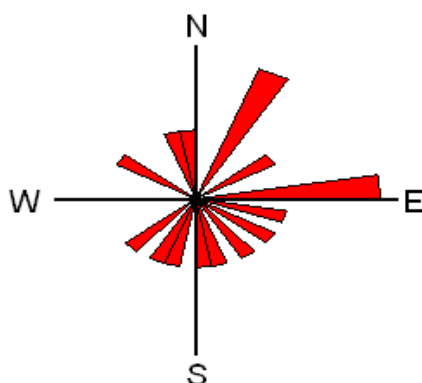


Figura 11.- Diagrama de roseta que muestra los sistemas principales obtenidos en el campo.



Foto 9. Zona de fracturación en las serpentinitas con desplazamiento NE.

En el área se observa una gran dispersión de la fracturación de la roca madre, el cual enmascara en mucho al agrietamiento puramente tectónico y puede deberse a la influencia del proceso de laboreo o al aumento de volumen de las ultrabasitas durante el proceso de serpentización.

Las fallas principales que tienen influencia en el sector escogido para la construcción de la planta son Moa, Cananova y Cabañas que son límites de bloque morfotectónicos y cuya influencia debe tenerse en cuenta (Rodríguez, 1998).

Sismicidad.

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

Estas tres zonas son:

-**Zona sismogeneradora Oriente:** Está asociada a la falla transcurrente Bartlett-Caimán de dirección este-oeste. Constituye el límite entre la placa Norteamericana y Caribeña. A esta zona corresponde la más alta sismicidad de toda Cuba y con ella se encuentran asociados los terremotos de mayor intensidad con epicentros en el archipiélago cubano.

La intensidad máxima pronóstico promedio para la zona es de VIII grados en la escala MSK, llegando hasta IX en el sector Santiago-Guantánamo. La magnitud máxima es de 8 grados en la escala Richter.

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

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

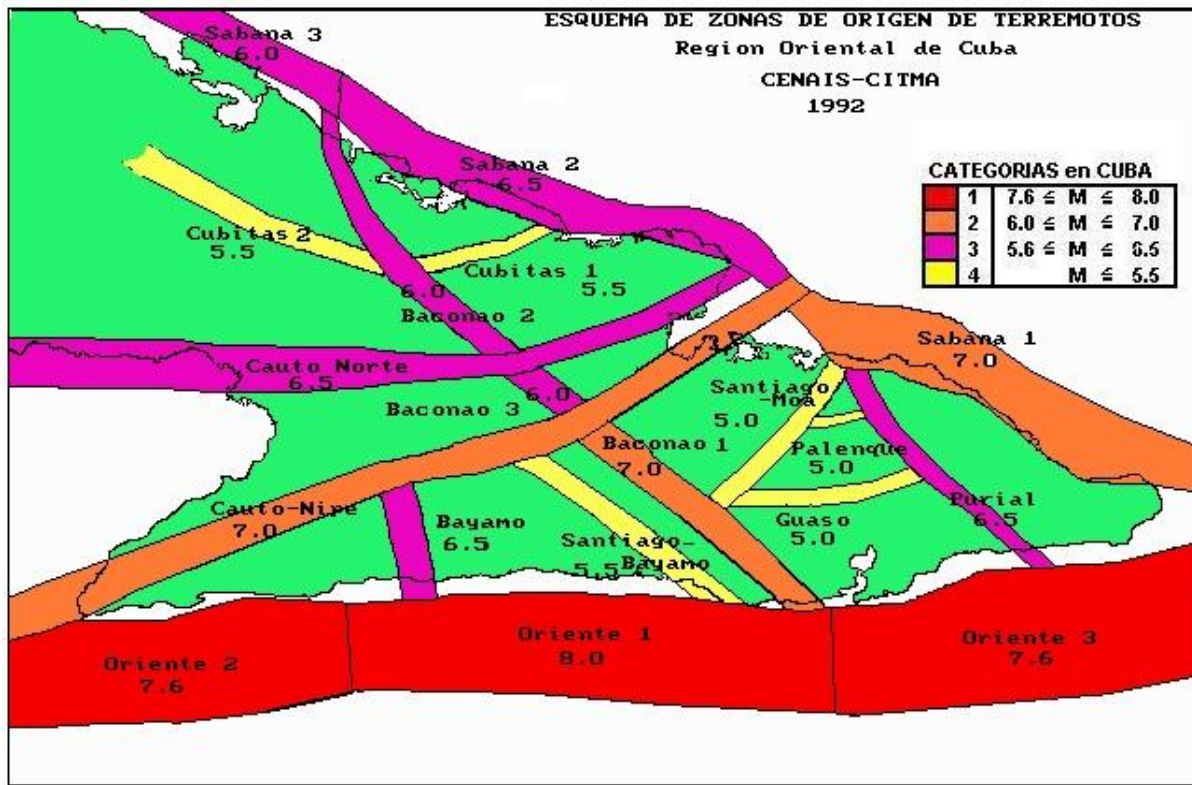


Figura 12. Zonas sismogeneratoras principales que afectan al territorio oriental de Cuba.

CAPITULO II

VOLUMEN Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Etapla preliminar: Recopilación de la información disponible: Mapas, estudios anteriores de otras instituciones: ENIA, INRH, GEOCUBA, IGP, Sismología.

Etapla campo: Levantamiento geológico, geomecánico, perforación, muestreo, ensayos de laboratorio y pruebas in situ para evaluar la resistencia de los suelos y determinar las propiedades físico- mecánicas, así como el empleo de un complejo de métodos geofísicos.

Etapla de procesamiento y análisis de resultados: Procesamiento de la información geológica y geomorfológica utilizando los MDT y la imagen LANDSAT 7 disponible. Pronóstico de fenómenos o peligros geológicos e hidrológicos y obtención de los mapas analíticos y sintéticos de conveniencia ingeniero-geológica y constructiva. Procesamiento de la información y obtención de los mapas geotécnicos.

Para la ejecución del trabajo se parte de los estudios precedentes realizados a diferentes escalas y con fines diversos por las instituciones que se dedican a los mismos, como la Empresa Geominera de Oriente, INRH, ENIA, IGP, ISMM y por la propia Agencia de Investigaciones Regionales de GEOCUBA, Se tuvo en cuenta toda la base geológica existente y alguna información de perforaciones realizadas en el yacimiento Moa Occidental, suministradas por Ferroníquel S.A.

Los trabajos realizados podemos clasificarlos en varias etapas como se muestra en el flujograma siguiente, empleado para los estudios ingeniero – geológicos para la etapa de la ingeniería básica:

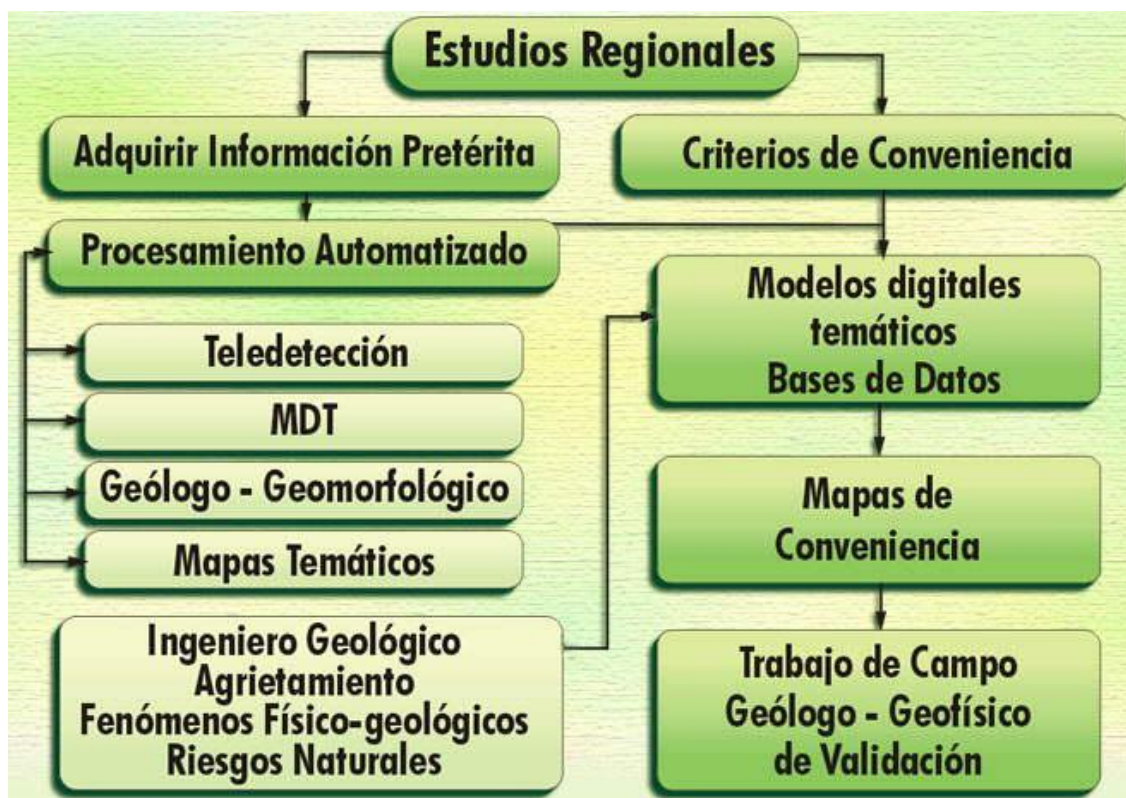


Figura 13. Flujoograma de los estudios ingeniero – geológicos de la etapa de Ingeniería básica.

Para obtener las informaciones necesarias que garantizan el cumplimiento del objetivo de la investigación se desarrollaron las siguientes tareas con los volúmenes correspondientes a la escala 1:500.

Metodología utilizada

En el levantamiento ingeniero-geológico se utilizaron los modelos de documentación normalizada de González Vallejo, 2003; modificada y la documentación normalizada para las capas de suelos (laterita y saprolita) creada por la Agencia de Investigaciones Regionales.

El levantamiento geológico se realizó por los perfiles siguiendo las estacas de la red 50 x 50, describiéndose todas las características tacto visuales de los suelos y rocas, con amarre en las estacas.

Dada la alta aflorabilidad de las rocas del basamento y de los distintos tipos de suelos, se realizó un estudio con gran detalle, obteniendo la caracterización de los principales parámetros geomecánicos, así como la fracturación, el tamaño de los bloques, la resistencia de la matriz rocosa, el grado de meteorización de la roca, la presencia o no de circulación del agua por las grietas; las características de la

Rayner Roberto Lamorú Mediaceja.

superficie de las grietas, su grado de continuidad, su espaciamiento y el grado de abertura de las mismas, teniendo en cuenta si estaban rellenas o no. En las secciones y afloramientos se tomaron fotos de lugares de interés.

Fueron seleccionadas dos secciones en uno de los taludes, a las que se les hizo la caracterización detallada. Para la selección de secciones geomecánicas se tuvo en cuenta que los cortes geológicos fueran representativos de las características geológicas del territorio investigado. Además se levantaron desde el punto de vista geomecánico todos los taludes y afloramientos localizados en el área.

Partiendo de las informaciones pretéritas de los pozos de exploración geológica realizados por la Empresa Geominera de Santiago de Cuba y añadidas las informaciones obtenidas por las perforaciones actuales, las calicatas, perfiles y secciones geomecánicas se obtuvieron los mapas del relieve de la superficie de la roca madre (basamento de la corteza de intemperismo) y el mapa del espesor del suelo y el mapa geológico de la superficie.

Se obtuvo además el mapa de rugosidad del fondo rocoso y el mapa geológico del fondo rocoso los que sirvieron de base para obtener diversos mapas Ingeniero-geológicos.

Fueron tomadas muestras para el estudio de las propiedades físico-mecánicas de los testigos de los pozos de perforación.

En el estudio de los suelos (corteza de meteorización), se tuvo en cuenta su espesor, tipo, color, humedad y plasticidad, dividiéndola en tres capas de suelo según las observaciones tacto visuales y las propiedades físicas de los mismos.

Etapas de Campo.

Tomografía eléctrica

Por el método de tomografía se realizaron 15 perfiles longitudinales con 115 m de longitud con un espaciamiento de electrodo de 5 metros en cada uno de los objetos definidos, de esta forma se obtuvo el estudio geoeléctrico del área en dos dimensiones y se garantizaron las bases para la confección de perfiles geoeléctricos a lo largo de los emplazamientos de los cimientos de la Planta, precisamente en dos dimensiones de los fenómenos físico-geológicos existentes y el reconocimiento litológico del corte en área y en profundidad.

Las líneas de tomografía fueron trazadas siguiendo la orientación de las estacas de los pozos proyectados a perforar y que abarcaron toda el área de este sector.

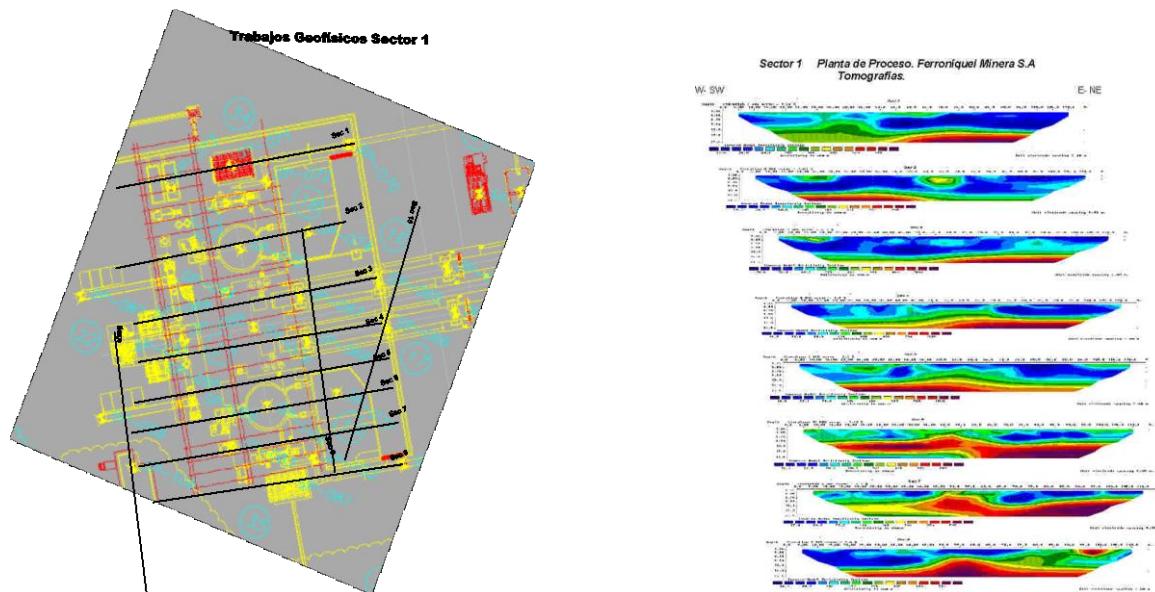


Figura 14. Trazado de los perfiles.

Para la validación de las fallas que se presentaron en el plano de los objetos se usaron algunas de las líneas de tomografías medidas en los sectores 5 y 6 y se presentan como gradientes geoelectricos de resistividad.

Sondeo Eléctrico Vertical.

El equipo utilizado para realizar todas las mediciones fue el SAS-300 B, auto compensador de alta precisión de fabricación sueca. Los trabajos de campo en cada una de las variantes fueron controlados en un 10% del volumen total y todas las mediciones se re-calcularon en el gabinete para eliminar los errores accidentales. Los trabajos de campo fueron ejecutados por la brigada de geofísica del Taller de Ingeniería geológica de la EMPI de Holguín.

Este método consiste en la medición de la resistividad del corte mediante un dispositivo de cuatro electrodos, dos de alimentación de corriente y dos de medición de potencial. Estos electrodos se van abriendo en el terreno de manera que al aumentar las dimensiones entre ellos la corriente eléctrica va alcanzando una mayor penetración y por tanto se obtienen resistividades a profundidades mayores. Estas se calculan por la expresión:

$$\rho = K \cdot \Delta U / I$$

Donde la K es una constante que depende de las aberturas relativas de los electrodos, ΔU es el potencial medido entre los electrodos de medición MN e I es la corriente que circula por los electrodos AB.

Con los valores de ρ_a obtenidos se construyeron curvas de S.E.V, que reflejan las características geoelectricas del corte en profundidad.

En nuestro caso se utilizó una instalación de tipo Schlumberger (gradiente), con aberturas máximas de $AB=150$ m con dos empalmes, con $MN= 1,6$ y 24 m respectivamente. Las mediciones se realizaron en una red de 50×50 abarcando toda el área de estudio. De esta forma se ejecutaron en el área un total de 393 S.E.V incluyendo el 10% para el control de la precisión de las mediciones.

El objetivo de los S.E.V. fue la obtención de los cortes de resistividades aparentes para cada perfil y los cortes geoelectricos, luego de la interpretación de todas las curvas mediante el programa S.I.S de los autores, Drs. José A. Roche y N. Pérez. Con ellos también se fijaron, luego de un análisis las aberturas para realizar el P.E.S.

Perfilaje Eléctrico Simétrico Doble.

En este caso luego de definidas las dimensiones de los electrodos de alimentación a utilizar, mediante el análisis del comportamiento de los S.E.V. Se realizan mediciones con las mismas a lo largo del perfil sin alterarlas, es decir con una geometría de electrodos fija. Esto permite que dichas instalaciones nos arrojen información a lo largo del perfil, a una profundidad aproximadamente igual para cada abertura. Geológicamente, esta variante nos permite mapear zonas de fallas y grietas para su posterior correlación en planta.

Se utilizó un P.E.S.D con dos aberturas, las cuales fueron de $AB=20$ m y $A'B'=60$ m, con electrodos de medición $MN =6$ m y $M'N'=20$ m. La instalación fue de tipo Schlumberger. Las mediciones se realizaron en una red irregular con paso de medición de 5 y 10m, para un total de 1013 puntos incluyendo el 10% para el control de la precisión de las mediciones. El procesamiento y elaboración de los datos se realizó con la ayuda del Microsoft Surfer de la Golden Software y estuvo a cargo del Téc. Marcos Soler. De esta forma se confeccionaron los gráficos de

resistividad aparente para cada perfil y el plano de iso-ohmas, a una escala de 1:500 para toda el área de investigación.

Método de refracción sísmica

El objetivo de su aplicación fue detallar el corte ingeniero-geológico y establecer las propiedades físico-mecánicas de las distintas capas representadas en dicho corte. Para ello se utilizó el método de refracción de las ondas longitudinales, con un sistema de observación de hodógrafos de encuentro, estudiando el área de investigación mediante puestas aisladas. Se utilizaron geófonos longitudinales de 10 Hz, con una distancia entre receptores de 3 m, la longitud de la puesta fue de 33 m, excitando el medio mediante golpes en los geófonos 1 y 12. En el área se efectuaron un total de 15 puestas con las características anteriormente expuestas. La estación utilizada para el registro de la señal sísmica fue la Terraloc de 24 canales de fabricación sueca. Con estos resultados se construyeron los cortes de isovelocidades para cada perfil de investigación.

Recopilación y digitalización de la información.

A partir de las hojas cartográficas 1:10 000 se creó el Modelo Digital del Terreno (MDT), el cual constituye la información primordial para los estudios desarrollados de tipo geomorfológicos, topográficos y en la interpretación ingeniero - geológica. Se obtuvo la red de drenaje superficial y a partir de estas dos informaciones primarias se obtuvieron distintas coberturas morfométricas y morfológicas para la escala de los trabajos.

Se confeccionó el modelo raster de los distintos tipos litológicos, en especial de las serpentinitas con el mayor grado de detalle posible para la escala de trabajo, con paso 10 x 10 m (MDL), a partir del mapa emitido en el estudio indicado para el área de la planta, las interpretaciones aerocósmicas, los procesamiento del relieve e imágenes para el agrietamiento y las observaciones de campo realizadas en distintos momentos del período de trabajo que permitieron comprobar los resultados de gabinete.

Interpretación de la información inicial y los materiales derivados del MDT.

En esta etapa se realizó el análisis conjunto de todos los materiales con el objetivo de completar la información litológica y estructural; así como mejorar los contactos entre los distintos tipos litológicos; además con la información satelital y los mapas derivados del MDT y de la red de drenaje aumentar el conocimiento ingeniero-geológico de la zona de estudio y orientar los trabajos futuros de la etapa de investigación detallada.

Fotointerpretación aerocósmica.

Para realizar estos trabajos se empleó una imagen LandSat 7, la cual fue corregida por el efecto de la desigual iluminación de la escena y rectificadas en el sistema de coordenadas Cuba Sur. Las bandas fueron reescaladas con paso 10 x10 m para hacerlas compatibles con el MDT y el resto de los materiales utilizados.

El objetivo principal de su empleo consistió, en la detección de evidencias estructurales y litológicas. Se realizaron distintas combinaciones entre bandas en falso color y de estas con variables obtenidas del MDT y componentes principales determinados con el análisis conjunto de variables morfométricas y aerocósmicas.

Las rocas más extendidas en superficie en el área son las ultrabasitas serpentinizadas pudiéndose distinguir en esta fase del trabajo importantes diferencias en la textura y estructura de las mismas a través del fototono y las clasificaciones realizadas.

Se destacan tres tipos texturo-estructurales bien diferenciados, que fueron posteriormente comprobados, como se explica y queda expresado en el mapa geológico del área.



Foto 10.- Imagen cósmica.

Detección de las estructuras disyuntivas.

Este procedimiento se desarrolló empleando una metodología creada en la Agencia de Investigaciones Regionales y que permite la detección de evidencias sobre la cartografía de lineamientos en función de cómo estas son visibles en las imágenes aerocósmicas y en distintos procesamientos realizados al MDT. Del análisis de los mapas morfométricos: disección vertical, pendiente de disección, coeficiente de variación, se obtuvieron indicios sobre posibles eventos tectónicos. El empleo de filtros direccionales permite obtener zonas de máximos alineados de estos parámetros.

Por otro lado se realizó la detección de grietas a partir del mapa de pendiente real y de filtros obtenidos del MDT.

- Obtención del relieve residual: Diferencia entre modelo promediado y el MDT, el tamaño del filtro promediador define la magnitud de la anomalía posible a detectar.
- A partir del residuo así obtenido se determinaron los puntos de inflexión, donde cambia la curvatura, estos puntos son los de mayor probabilidad de coincidir con morfoalineamientos. En la imagen así obtenida estos quedan con valor máximo y los restantes con mínimo.
- Obtención de los valores de la dimensión fractal, permite diferenciar zonas donde esta es máxima, si tenemos en cuenta que las estructuras presentan esta propiedad de replicación con la variación de la escala, entonces la

Rayner Roberto Lamorú Mediaceja.

ocurrencia de máximos de esta en la imagen obtenida es un indicador eficiente de la existencia de estos.

- Multiplicación de la imagen fractal y la de puntos de cambio de curvatura.
- Las morfoalineaciones son tratadas con un filtro direccional en 12 direcciones cada 15°. Se obtuvo una imagen para cada dirección.

Con un procedimiento establecido estas fueron: pre-esqueletizadas, esqueletizadas y vectorizadas obteniendo el cuadro de agrietamiento total y un conjunto de coberturas con paso 10 x 10 m y radio de premediación de 100 x 100 m. Entre ellas:

- Densidad de fracturas.
- Densidad de fracturas modificada.
- Cantidad de familias Jn.

A partir del mapa de densidad de fracturas, la interpretación experta de las imágenes de MDT sombreado, el análisis de la red de drenaje y el procesamiento de la imagen cósmica se obtuvo el cuadro de agrietamiento.

Los resultados de este procesamiento fueron utilizados en los análisis de calidad del macizo rocoso, estabilidad y en el esquema ingeniero - geológico para obras de cimentaciones.

Metodología de obtención de las variables que intervienen en la conveniencia Ingeniero - geológica para obras de cimentaciones.

Las variables definidas para la ubicación de las obras de cimentaciones son:

- Geología: Definida a partir de la información litológica dada por el MDL.
- Tectónica: Definida a partir del Modelo de Densidad de Fracturas.
- Calidad del macizo rocoso: Evaluado a partir de la Clasificación geomecánica de Barton (mapa Q Barton) definido con criterios de pronóstico según la metodología desarrollada por **Astraín 1999**. Define las zonas donde el macizo es inestable y por tanto es una herramienta importante para definir la mejor ubicación de las obras y posibles soluciones de estabilidad. Permite optimizar las tareas a desarrollar durante la investigación detallada y orientar las mediciones de estabilidad durante la excavación.
- Excavabilidad: definida según criterio de la dureza de las rocas, existencia o no de mineralización y homogeneidad de la misma.
- Pendiente: se toma según rangos de conveniencia y se determina a partir del modelo digital del relieve.

- Suceptibilidad a los deslizamientos: Define las zonas donde es factible la ocurrencia de movimientos descendentes de suelos y rocas y queda definida a partir de la pendiente, la calidad del macizo y el tipo de roca.
- Profundidad del manto freático: definida como la diferencia entre el relieve y la polibasita de tercer orden.

Análisis de la calidad del macizo rocoso (Q de Barton).

El análisis de la estabilidad del macizo, a nivel de pronóstico, se realizó utilizando la clasificación de Barton ajustando algunos elementos obtenidos con el empleo de técnicas de procesamiento digital del relieve y la teledetección.

La expresión de la calidad del macizo está evaluada por el índice **Q** (González, 2002) el cual tiene la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

donde:

RQD calidad de la roca.

J_n: índice de diaclasas.

J_r: índice de rugosidad de las discontinuidades.

J_a: índice de alteración de las discontinuidades.

J_w: factor de reducción por la presencia de agua.

SRF: condiciones tensionales del macizo rocoso.

Los dos primeros términos fueron obtenidos por el programa **diadasa.exe** que correlaciona los valores de **RQD** y **J_n** con el inverso de la densidad de fractura modificada y con la cantidad de familias obtenidas en la detección automatizada del agrietamiento respectivamente.

Los dos parámetros siguientes se obtuvieron para valores medios de los ofrecidos por la clasificación y los trabajos de campo realizados:

J_a = 1.0: Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, rocas desintegradas libres de arcillas.

J_r = 4.0: Diaclasas discontinuas.

El parámetro Jw fue determinado a partir de la expresión y considerando la probabilidad de infiltración de agua en un túnel y tiene la siguiente expresión

$$Jw = 1 - Inf \quad (II.2.-)$$

$$Inf = Norm \left[\frac{\log(acum).df.cf.H}{Pd} \right]_0^1$$

donde:

- *acum*: Área de la cuenca que aporta escurrimiento a cada uno de los puntos.
- *df*: Densidad de agrietamiento.
- *cf*: Cantidad de familias de grietas.
- *H*: Carga hidráulica valores positivos de la altura del punto menos la hidroisohipsa.
- *Pd*: pendiente.

Con los valores involucrados se realizó el cálculo de Q de Barton.

Análisis de la profundidad del manto freático.

La profundidad del nivel de las aguas subterráneas y sus fluctuaciones constituyen un elemento muy importante a tener en cuenta en la construcción de las obras ingenieras. Su determinación en todos los casos para la proyección de las mismas debe realizarse por mediciones directas en pozos o calas.

Para la etapa de los estudios regionales para la ingeniería básica aplicamos una metodología que ha sido validada en diferentes trabajos con fines similares y en el cual se determino el nivel de polibasita que mejor correlaciona con el nivel de las aguas subterráneas, concluyendo que para las características de la zona oriental de Cuba y en particular el noreste de Holguín se logra el mejor ajuste con la polibasita de tercer orden que representa a la red de drenaje permanente, la cual considera todos los cursos fluviales de orden 3 y superiores.

La diferencia entre el relieve actual dado por el Modelo Digital del Terreno y la superficie generada para la red de orden superior a 3, proporciona por tanto la profundidad pronosticada de las aguas subterráneas en cada punto del sector considerado a través de la expresión.

$$PMF = MDR - Pol_3$$

PMF: profundidad del manto freático

MDR: relieve

Pol₃: Superficie generada por la polibasita de tercer orden.

Este procedimiento aunque es una aproximación, nos permite establecer un mapa de hidrosohipsas, que será comprobado en la etapa de ingeniería de detalle.

Análisis de la Excavabilidad.

La excavabilidad determina el trabajo necesario a realizar y por ello los recursos que habrá que invertir en la ejecución de la obra, proporcionando información para la selección de la tecnología de excavación (Astraín et al; 1991).

En su concepción parte de criterios fundamentalmente litológicos y dentro de estos las distintas facies constitutivas de las rocas.

La hipótesis para la caracterización de la excavabilidad se puede resumir en:

- Rocas duras: son mucho menos excavables que las menos duras (FKP).
- El enriquecimiento de sílice u otros minerales de alta dureza de las rocas, dificulta su excavación (Intercalaciones).
- Secuencias rocosas homogéneas son preferibles a las heterogéneas (Homogeneidad).

Id Fm	Litología	Dureza		Homogeneidad (2)	Intercalaciones R/M de alta dureza (3)	Índice de excavabilidad
		FKP	Índice (1)			
4	Sedimento	0.1	1.0	1	1	8.0
5	Serp. muy agrietada	2.0	2.3	5	4	7.3
6	Serp. medianamente agrietada	4.1	3.7	6	5	6.6
7	Peridotita Serpentinizada	6.5	5.4	7	6	5.7
3	Gabros	9.8	7.7	9	8	4.5
2	Diques de diabasas	11.6	8.9	10	10	3.5
1	Basaltos	13.2	10.0	10	10	3.0

Tabla 2. Principales parámetros físico - mecánicos y litológicos relacionados con la excavabilidad.

Índice de Dureza. Se calcula a partir de los valores del FKP, calculado por los valores medios de velocidad de las ondas sísmicas V_p , obtenidos de la literatura y/o informes de investigaciones anteriores y las relaciones empíricas de Protodiakonov, luego normalizados en el rango de 1-10, a través de la siguiente fórmula:

$$indice = \left\lceil \frac{Z - Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}} * 9 \right\rceil + 1$$

Índice de Homogeneidad. Se toma por criterio de experto y las observaciones de campo. Los valores más altos son aquellos en que las rocas son más homogéneas.

Intercalaciones de rocas o minerales de alta dureza. Se toma por criterio de expertos y criterios de campo. Los valores más altos son los que tienen intercalaciones de rocas o mineralización muy duras.

Índice de excavabilidad. Para calcular el **Índice de Excavabilidad** se le da peso a cada índice calculado o tomado por criterio de experto y se aplica la siguiente fórmula:

$$* = \sqrt[11]{(1 - *peso(1 - + (2 - *peso(2 - + \sqrt[11]{(3 -] * peso(3 -)}) / \{ peso(1 - + peso(2 - + peso(3 -)$$

Análisis de la susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos.

Este peligro se evaluó atendiendo a dos parámetros fundamentales que condicionan su ocurrencia: pendiente del terreno y calidad del macizo rocoso. Los elementos disparadores, intensas lluvias y sismos fueron analizados independientemente, en este caso se analizó la interrelación entre estos eventos y su influencia para el desencadenamiento de deslizamientos de rocas y/o suelos.

La inestabilidad de los taludes es uno de los peligros existentes. Es importante determinar las zonas potencialmente más peligrosas y realizar acciones encaminadas a disminuir la vulnerabilidad de la infraestructura.

A partir de MDT se obtuvo el modelo de pendiente clasificándolo en tres niveles principales, atendiendo a la estabilidad de los taludes:

1. Pendientes menores de 20 grados: Zonas de menos probabilidad de ocurrencia, no obstante pueden existir deslizamientos de suelos (lateríticos).
2. Pendientes entre 20-30 grados: Condiciones medias de peligro.

3. Pendientes mayores de 30 grados: Por lo general son proclives a los deslizamientos.

El análisis de la estabilidad del macizo, a nivel de pronóstico, se realizó utilizando la clasificación de Barton ajustando algunos elementos obtenidos con el empleo de técnicas de procesamiento digital del relieve y la Teledetección.

La expresión para la susceptibilidad al deslizamiento viene dada por la expresión siguiente:

$$S_{desliz} = Lito \left[\frac{(1.534 \text{ } pd - 0.085 \text{ } dv)}{Q} \right]$$

Donde:

Q: calidad del macizo (González Vallejo 2002)

L: Lito: Mapa litológico evaluado para deslizamientos

Pd: pendiente en grados

Dv: disección vertical (m)

Escala	Tipo de roca	Probabilidad de deslizamiento
0	Duras	No probable
1	Semiduras y duras	Poco probable
2	Semiduras y blandas	Probable
3	Blandas	Muy probable

Tabla 3. Factores que influyen en el deslizamiento de las masas rocosas en los taludes. Factor: Dureza de las rocas presentes en las formaciones

Escala	Estratificación o foliación*	Probabilidad de deslizamiento
0	Masiva	No probable
1	Muy gruesa a gruesa	Poco probable
2	Gruesa y Media	Probable
3	Fina a media	Muy probable

* La foliación siempre es fina

Tabla 4. Factor: Por estratificación o foliación

Sedimentos cuaternarios

1. **Aluviones:** Masivos y estratificados. Los estratificados generalmente son intercalados de diferente granulometría con capas de finas a gruesas. Frecuentes variaciones laterales de las facies y espesores. Predominantemente son deleznales. Taludes poco estables.

Clave del macizo rocoso	Por Cohesividad (equivalente a dureza)	Por estratificación	Valor medio	Probabilidad de deslizamiento
28 A 1	3	2	2.5	Probable a muy probable
28 A 2	1	1	1.0	Poco probable

28 A 1 aluvión arenoso arcilloso

28 A2 aluvión de gravas o guijas

Cortezas lateríticas in situ y redepositadas

1. Cortezas in situ

- Sobre gabroides

Lateritas más “arenosas” que las desarrolladas sobre ultramafitas serpentinizadas. La arcilla predominante es la caolinita. Presenta horizontes semejantes a capas normalmente de gruesas a medias

28 B1 laterita in situ sobre gabros

28 B2 lateritas in situ sobre ultramafitas serpentinizadas

- Sobre ultramafitas serpentinizadas

Lateritas con arcilla montmorillonítica e hidróxidos y óxidos de hierro como componentes fundamentales. Los taludes desarrollados sobre gabroides tienden a ser más inestables que los desarrollados sobre ultramafitas.

Macizo rocoso	Cohesividad	Estratificación	Valor medio	Probabilidad de deslizamiento
28 B1	3	3	3	Muy probable
28 B2	1	3	2	Probable

2. Cortezas redepositadas. Se comportan como los aluviones de la clase 28 A1.
 - Generalmente estratificadas.
 - Secuencias normalmente intercaladas compuestas de sedimentos de diferente granulometría.
 - En general, más permeables y menos cohesivas

Clave del macizo rocoso	Dureza	Estratificación	Valor medio	Probabilidad de deslizamiento
17	1	2	1.5	Poco probable a probable
16	2	2	2	Probable
29	2	2	2	Probable
9	2	2	2	Probable
27	1	0	0.5	No probable a poco probable
1	0	2	1	Poco probable
30	2	2	2	Probable
76	1	2	1.5	Poco probable a probable
13	0	0	0	No probable
12	2	2	2	probable
23	1	2	1.5	Poco probable a probable
21	1	2	1.5	Poco probable a probable
22	0	0	0	No probable
85	1	0	0.5	No probable a poco probable
70	1	2	1.5	Poco probable a probable
86	1	2	1.5	Poco probable a probable
68	1	0	0.5	No probable a poco probable
58	0	0	0	No probable
45	0	0	0	No probable
82	1	0	0.5	No probable a poco probable

Con el modelo descrito se determinaron las zonas de mayor peligro de deslizamiento, utilizando como criterio de clasificación las zonas donde potencialmente es más probable la ocurrencia del fenómeno.

Al igual que en otros eventos como en las inundaciones, las lluvias son el principal elemento que actúa como iniciador de este tipo de fenómeno. La condición más favorable desde el punto de vista climático para el aumento de la intensidad de la erosión es cuando los suelos están saturados y por tanto es baja su permeabilidad; en este caso el escurrimiento es máximo. Atendiendo a estos criterios se puede inferir que la época del año donde se deben esperar deslizamientos es en los meses de mayo-diciembre y fundamentalmente en el mes de octubre.

El análisis de un terremoto como elemento disparador de deslizamientos de taludes se calculó de forma preliminar con el empleo del criterio magnitud-distancia (González 2002). Se realizaron los cálculos para dos variantes:

- Simulando un evento sísmico según el grado asociado a las zonas sismogeneradoras, NC 53-114 de 1984.
- Simulando un evento sísmico análogo a los ocurridos en la región oriental del país con magnitudes ≥ 5 , según la recomendación del método empleado (Tabla 2).

A partir de los nomogramas de magnitud distancia se ajustaron las ecuaciones para:

Rotura del talud: $D_{rt} = e^{-11.43248 + 3.774355 - 0.2052448 \cdot Ms^2}$

Rotura total del talud: $D_{rtt} = e^{-13.58504 + 3.640801 - 0.180978 \cdot Ms^2}$

Donde Ms es la magnitud del terremoto.

id	X	Y	Ms	Lugar	Año
1	524329	194028	5.8	Bayamo	1551
2	576818	127760	7.6	Santiago de Cuba	1766
3	565689	293778	6.15	Jíbara	1914
4	461571	135379	5.6	Pilón	1976
5	395290	88049	7	Cabo Cruz	1992
6	729472	306291	5.4	Moa	1998

Tabla 5. Terremotos con $Ms \geq 5$

CAPITULO III.

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

Análisis de la microtectónica de la zona de estudio.

En el área de estudio se caracterizan los grandes afloramientos de las rocas del fondo desde el punto de vista del agrietamiento que la afecta, utilizando para ello las observaciones y mediciones directas de campo y el procesamiento de las mismas a través de software de amplio uso en la geotecnia como el “Roseta” y el “Rock Works 2006”, con el objetivo de obtener las rosas de direcciones y los diagramas polares (de contorno) que proporcionan información sobre el azimut del buzamiento, el ángulo de buzamiento y las direcciones de los sistemas o familias de grietas principales.

Del total de afloramientos procesados se tomaron los 10 más representativos por su extensión y número de mediciones realizadas de forma directa para caracterizar la microtectónica de la zona de estudio, conservándose la nomenclatura utilizada para los mismos durante los trabajos de campo.

Análisis de las capas ingeniero – geológicas.

La caracterización de las propiedades físico-mecánicas de las litologías o capas ingeniero-geológicas presentes en el área de estudio para la etapa de ingeniería básica se presenta teniendo en cuenta los resultados de los métodos geofísicos, la determinación de la capacidad soportante a muestras irregulares tomadas durante el levantamiento ingeniero-geológico en los afloramientos existentes y por criterio de analogía a partir de determinaciones a rocas con características y condiciones similares dentro del complejo ofiolítico.

De la interpretación conjunta de los métodos aplicados para esta etapa en los tres perfiles investigados, se puede apreciar la existencia de 4 capas ingeniero-geológicas, tanto por sus características geoelectricas, sísmicas, observaciones in situ y algunas determinaciones directas que se describen a continuación:

Capa I. Serpentinita muy agrietada: Aparece en la parte superior mezclada con saprolita y en ocasiones con la limonita que no fue procesada en la extracción del níquel por la rugosidad de fondo, lo que la hace una litología muy blanda, de ahí su alto coeficiente de ablandamiento cuando se satura y baja resistencia a la

compresión que la hacen tener un comportamiento entre suelo y semi-roca, los espesores son muy variables que van desde los 0.10 a 0.15 m hasta los 0.5 m, posee valores de las ondas longitudinales de 370 m/s y resistividades de 91 ohm.m, esta capa no es favorable para la cimentación.

Capa II. Serpentinita medianamente agrietada: Se ubica por debajo de la Capa I, con espesores muy variables que van desde los 0.5 m hasta los 2.0 m, posee valores de las ondas longitudinales de 650 m/s y resistividades de 50 ohm.m, para esta litología la capacidad soportante continua siendo baja, pues está muy meteorizada y su densidad de agrietamiento aunque es relativamente menor continua siendo alta, el estado de saturación es alto de ahí su elevado coeficiente de ablandamiento, esta capa por sus condiciones y espesor no es favorable para la cimentación de objetos de obras que transmiten grandes cargas.

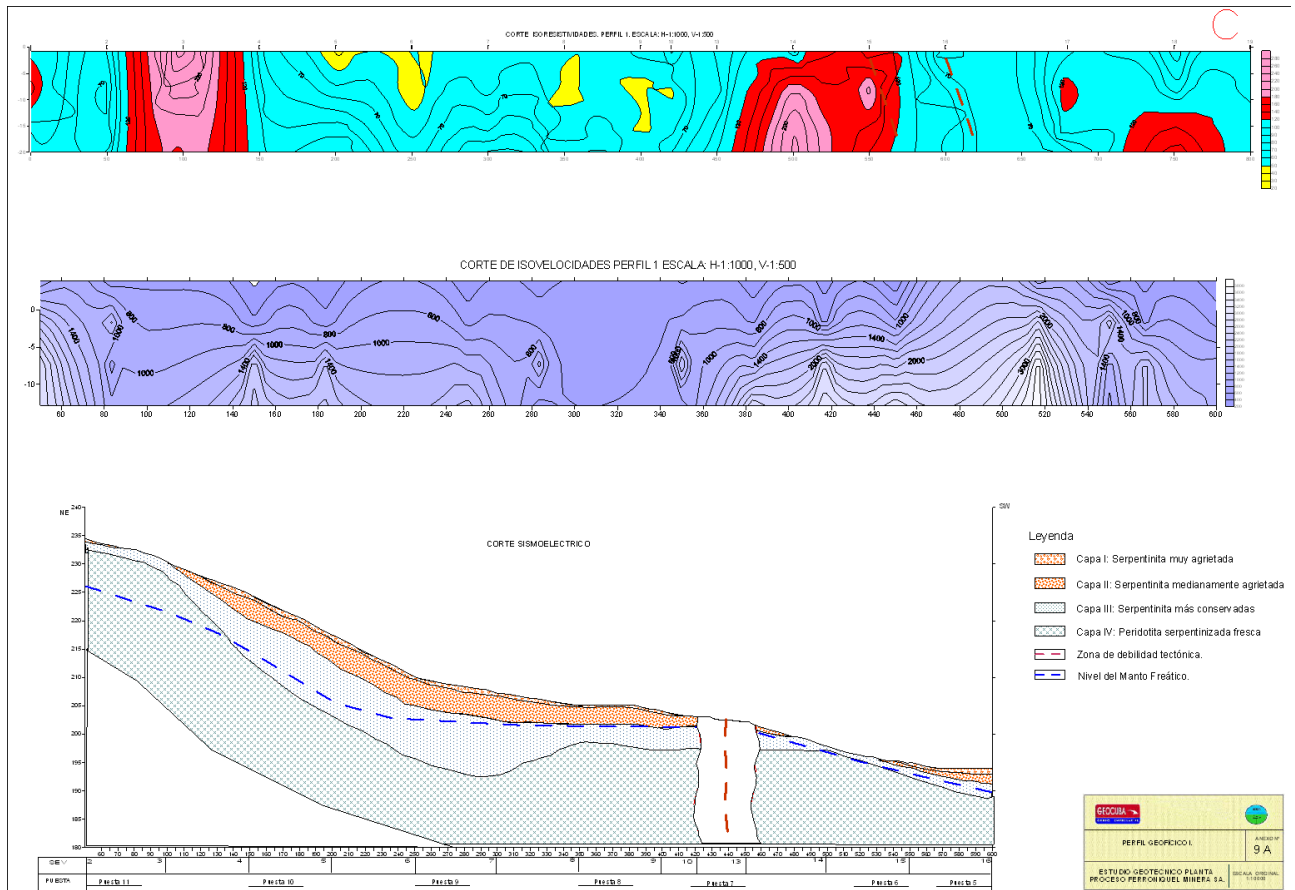
Capa III. Serpentinitas mas conservadas: se caracteriza por una densidad de agrietamiento más baja, aunque continua siendo significativa por el mismo carácter de su emplazamiento, la calidad de esta tipo de macizo de acuerdo a la clasificación de Barton es de condiciones regulares, su grado de saturación es alto, y a esta litología debe estar asociado el nivel del manto freático, de ahí que sus condiciones físico-mecánicas se vean afectadas por la presencia del mismo. Se ubica por debajo de la Capa II aunque en ocasiones aflora, sus espesores son variables y van desde los 2-3 m hasta los 8-10 m, posee valores de las ondas longitudinales de 1619 m/s y resistividades de 58 ohm.m, esta capa atendiendo a su resistividad no difiere mucho de la Capa II, su capacidad soportante puede tener un comportamiento favorable pues determinaciones in situ realizadas registran valores que alcanzan los 25.9 MPa, por las determinaciones geofísicas este valor disminuye hasta 4.7 MPa. Esta Capa de acuerdo a los resultados obtenidos en esta etapa y que deberán ser validados en la ingeniería de detalle, posee una profundidad de yacencia favorable para la cimentación.

Capa IV. Peridotita serpentinizada: Esta Capa es la de mejores condiciones ingeniero-geológicas. Su densidad de agrietamiento es de baja a media, el macizo desde el punto de vista geomecánico posee condiciones buenas, es una litología muy dura, con resistencia a la compresión superiores a 61.7 Mpa de acuerdo a

Rayner Roberto Lamorú Mediaceja.

determinaciones in situ, llegando según datos geofísicos hasta 18.0 Mpa, aunque en las zonas de mayor densidad de agrietamiento o de fallas esta debe bajar. Se ubica por debajo de la Capa III, su límite inferior sobrepasa la profundidad de investigación, aunque en algunos sectores del área aparecen bloques aflorando, posee valores de las ondas longitudinales de 2713 m/s y resistividades de 221 ohm.m.

Como se observa en la figura 15, se detectó una zona donde cambian significativamente los espesores de las capas y las variables geofísicas. El mismo en esta zona es paralelo a un arroyo, que constituye una falla con una amplia zona de destrucción que abarca aproximadamente 20 m, de ahí que en el corte no se observen evidentes anomalías sismoeléctricas asociada a tectonismo, similar comportamiento tienen los restantes perfiles; en los afloramientos se observan las rocas muy milonitizadas, con un agrietamiento muy intenso, donde predominan más de cuatro sistemas de grietas y algunas acompañantes, con espaciamiento menores a 3 mm, predominando las cerradas y algunas abiertas con mineralización secundaria, los planos son ondulados, planos a ondulados rugosos, con presencia de agua ocasionalmente.



Capa	Litología	v_p (m/s)	ρ_a (ohm.m)	δ (kN/m ³)	R_c MPa	F.K.P	Poisson
Capa 1	Serpentinita muy Agrietada	370	91	16.9	0.54	0.05	-
Capa II	Serpentinita medianamente agrietada	650	50	17.5	1.2	0.12	0.16
Capa III	Serpentinita mas conservadas	1619	58	20.8	4.7	0.47	0.27
Capa IV	Peridotita Serpentinizada	2713	221	22.5	18.0	1.8	0.31

Figura 15. Perfil geólogo-geofísico.

Tabla 5. Propiedades físico-mecánicas según datos geofísicos.

Leyenda:

v_p -Velocidad de las ondas longitudinales

ρ_a - Resistividad eléctrica.

δ - Densidad.

R_c - Resistencia a la compresión.

F.K.P- Factor de excavabilidad del macizo.

Propiedad mecánica a muestras irregulares in situ									
Capa		Profundidad (m)	Resistencia a la compresión		Dureza	Clasificación			
Nº	Tipo		Seca	Saturada		Petrográfica	Tabla adaptada de Duncan y Jennings	Precons 2005	
		MPa	FKP						
1	IR	Superficie	Desmenuzada al corte		-	Serpentinita muy Agrietada	Blanda	Blanda	
2	IR	Superficie	13,2		1,3	Serpentinita Med Agrietada	Blanda	Media	
3	IR	Superficie	25,9		3	Serpentinita mas conservada	Blanda	Media	
4	IR	Superficie	61,7		6,2	Peridotita Serpentinizada	Dura	Dura	

Clasificación de las rocas por su dureza:	
FKP	Tipo
> 6	Dura
? 2.1 y ? 6	Media
? 2	Blanda

Resistencia	Clasificación
?140	Muy dura
> 56 y < 140	Dura
>17,5 y ? 56,0	Blanda
? 7 y ? 17,5	Muy blanda
< 7,5	Sin dureza, es una semiroca o suelo

Tabla 6. Propiedad mecánica a muestras irregulares in situ

Análisis de conveniencia.

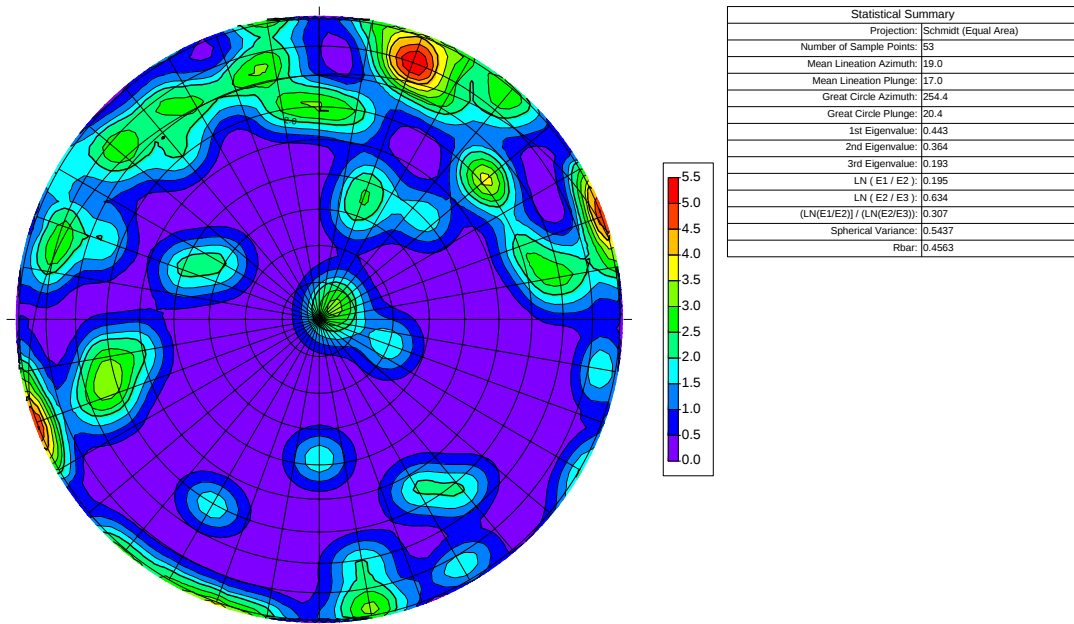
Para el análisis de la conveniencia se tuvieron en cuenta las siguientes variables ordenadas por el peso asignado para cada una de ellas, considerando la importancia de las mismas para obras de cimentaciones:

No.	Variable	Peso
1	Litología	7
2	Profundidad del Nivel freático	6
3	Q de Barton	5
4	Deslizamiento	4
5	Excavabilidad	3
6	Densidad de fracturas	2
7	Pendiente	1

Tabla 7. Variables por peso asignado en la conveniencia.

Previamente para cada una de estas variables se establecieron los ponderales (R_1 y R_2 correspondientes) entre los cuales las mismas se tornan convenientes o inconvenientes para la construcción de obras ingenieras.

Afloramiento 1- Se encuentra ubicado entre las coordenadas X_1 : 695051.60, X_2 :695119.09; Y_1 : 217696.05, Y_2 :217751.90. En el mismo se observa una alta dispersión en los elementos de yacencia de las grietas, con ángulos de buzamiento entre 0° y 90° , destacándose que los dos sistemas con mayor frecuencia en el agrietamiento, representados en color rojo, son los de más alta inclinación con ángulos de 80° y 90° .

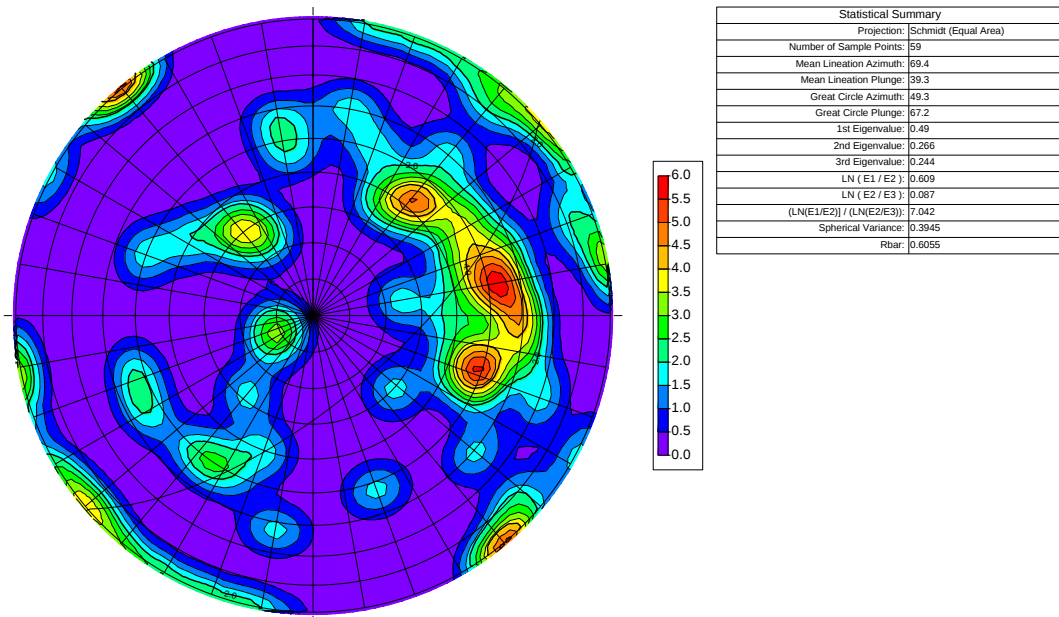


Fig

ura 16.- Diagrama polar del Afloramiento 1.

En la figura 16 se puede observar la distribución del agrietamiento y en particular la posición espacial de los sistemas de grietas principales, según un arco de círculo máximo que los contiene. En sentido general más del 80 % de las familias de grietas están por encima de los 40° de buzamiento y solo dos sistemas presentan valores entre 0° y 20°, siendo excepcionales las grietas horizontales.

Afloramiento 2. En este punto con coordenadas X_1 : 695341.03; X_2 : 695331.92 Y_1 : 217533.82; Y_2 : 217824.59, las rocas presentan al igual que en el anterior una alta dispersión en el grado de fracturación destacándose la existencia de 13 sistemas de grietas principales, apreciándose tres sistemas entre los 20° y 120° de dirección con ángulos de buzamiento entre 50° y 60°. Las disyunciones verticales o muy cercanas a la vertical conforman tres familias que ocupan el segundo lugar por la frecuencia del agrietamiento. El arco de círculo máximo presenta un valor de 22° con acimut de buzamiento de 130°.



Fig

ura 17.- Diagrama polar del Afloramiento 2.

En la figura se aprecia que las grietas horizontales o sub-horizontales, hasta unos 10° de buzamiento se presentan en un solo sistema con una frecuencia de baja a media.

Afloramiento 3.- Aparece en el tramo entre las coordenadas, X_1 : 695081.22, X_2 : 695042.13; Y_1 : 217692.92, Y_2 : 217660.11, con una longitud de unos 40m. Se caracteriza por ser el afloramiento en que mayor número de mediciones de familias fue posible realizar (175 mediciones), por lo que puede ser considerado como el patrón que caracteriza el área en su conjunto si consideramos sobre todo que se encuentra ubicado prácticamente en el centro de la zona de estudio. Todos los sistemas de grietas con mayor frecuencia porcentual se ubican por encima de los 60° de buzamiento con valores extremos entre 75° y 90°. El afloramiento presenta una cantidad apreciable de familias con una baja frecuencia de manifestación lo cual indica que el macizo dentro del alto grado de tectonismo que presenta todo el sector se encuentra bastante conservado, lo cual fue corroborado con las observaciones de campo. El arco de círculo máximo tiene un buzamiento de 75° y un acimut de 340°.

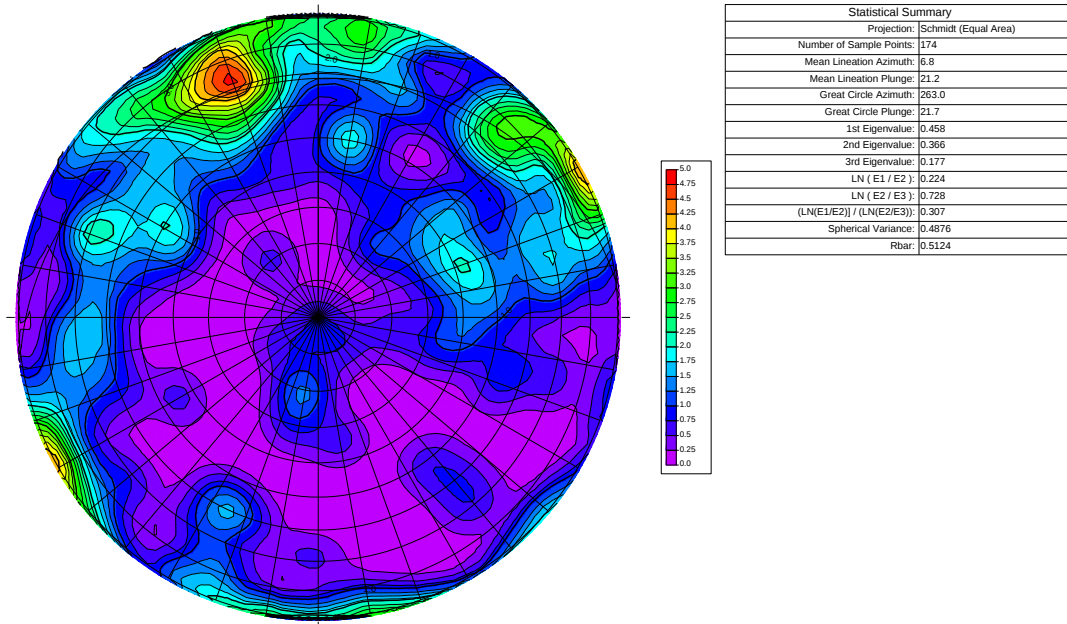
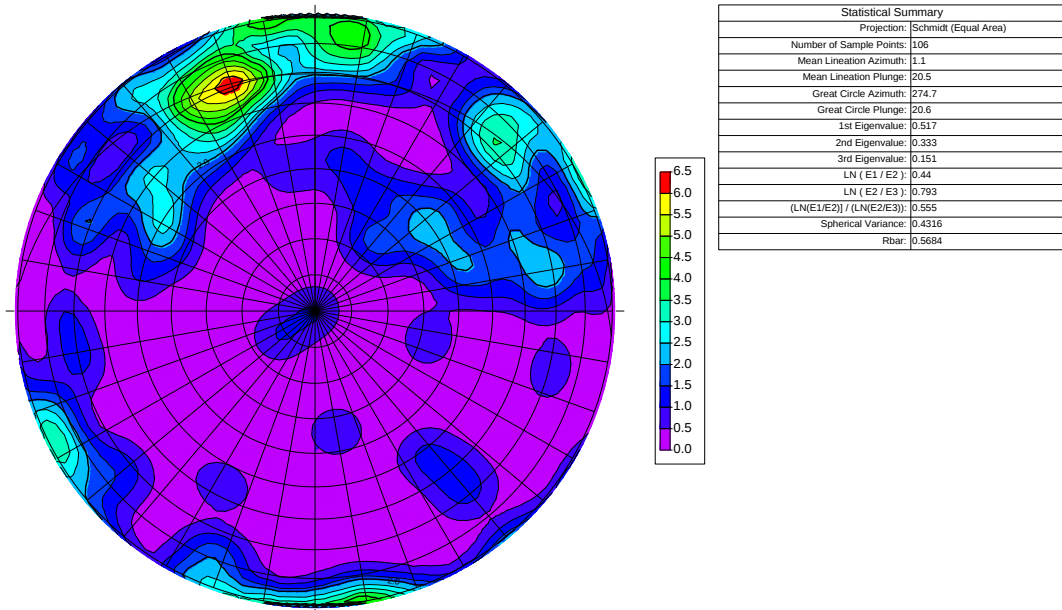


Figura18. Diagrama polar del Afloramiento 3.

Afloramiento 4.- Está ocupando el sector comprendido entre las coordenadas X_1 : 695059.30, X_2 : 695042.13; Y_1 : 217682.02, Y_2 : 217660.11, teniendo en general un comportamiento estructural bastante similar al del Afloramiento 3. Los 4 sistemas con mayor número de casos presentan ángulos de buzamiento por encima de 70° hasta hacerse verticales en un extremo del sistema principal en que la frecuencia porcentual se comporta entre 5.5 y 6.5. Existe un detalle significativo entre los afloramientos 3 y 4 en lo referido al sistema principal, por la frecuencia, al presentar los mismos elementos de yacencia prácticamente iguales ($340^\circ/70^\circ$). El afloramiento se caracteriza además por tener también un gran número de familias con pocos casos indicando un buen nivel de conservación.



Fig

ura 19. Diagrama polar del Afloramiento 4.

Afloramiento 5.- Está espacialmente ubicado en el sector de estudio entre las coordenadas X_1 : 695360.62 X_2 : 695353.44 Y_1 : 217436.25 Y_2 : 217403.39. Se caracteriza por la presencia de 13 familias de grietas. Aparecen 3 sistemas de fracturas con ángulos de buzamientos entre los 30° y 70° con un valor medio de alrededor de 50° en los sitios de mayor frecuencia del agrietamiento y con acimuts de buzamiento de 25° , 270° y 290° . En este sitio solamente dos sistemas aparecen con ángulos de buzamientos verticales o sub-verticales con direcciones de 10° y 350° . El arco de círculo máximo se presenta según los 330° de dirección con 10° de buzamiento y un acimut de buzamiento de 230° .

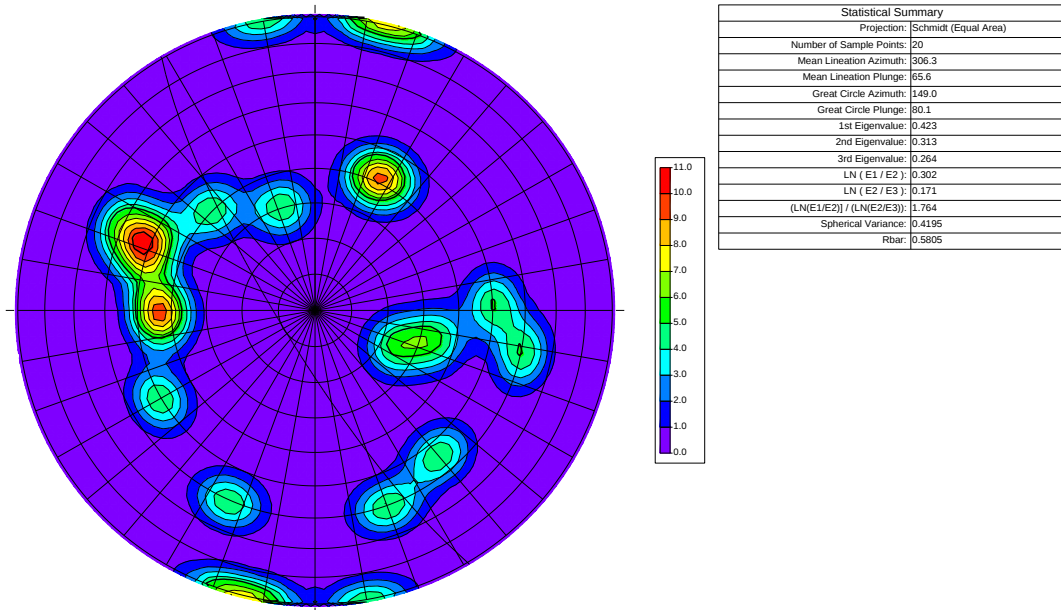


Figura 20.- Diagrama polar del Afloramiento 5.

Afloramiento 6.- Las coordenadas que ubican espacialmente al afloramiento son, X_1 : 695279.51, X_2 : 695215.36; Y_1 : 217288.81, Y_2 : 217300.59. Se manifiestan en este afloramiento 19 familias de grietas con una alta dispersión de sus elementos de yacencia, los cuales van desde los 20° hasta los 90° . Este último valor se manifiesta en un solo sistema. El valor aproximado de los sistemas principales por su frecuencia porcentual para el agrietamiento se encuentra entre los 30° y 50° . Desde el punto de vista estructural y en relación a los descritos con anterioridad existe una clara diferencia respecto a los mismos en lo referido a la existencia de pocas familias con buzamientos altos y a una menor concentración de las direcciones de buzamiento de estos sistemas. El arco de círculo máximo presenta elementos de yacencia de 10° para el buzamiento, 250° para el acimut del buzamiento y 340° para la dirección del plano que contiene al arco de círculo.

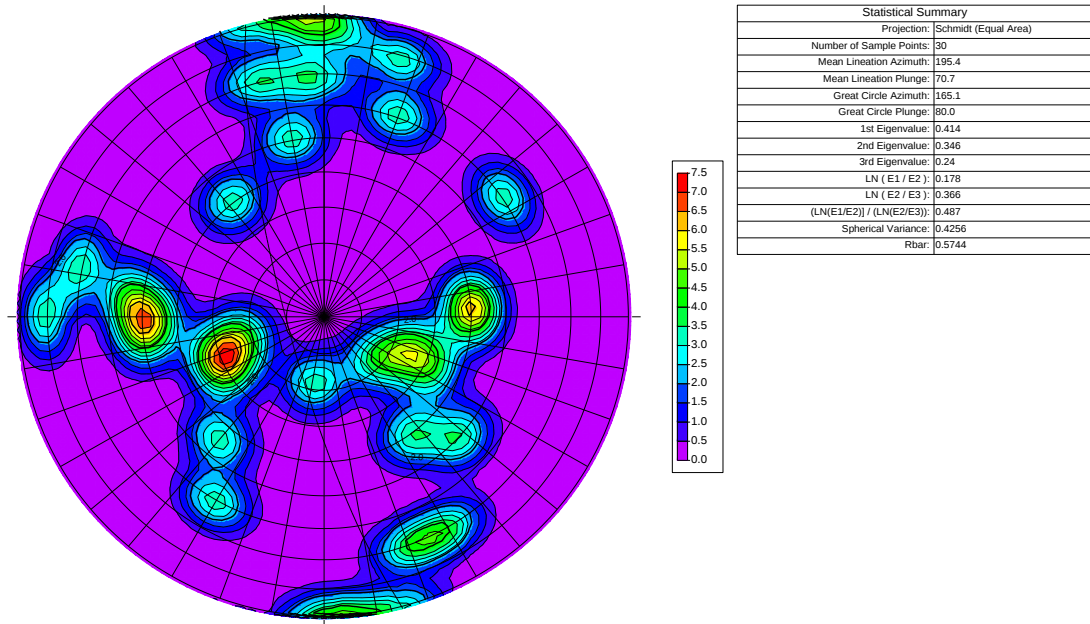


Figura 21. Diagrama polar del Afloramiento 6.

Afloramiento 7.- Se encuentra ubicado entre las coordenadas: X_1 : 695144.53 X_2 : 695101.60 Y_1 : 217301.74 Y_2 : 217323.64. En el afloramiento se desarrollan 12 familias de grietas. Aparecen 2 sistemas con ángulos de buzamiento de 90° y con direcciones NS y EW con una frecuencia de aparición relativamente baja respecto al total del punto. El sistema principal, por la cantidad de grietas que en él se desarrollan, tiene un ángulo de buzamiento de 40° y 265° de acimut de buzamiento. El arco de círculo máximo para sus elementos espaciales tiene un comportamiento similar al de este sistema principal. La dispersión del agrietamiento es muy alta, indicando un alto grado de anisotropía de las rocas.

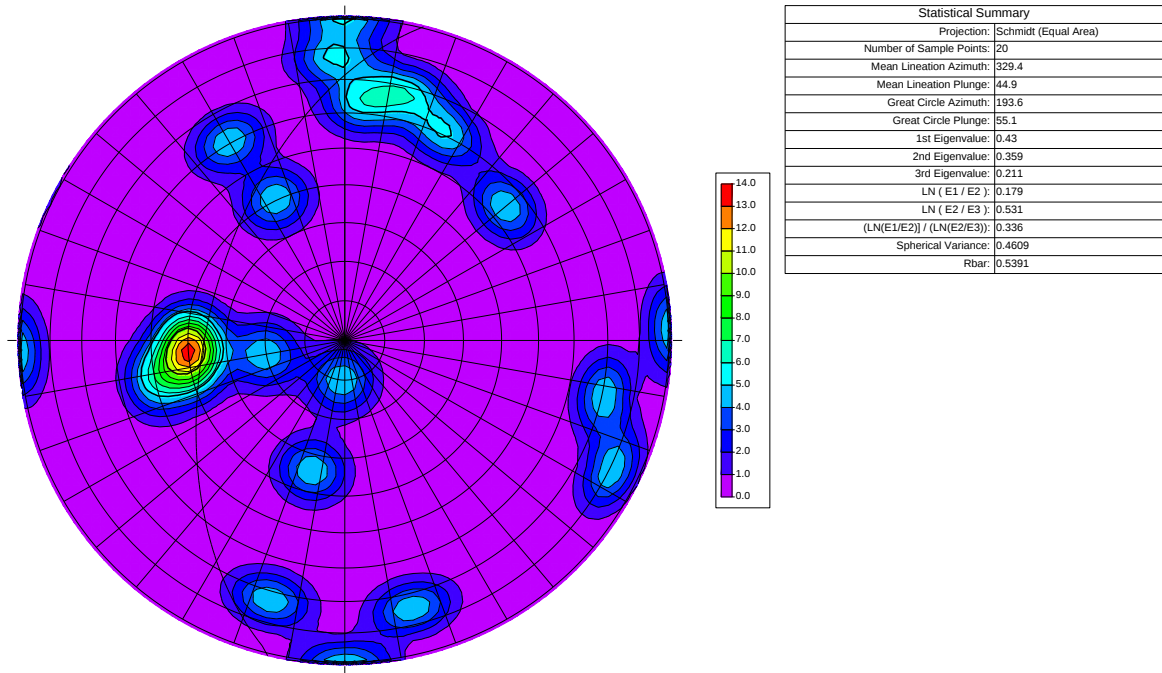


Figura 22. Diagrama polar del Afloramiento 7.

Afloramiento 8.- Aparece ubicado dentro del sector comprendido entre las coordenadas X_1 : 695118.26 X_2 : 695278.95 Y_1 : 217337.15 Y_2 : 217373.43, estando afectado por 12 sistemas de grietas con una alta dispersión en la dirección y ángulo de buzamiento de los mismos. Dos de esos sistemas presentan inclinaciones verticales o muy cercanas a la vertical; en tanto que el sistema más significativo por la frecuencia de aparición de grietas se comporta con acimut de buzamiento de 80° y ángulo de buzamiento de unos $32-33^\circ$. Para estos mismos parámetros el arco de círculo se comporta según los 15° y 210° .

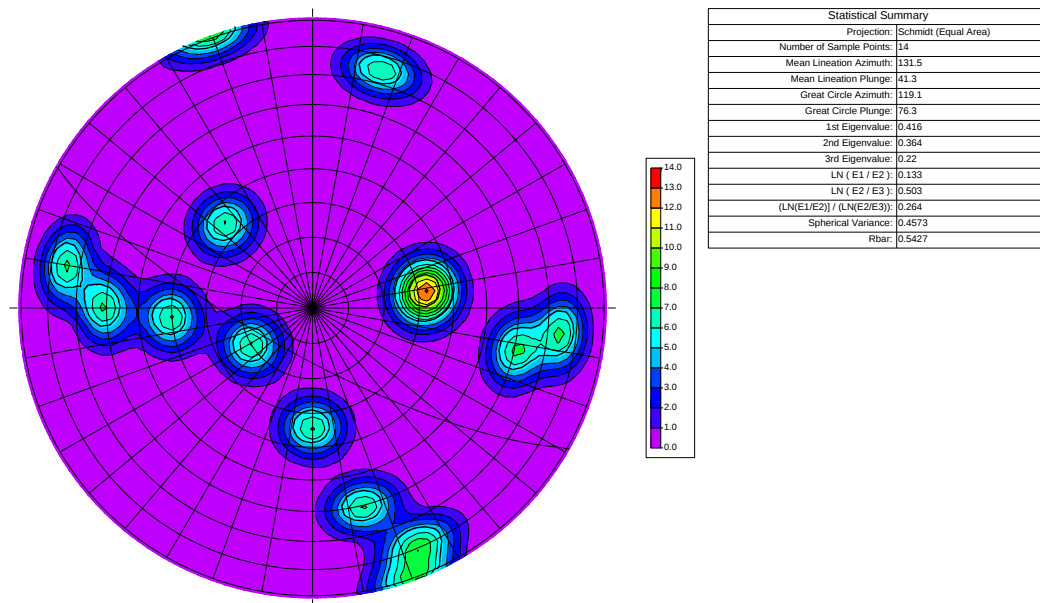


Figura 23. Diagrama polar del Afloramiento 8.

Afloramiento 13.- Se encuentra ubicado entre los puntos con coordenadas X_1 : 694756.28 X_2 : 694926.95 Y_1 : 217070.39 Y_2 : 217229.61 apareciendo en el mismo un total de 17 familias de grietas, de los cuales 5 son verticales o casi verticales. Este gran número de familias indica que el afloramiento presenta un alto grado de tectonismo aunque según indica la columna que acompaña al diagrama la frecuencia porcentual no es de las mayores del área. Los sistemas más expresados presentan ángulos de buzamiento entre 30° y 70° según los 110° - 230° para el acimut del buzamiento. El arco de círculo máximo se inclina 50° según los 160° .

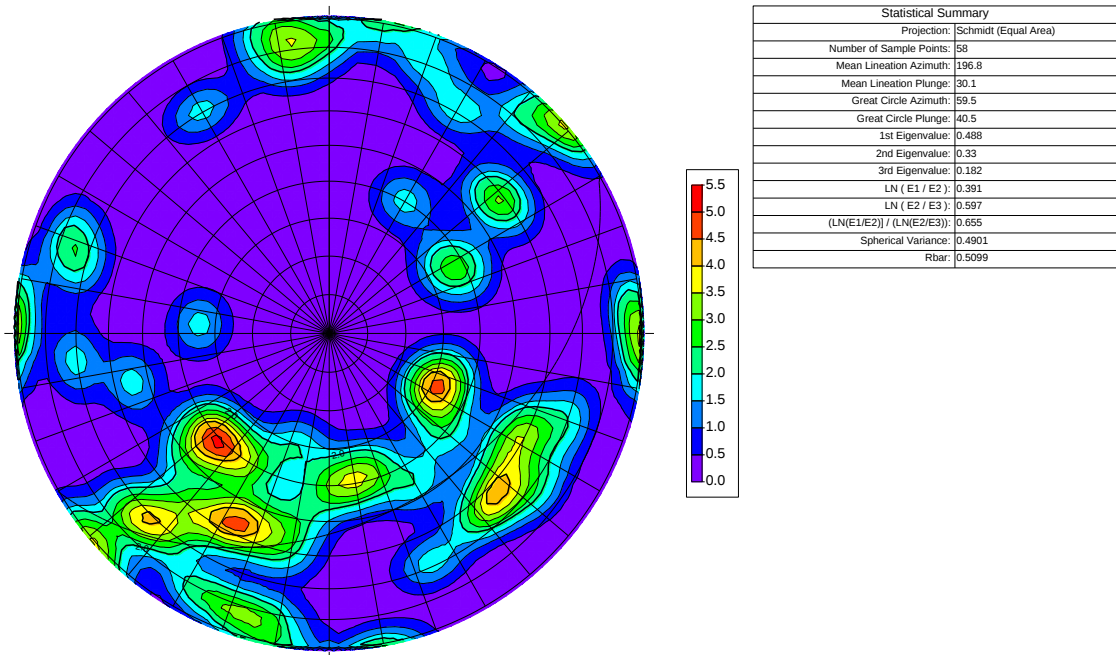


Figura 24. Diagrama polar del Afloramiento 13.

Análisis microtectónico del total de mediciones realizadas en el sector de trabajo.

Para el análisis de la microtectónica se realizaron 478 mediciones en 30 afloramientos, tomando varios puntos de medición en cada afloramiento en dependencia del tamaño del mismo, logrando de esta manera una muestra bastante representativa para la zona en su conjunto.

La simple observación del Diagrama Polar del área revela la existencia de un alto grado de agrietamiento, contenido en 20 familias con una dispersión muy alta de sus elementos de yacencia.

Se destaca la presencia de un sistema con yacencia horizontal a sub-horizontal en el sector circular comprendido entre 290° y 170° . En este sistema de forma excepcional los ángulos de buzamiento alcanzan 20° .

Los sistemas más expresados por la frecuencia del agrietamiento presentan ángulos de buzamiento entre 50° y 90° , formando en total 7 familias. El arco de círculo máximo presenta una inclinación de 35° según los 330° .

Las características anteriores son propias de las rocas serpentiniticas tectonizadas de la región nororiental de la provincia de Holguín, manifestándose en Moa en diferentes grados de alteración desde rocas duras relativamente poco agrietadas

hasta el complejo de las tectonitas en que puede alcanzarse un determinado nivel de milonitización.

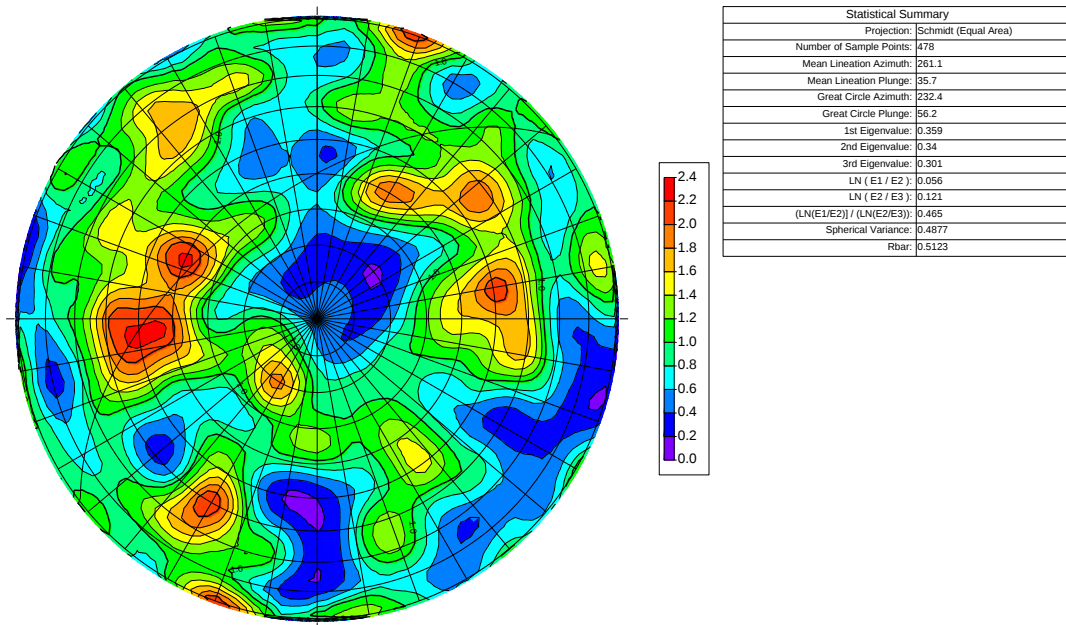


Figura 25.- Diagrama polar del área.

Paralelamente a la construcción de los diagramas polares de cada afloramiento y el general del área se construyeron los diagramas de rosetas para las direcciones de las grietas.

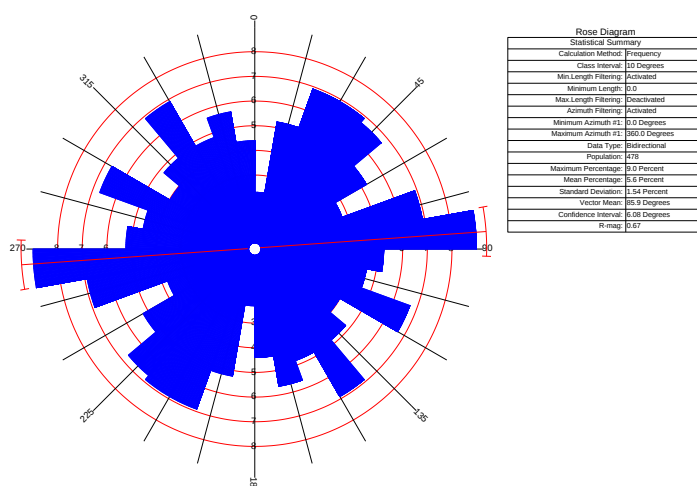


Figura 26. Rosa de direcciones del agrietamiento en el área.

Las máximas direcciones del agrietamiento en el área aparecen al NE y NW como es común en la tectónica cubana, con un máximo en la frecuencia hacia los 85° (E-NE).

Análisis de conveniencia por litología. Anexo No 1.

Para la conveniencia litológica se establecieron los umbrales con los valores que acompañan a la tabla presentando el mayor peso las rocas con un mayor grado de conservación y menos alteradas desde el punto de vista tectónico, aunque este factor incide fuertemente en todas las secuencias rocosas existentes en el área.

1	Basaltos	7
2	Diques de diabasas	6
3	Gabros	5
7	Peridotita serpentizada	4
6	Serp. Medianamente agrietada	3
5	Serp muy agrietada	2
4	Sedimentos	1

 $R_1=2.5$ $R_2=1.5$

Tabla 8. Secuencias rocosas en el área de estudio.

En sentido general toda la zona presenta un comportamiento de regular a bueno, aunque la zona de la concesión de Ferroníquel Minera SA, presenta en sentido general un comportamiento regular. Los cauces de los ríos presentan valores malos debido a que dentro de los tipos litológicos se considera a los aluviones del cauce. La zona central de contacto con un carácter rectilíneo puede indicar una zona de fractura a investigar en la próxima etapa.

Análisis de conveniencia por la profundidad del nivel freático. Anexo 2.

En este caso se tomaron como umbrales de conveniencia $R_1 = 5$ y $R_2 = 2.5$, sobre la base de criterios ingeniero - geológicos establecidos en la literatura especializada.

La observación de este mapa indica que la zona de trabajo tiene un buen comportamiento para esta variable estando sólo afectada en los cauces de los principales cursos fluviales existentes. El nivel freático tiene una enorme importancia en obras de este tipo.

Análisis de conveniencia para Q de Barton. Anexo No 3.

La Q de Barton define la calidad del macizo rocoso, interviniendo en la misma una cantidad grande de otras variables, como son la densidad de fracturas y la cantidad de familias. Casi todas estas se determinan de forma automatizada o por vía empírica dependiendo de la experiencia de los especialistas y del conocimiento geológico del territorio.

Se tomaron como ponderales o umbrales de conveniencia, $R_1 = 10$ y $R_2 = 4$, observándose que el sector estudiado tiene como regla un comportamiento regular y excepcionalmente en dos pequeñas áreas este comportamiento es bueno.

Hay que señalar que el elemento que más influye en esta variable es la densidad de la fracturación que para todo el territorio tiene valores muy altos.

Análisis de la conveniencia por deslizamientos. Anexo 4.

La zona de trabajo tiene una alta susceptibilidad a los deslizamientos debido a las características de las rocas, las pendientes y el alto grado de fracturación de las mismas, al mismo tiempo la existencia de fuertes taludes asociados al cañón del río Moa. El procesamiento estadístico realizado al mapa de deslizamientos permitió establecer los valores $R_1 = 3.1$ y $R_2 = 9.9$, considerando estos valores como los extremos.

El análisis del mapa de deslizamientos refleja con toda claridad todas las áreas con alta susceptibilidad a deslizarse. En sentido general la zona de la concesión a Ferroníquel tiene conveniencia de regular a mala y los mejores sectores se presentan sobre los gabros debido a la calidad de la roca y por encontrarse en los niveles hipsométricos más bajos.

Las partes cercanas a la presa Nuevo Mundo también presentan elevada susceptibilidad a los deslizamientos.

Análisis de conveniencia por excavabilidad. Anexo 5.

La excavabilidad permite definir la mejor manera de realizar los laboreos a los distintos tipos litológicos en la medida en que se desarrollan los trabajos de excavación o destape. En la tabla 8 se muestran los parámetros que definen la excavabilidad y los valores correspondientes a cada uno de ellos.

Id Fm	Litología	Dureza		Homogeneidad (2)	Intercalaciones R/M de alta dureza (3)	Índice de excavabilidad
		FKP	Índice (1)			
4	Sedimento	0.1	1.0	1	1	8.0
5	Serpentinita Muy agrietada	2.0	2.3	5	4	7.3
6	Serpentinita medianamente agrietada	4.1	3.7	6	5	6.6
7	Peridotita Serpentinizada	6.5	5.4	7	6	5.7
3	Gabros	9.8	7.7	9	8	4.5
2	Diques de diabasas	11.6	8.9	10	10	3.5
1	Basaltos	13.2	10.0	10	10	3.0

Tabla 9.-

$R_1 = 6.1$

$R_2 = 5.1$

Los valores escogidos siguen la experiencia acumulada en zonas de desarrollo de serpentinitas.

En el mapa se puede apreciar con bastante claridad que la zona de construcción de la planta presenta condiciones favorables de acuerdo a esta variable, lo cual garantiza rapidez y eficiencia en los trabajos de laboreo. Los sectores menos favorables están fuera de los límites y se relacionan con las secuencias máficas del complejo ofiolítico.

Análisis de la conveniencia por densidad de fracturación. Anexo No 6.

Como se ha indicado anteriormente la zona de estudio presenta valores muy altos para la densidad de fracturación siendo la parte más afectada la que corresponde a la concesión de Ferroníquel. El detalle más importante es que los mayores valores de densidad (m/Km^2), siguen una especie de orientación al NE, siguiendo la dirección aproximada de la falla Moa, lo cual debe ser un elemento a tener en cuenta en los trabajos de detalle para la construcción por la cercanía de esta disyunción a la zona estudiada y los efectos indeseables que puede traer.

Se establecieron como umbrales de los valores $R_1 = 109.4$ $R_2 = 149.1$, por métodos estadísticos sobre el histograma de la fracturación obtenida por vía automatizada. Hay que considerar que la fracturación es un elemento desencadenante de otros

procesos geológicos que pueden tener consecuencias perjudiciales al entorno natural o constructivo.

Análisis de la conveniencia por pendiente. Anexo No 7.

El cuadro geomorfológico del sector estudiado presenta valores contrastantes para esta variable, desde áreas muy llanas hacia el SW y NW hasta paredones muy abruptos a lo largo del cauce del río Moa y los taludes de la presa Nuevo Mundo.

Es un elemento que juega un papel relevante en la ocurrencia de fenómenos tales como los movimientos descendentes de suelos y rocas hasta los procesos erosivos acrecentados en épocas de escorrentía.

En la zona la pendiente debe ser tenida en cuenta pues la construcción de la planta precisa de importantes movimientos de tierra para la explanación.

Se tomaron como $R_1 = 4$ $R_2 = 8$ sobre la base de criterios de expertos y considerando las características del relieve en la región debiendo evitarse en lo posible las pendiente mayores a 8° .

Análisis de la síntesis ingeniero – geológica. Anexo No 8.

A partir de la información obtenida del análisis de cada variable por separado y la influencia que juega cada una de ellas en particular se procedió a la síntesis de las mismas, como se muestra en la matriz triangular de Fuller.

Nº	Variable	1	2	3	4	5	6	7	Peso
1	Litología	x	•	•	•	•	•	•	7
2	Profundidad del Nivel freático		x	•	•	•	•	•	6
3	Q de Barton			x	•	•	•	•	5
4	Deslizamiento				x	•	•	•	4
5	Excavabilidad					x	•	•	3
6	Densidad de fracturas						x	•	2
7	Pendiente							x	1

Matriz triangular de Fuller

Las variables con sus pesos así obtenidos se procesan para su síntesis con un sistema automatizado que garantiza la confiabilidad de los resultados y que han sido validados en diferentes condiciones geológicas y obras ingenieras.

El mapa sintético para todas las variables muestra una tendencia de buena a regular para toda la zona estudiada con muy pocos lugares donde la tendencia sea mala. No obstante hay que aclarar que las variables consideradas con bajo peso (deslizamientos, pendientes y densidad de fracturas) individualmente pueden tener una influencia local importante por lo que deben ser validadas y precisadas en la etapa de detalle y proyección de las obras consideradas.

CONCLUSIONES

- En el área de estudio se detectaron para la etapa de ingeniería básica, con el complejo de métodos empleados, la presencia de cuatro capas ingeniero – geológicas:
 - Capa I.-Serpentinita muy agrietada
 - Capa II.- Serpentinita medianamente agrietada
 - Capa III.- Serpentinita más conservada
 - Capa IV.- Peridotita Serpentinizada
- Las capas de mejores condiciones ingeniero geológica para la cimentación de los objetos de obras de la Planta Ferroníquel Minara SA son las capas III y IV.
- Los procesos físico geológicos de mayor presencia, intensidad y magnitud son la meteorización, la erosión y los deslizamientos.
- Sobre la base del pronóstico de deslizamiento empleado se determinaron las zonas de mayor peligro a la ocurrencia de este fenómeno. En el área de estudio se presentan zonas de peligrosidad de categoría alta a media.
- Para el análisis de la síntesis ingeniero – geológica las variables empleadas fueron:
 - Litología
 - Nivel del manto freático
 - Q de Barton
 - Deslizamientos
 - Excavabilidad
 - Densidad de fracturas
 - Pendiente
- El área de estudio presenta conveniencia de regular a buena para la construcción de la planta Ferroníquel Minera SA.

RECOMENDACIONES

- Cimentar preferentemente sobre roca, en caso necesario, donde la potencia de suelo tenga grandes espesores, podría cimentarse sobre el mismo teniendo en cuenta los parámetros más desfavorables, por la cierta heterogeneidad que estos presentan, aunque preferentemente es más favorable utilizar el material de préstamo que se desplantará en algunas de las áreas a construir.
- Se recomienda que se efectúe un análisis de la estabilidad de los taludes teniendo en cuenta el factor de seguridad dinámico mediante la introducción de un acelerograma, correspondiente a un evento sísmico como el que pudiera esperarse en la zona. Este análisis permitiría tener una idea del valor del factor de seguridad y su variación en el tiempo de acuerdo con la duración y características del sismo de diseño.
- En caso de necesidad de abasto de agua subterránea a instalaciones temporales u otras de pequeñas demandas existe posibilidad de explotación de pozos con caudales pequeños, en los lugares señalados en el informe, pero para comprobar los posibles caudales de explotación se recomienda realizar bombeos experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

- Adamovich A. y V. Chejovich. 1964. Principales características de la geología y minerales útiles de la región norte de la provincia de oriente. *Revista Tecnológica*. 2:14-20.
- Almaguer-Carmenates, Y. 2005. Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el Yacimiento Punta Gorda. R. Guardado. Tesis de Doctorado. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 108 p.
- Batista Rodríguez. 2007. Falla Moa: caracterización geodinámica y riesgos tectónicos asociados. *Minería y Geología* [en línea]. [Consultado 20100310], 23 (2). Disponible en: <http://intranet.ismm.edu.cu/sites/revistamg/v23-n2-2007/art3-2-2007.pdf>
- Blanco, J y J. Proenza. 1993. Terrenos tectono-estratigráficos en Cuba Oriental. *Revista Minería y Geología*, 3.
- Cartaya Pire, M.; Blanco Torrens R. 2003. Caracterización geomecánica de los macizos rocosos. En: GEOMIN: V Congreso Cubano de Geología y Minería. [Cd-rom]. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Cobiella, J.L. 1978. Estratigrafía y paleogeografía del Paleógeno de Cuba oriental. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Tesis doctoral) 210 p.
- Cordovez J, M 2004 Procesamiento de imágenes aerocósmicas con el empleo de un nuevo modelo físico matemático de los coeficientes de reflexión. Tesis Doctoral, GEOCUBA IC 2004
- Colectivo de autores IGP 1997. Estudios sobre Geología de Cuba.
- De Miguel F. C. (1999). Hidrogeología Aplicada. Edit. Félix Varela, La Habana.
- De Miguel F. C. (2005). Regionalización hidrogeológica de la provincia Holguín. *Revista Minería y Geología*. Volumen 21, No. 3. Año 2005. ISBN: 0258 – 5979.

De Miguel F. C. (2009). Argumentación, cálculos, efecto económico y ambiental de drenaje en lateritas. IX Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica, C.D. Rom ISBN: 978-959-247-069-9, Villa Clara.

Guardado Lacaba, R.; Y Almaguer Carmenates. 2003. Rocas y suelos como indicadores ingeniero geológicos y ambientales de estabilidad y sostenibilidad de taludes y laderas. En: GEOMIN: V Congreso Cubano de Geología y Minería. [Cd-rom]. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.

González De Vallejo L et al 2003. Ingeniería geológica. Madrid .España

Hoja Cartográfica Moa, No. 5277 - IV, del Mapa de la República de Cuba Escala 1: 50 000 Edición ICGC, 1981. Reimpreso en 1985.

Iturralde-Vinent, M. A. 1996. Geología de las ofiolitas de Cuba. En: Iturralde-Vinent, M. (ed.). Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. IGCP project 364. Special contribution n.1, p. 83-120.

Medina Alba Maydonys. Caracterización Geomecánica de la entrada del túnel Moa-Trasbase. Msc. José Carmenate Fernández Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Julio de 2009. 12-25.

Norma cubana, XXX: 2007. Cuban National Bureau of Standards. 1ra. Edición: Vedado, Ciudad de La Habana.

Rodríguez Infante, A.; N.M. Carralero Castro; M. Conde Rodríguez. 2000. Estudio de las estructuras sismogeneradoras Quesigua y El Medio, al este de la Ciudad de Moa. *Minería y Geología*. [En línea]. [Consultado 20100310], 27 (3-4). Disponible en: http://intranet.ismm.edu.cu/sites/revistamg/v17-n3_4-2000/art13-3_4-2000.pdf

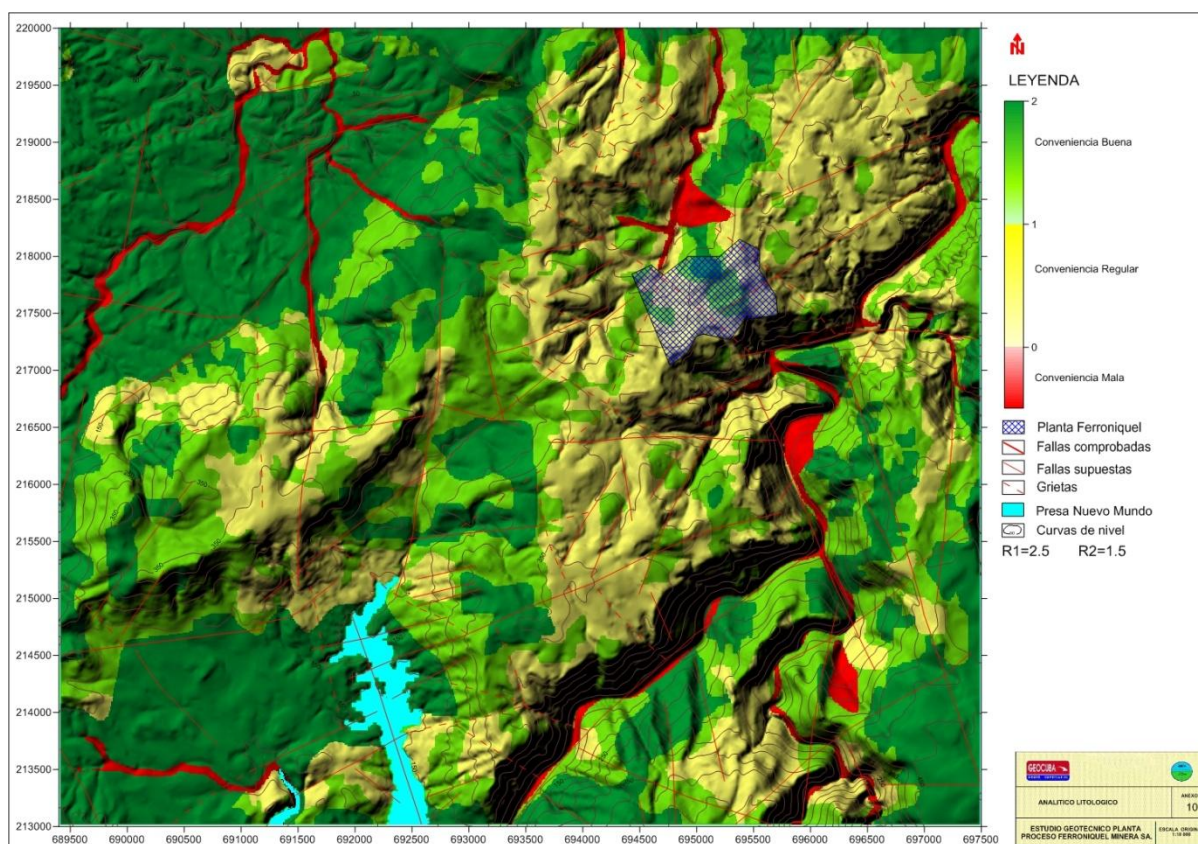
Rodríguez I, A 1999. Estudio geomorfológico y morfotectónico del municipio de Moa y áreas adyacentes. Tesis Doctoral, ISMM de Moa.

Rodríguez A., 1991: "Manual de Geomorfología",

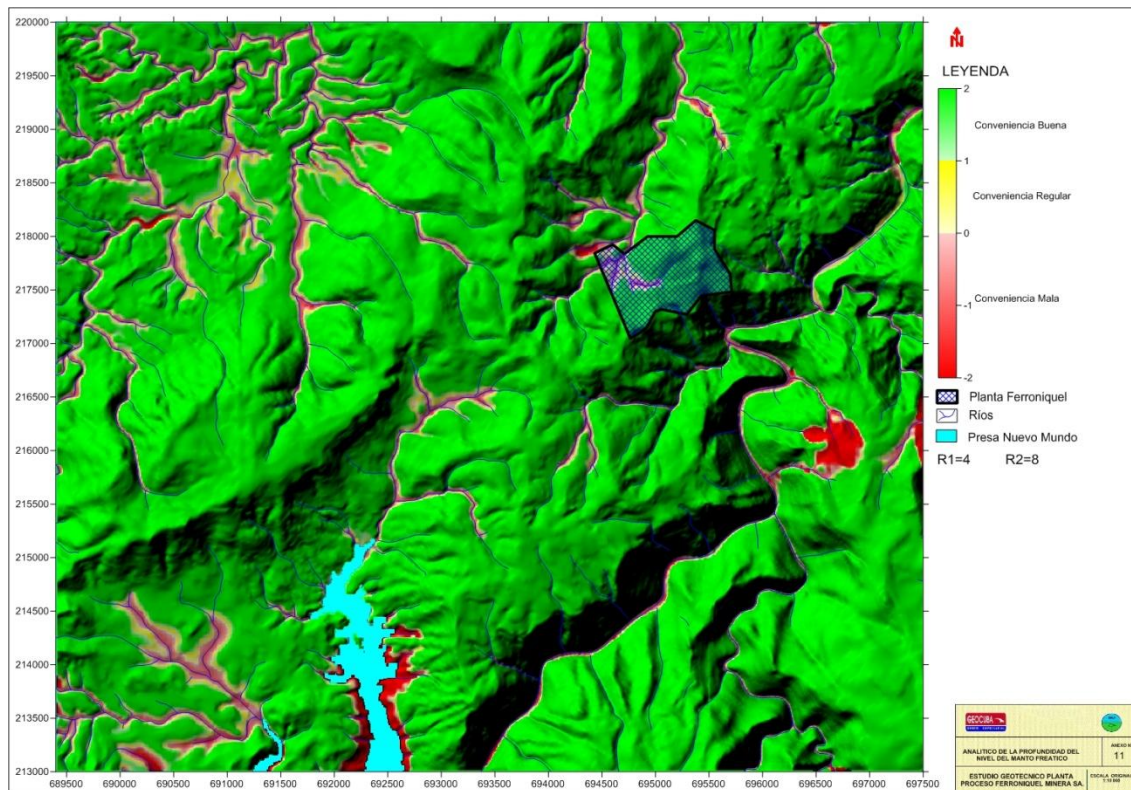
Plótnikov N. I. Y Colectivo de Autores. (1972) Guía metodológica para investigaciones ingeniero – geológicas e hidrogeológicas para la construcción de obras con fines de mejoramiento de territorios, Edición III, Edit. VCEGINGEO-SOYUZVODPROEKT Moscú.

Quintas F 1989. Análisis estratigráfico y paleogeografía del Cretácico Superior y del Paleógeno de la provincia Guantánamo y áreas cercanas. Tesis doctoral, Departamento de Geología, I.S.M.M., 1989.

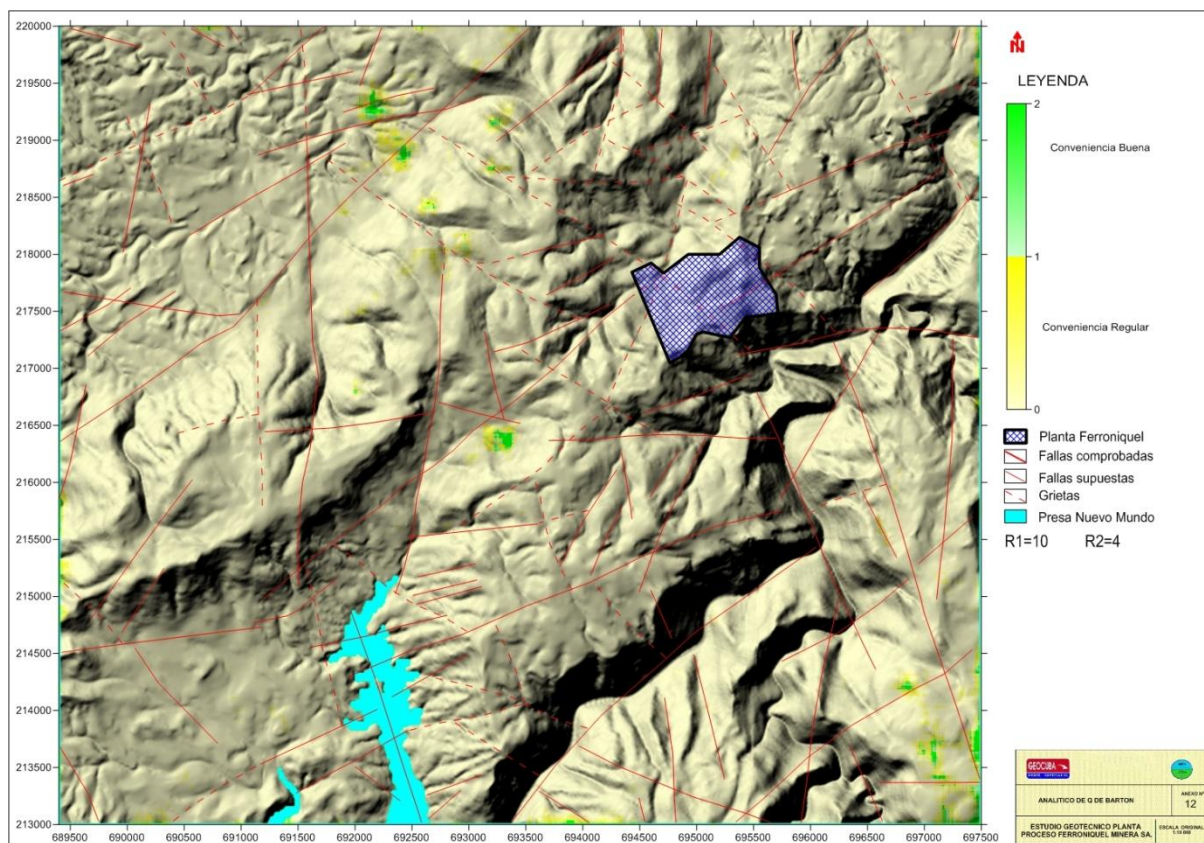
ANEXOS:



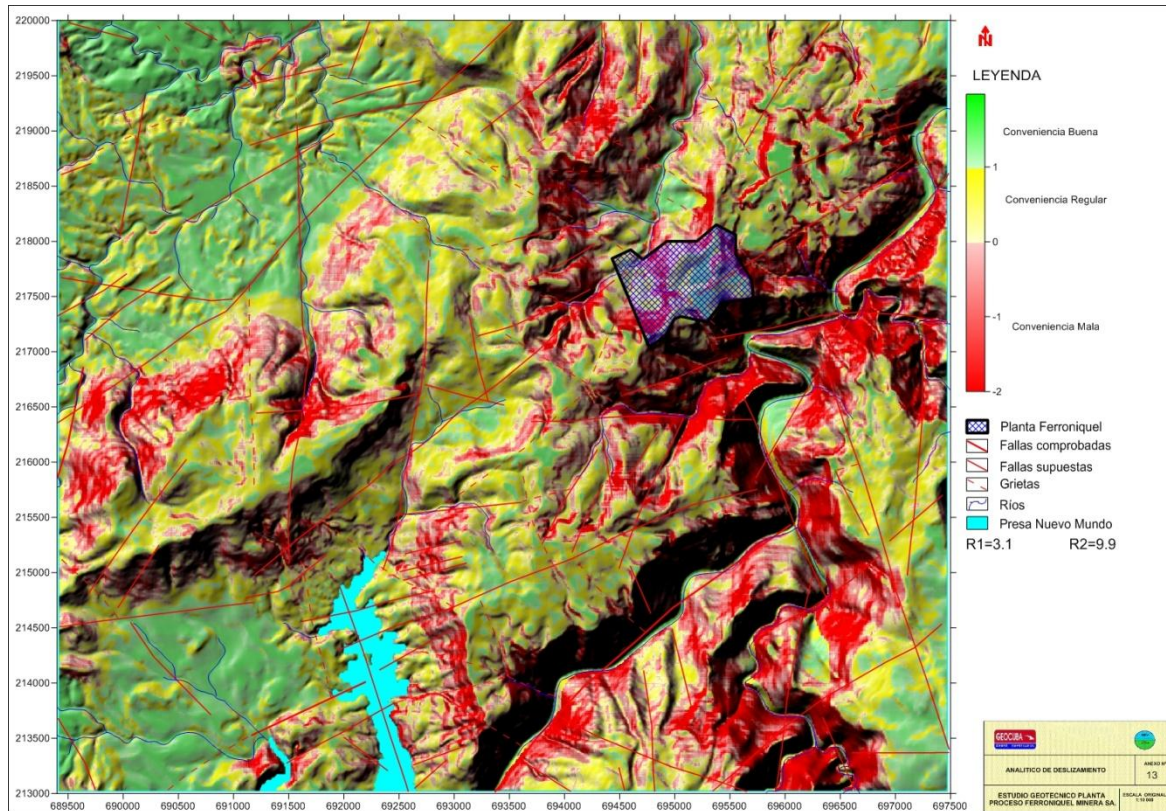
Anexo 1. Análisis de conveniencia por litología.



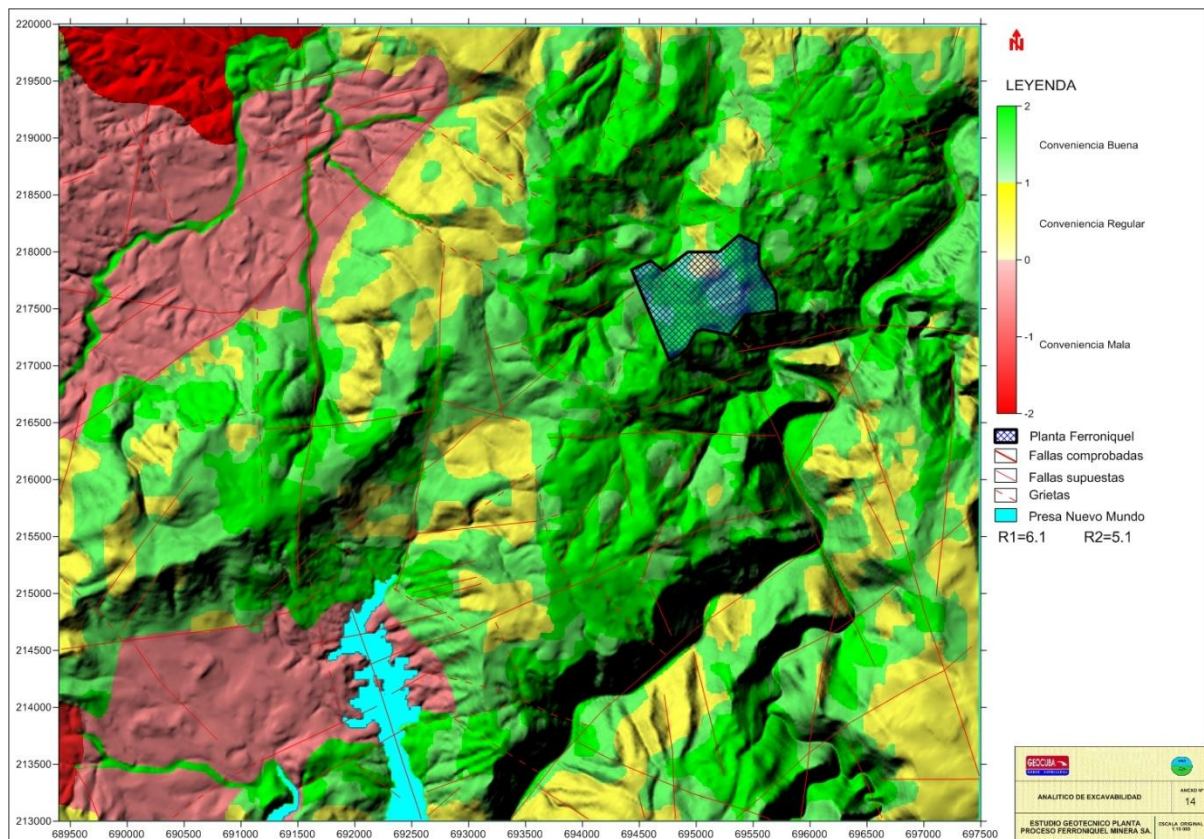
Anexo 2. Análisis de conveniencia por la profundidad del nivel freático.



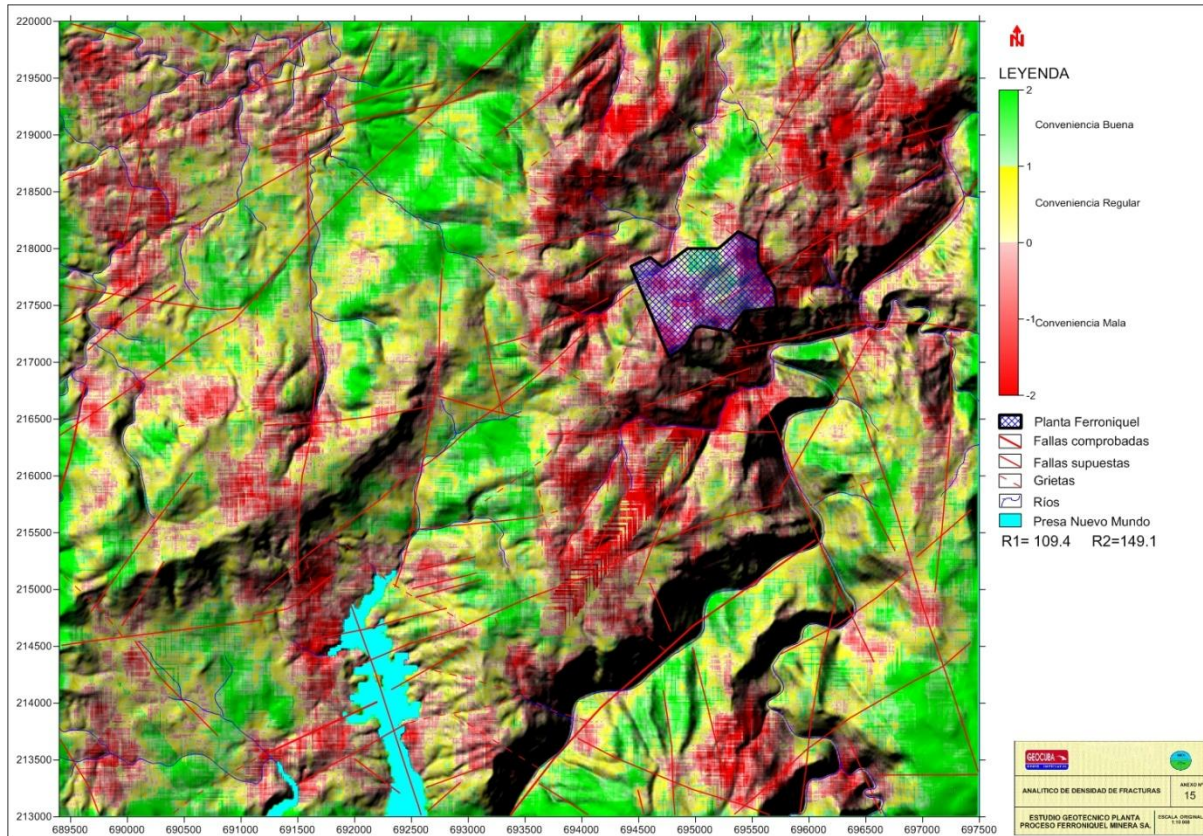
Anexo 3. Análisis de conveniencia para Q de Barton.



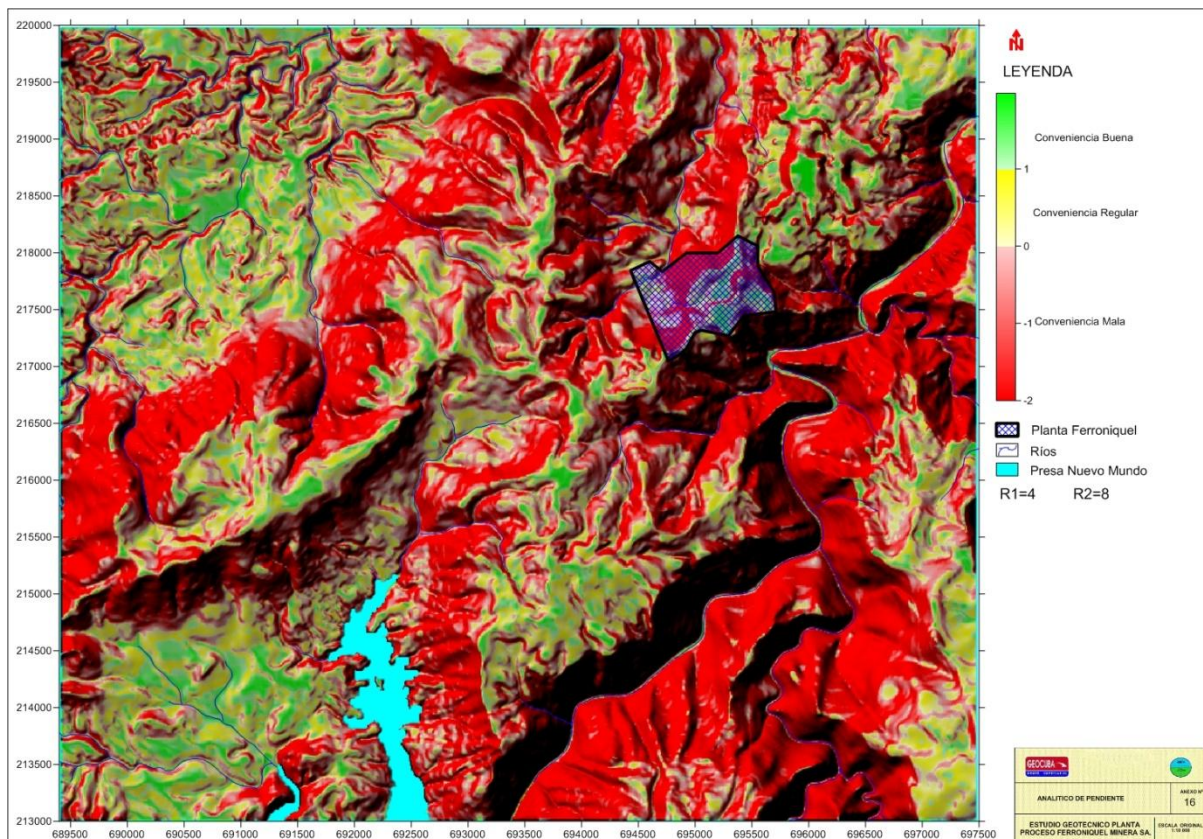
Anexo No 4. Análisis de la conveniencia por deslizamientos.



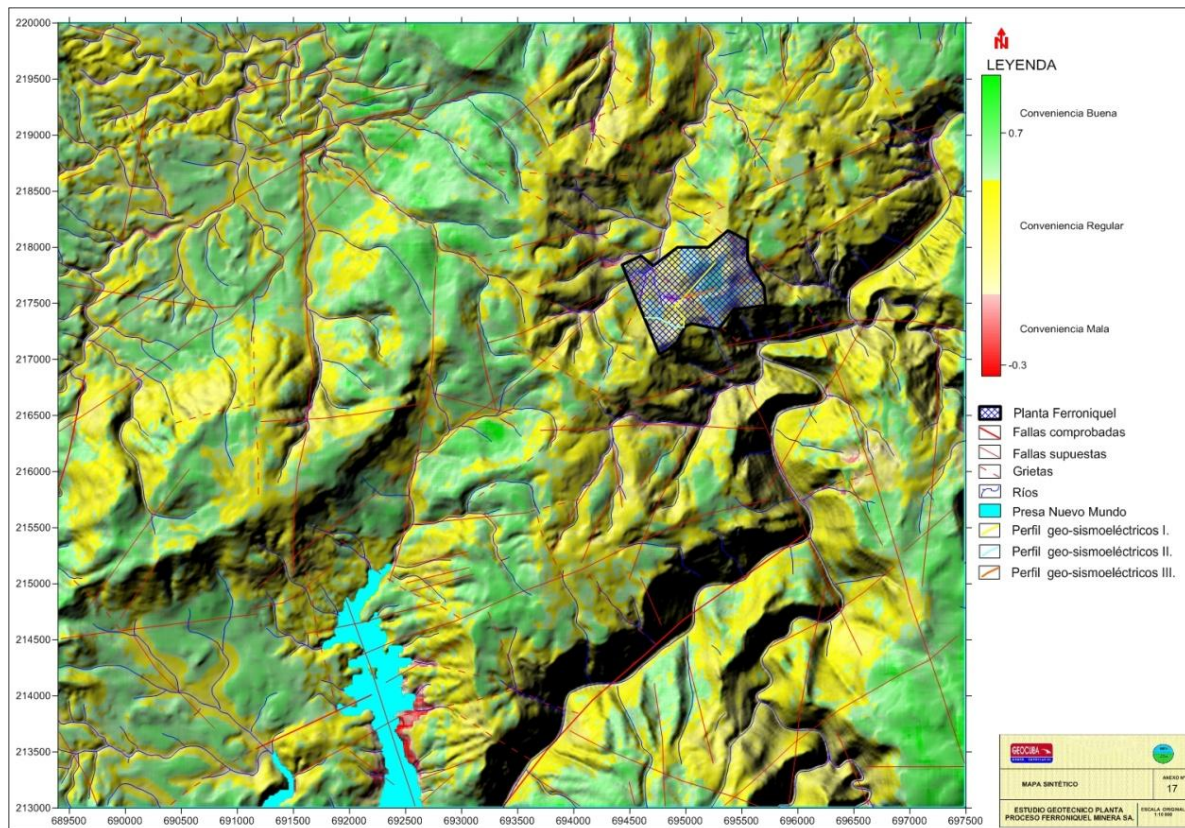
Anexo No 5. Análisis de conveniencia por Excavabilidad.



Anexo No 6. Análisis de la conveniencia por densidad de fracturación.



Anexo No 7. Análisis de la conveniencia por pendiente.



Anexo No 8. Análisis de la síntesis ingeniero – geológica.