



Trabajo de Diploma

En opción al Título de

Ingeniero Geólogo

**Modelo Geométrico Litológico del
yacimiento Yagrumaje Oeste.**

Autor: Freddy Esmel Pérez Cisnero.

Tutor: Ing. Alfredo Yordanis Johnson Santiago.

Ing. Yurisley Valdés Mariño.

Agradecimientos:

Agradezco a todas aquellas personas que de una forma u otra dieron su aporte para la realización del trabajo de diploma, al igual que las que tuvieron y ya no están pero que contribuyeron a mi formación como Ingeniero Geólogo.

Un agradecimiento especial a Dios y a todos los Santos por permitir cumplir con mis objetivos.

A toda mi familia y seres queridos por estar ahí en cada momento, en especial a mis abuelos, a mi madre, a mi padrastro, a mi padre, hermanos, novia y a mi suegra por toda la ayuda incondicional que he recibido de ellos.

A mis tutores Alfredo Yordanis Johnson Santiago y Yurisley Valdés Mariño que sin su ayuda y dedicación esto no hubiese sido posible.

A todos mis compañeros de grupo, en especial a Yeisel Mario y a Perera, gracias por el tiempo empleado en mí.

Al colectivo de profesores de la Facultad de Geología por transmitirme todos sus conocimientos y hacer de mí una persona más preparada e integral.

Dedicatoria:

Dedico este trabajo a todas las personas que de alguna forma han contribuido a la realización de este trabajo.

Una dedicación especial a mis abuelas y a mi madre que han estado en cada momento apoyándome y ayudándome toda la vida.

A mi tutor Alfredo Yordanis Johnson Santiago que si no fuera por el este trabajo no se hubiese realizado.

Pensamiento:

La ciencia se compone de errores, que a su vez, son los pasos hacia la verdad.

Julio Verne.

El que lee mucho y anda mucho, ve mucho y sabe mucho.

Miguel de Cervantes.

*El único sentimiento más grande que el amor a la libertad es el odio por aquel
que nos las niega*

Ernesto Che Guevara.

*Se fuerte para que nadie te derrote, se noble para que nadie te humille, se
humilde para que nadie te ofenda y sigue siendo tú, para que nadie te olvide*

Resumen :

La presente investigación responde a la necesidad de validar el modelo tecnológico existente con el modelo litológico a desarrollar, para su confección se tuvieron en cuenta cuatro etapas: preliminar, trabajos de campo, laboratorio y gabinete, en las cuales se hizo el procesamiento de la información y desarrollo del trabajo. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos sobre la base de las observaciones y documentación geológica de muchos afloramientos, incluyendo cortes patrones y pozos básicos que el geólogo de campo documentó, avanzados por redes de diferentes densidades (23.23×23.23 y 33.33×33.33), así como del estudio detallado de las paredes de los pozos criollos.

Se utilizaron los resultados de los análisis químicos, mineralógicos, granulométricos, de propiedades físicas (pesos volumétricos, humedad natural, etc.) para la creación del modelo litológico. Para dar cumplimiento con el objetivo de la investigación se creó con toda la información la Base de Datos utilizada por las diferentes herramientas computacionales relacionadas con la rama de la Geología y la Informática (Surfer11, Microsoft Office, Gemcom V-6.3) entre otros, utilizados para la confección de los diferentes mapas, gráficos, modelos topográficos (inicial y actual) del terreno en 3D, entre otros. Finalmente se logra la confección del modelo litológico y con él la validación del modelo tecnológico dando como resultado una desviación de 0.48 % en el volumen estimado.

Abstract:

Índice.

Introducción:	1
Capítulo I Caracterización del Objeto de Estudio	4
1.1. Ubicación geográfica del área de estudio	4
1.2. Accesibilidad	5
1.3. Relieve	5
1.4. Clima	5
1.5. Características Socio Económicas.....	6
1.6. Características geológicas del territorio.	7
1.6.1. Complejo de rocas ultrabásicas	9
1.6.2. Complejo vulcano-sedimentario	9
1.6.3. Principales Sistemas de Fallas del Territorio.	11
1.7. Geología regional.....	13
1.8. Geología del yacimiento local.	13
1.8.1. Hidrogeología.....	14
1.8.2. Rocas Encajantes	14
1.8.3. Rocas Mineralizadas	16
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	18
2.1. Introducción.....	18
2.2. Antecedentes históricos de la modelación y otras concepciones.	18
2.3. El origen del modelo geológico clásico.	20
2.4. Antecedentes Internacionales.	20
2.5. Antecedentes Nacionales.....	21
2.6. La definición de modelo de yacimiento mineral	21
2.7. El modelo geológico y partes que lo integran.	25
2.7.1. El modelo geólogo – genético.	26
2.7.2. Modelo geométrico.....	27
2.7.3. Modelo matemático.	29
2.8. La geoestadística como herramienta para la caracterización y modelamiento de un yacimiento. 31	
2.9. Kriging Ordinario	35
2.10. Las variables regionalizadas (VR).....	36
2.11. Metodología de la investigación	37
2.11.1. Preliminar	38
2.11.2. Trabajos de Campo	39
2.11.3. Resultados del estudio petrográfico del yacimiento Yagrumaje Oeste.	39
2.11.4. Trabajos topográficos.....	41
2.11.5. Trabajos Geofísicos	41
2.11.6. Metodología de los trabajos de campo.....	42
2.11.7. Trabajos de perforación	43
2.11.8. Toma de las muestras	43
2.11.9. Procesamiento de la información	43
CAPÍTULO III. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	45
3.1. Estructura y morfología del yacimiento.	45
1.9. Potencia, estructura y morfología.....	45
3.2. Características litológicas del Yacimiento.	46

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

3.3.	Características de las menas en el Yacimiento Yagrumaje Oeste.....	47
3.3.1.	Mena Laterítica de Balance (LB).....	47
3.3.2.	Mena serpentinitica de balance (SB)	49
3.3.3.	Mena laterítica fuera de balance (LF).....	50
3.4.	Clasificación y características generales de los diferentes horizontes litológicos.....	51
3.4.1.	Ocre estructural inicial (OEI).	51
3.4.2.	Ocre estructural final (OEF).....	51
3.4.3.	Ocre inestructurales sin concreciones de hierro (OI).	52
3.4.4.	Ocre inestructurales con concreciones de hierro (OICP).	52
3.4.5.	Análisis de las pendientes	54
3.5.	Características de los parámetros, potencias y contenidos dentro del modelo.	56
3.6.	Análisis de los modelos.....	60
	Conclusiones	70
	Recomendaciones	71
	Bibliografía	72

Introducción:

La modelación de yacimientos minerales es una concepción nueva, lo cual enfoca todo lo relacionado con el desarrollo de un proyecto minero de forma integral, su alcance va desde el reconocimiento geológico hasta el cierre de la mina, aunque su máximo desarrollo se alcanza durante la exploración detallada y la explotación del yacimiento. Se basa en el análisis de la información geológica disponible, para determinar la necesidad de adquirir más información (durante la exploración), especificando donde, como y cuanto, además permite generar nueva información a partir del análisis integral de un mínimo de información existente, empleando para ello las técnicas de análisis más eficientes.

Durante la explotación permite realizar una minería más económica, eficiente y sostenible basada en el conocimiento amplio geológico del yacimiento, integrado al conocimiento técnico.

De forma indirecta la modelación brinda una herramienta para disminuir los costos y aumentar la calidad de la minería a través de decisiones óptimas en función del conocimiento geológico; pero, como parte de la modelación también existen herramientas diseñadas para realizar la modelación económica del yacimiento en este caso la decisión puede tener carácter económico, encaminado al aumento de la rentabilidad, carácter geológico, dirigido al aumento de la calidad de las menas o puede tener carácter mixto encaminado a hacer más sostenible la minería; Estas decisiones pueden ser a corto, mediano y largo plazo.

En Julio del 2013 Moa Nickel SA procedió a realizar la actualización de los estimados de recursos en el yacimiento Yagrumaje Oeste, por lo que se requiere de un modelo geométrico litológico que defina por tipo litológico con el menor grado de incertidumbre cada uno de los estratos existentes en este yacimiento, siguiendo los resultados de los logins documentados por los geólogos en el campo. Con los resultados obtenidos se validará el modelo matemático ya creado desde un modelo tecnológico, así como los métodos de estimación empleados para cada tipo de mena. **Se realizará un informe presentando los resultados del material limonítico y saprolítico existente en el yacimiento**, basados en los análisis de los diferentes datos de la campaña de exploración realizada en el yacimiento.

Problema:

Necesidad de crear un modelo geométrico litológico que defina por tipo litológico los diferentes tipos de litologías presentes en el yacimiento Yagrumaje Oeste.

Objeto de estudio:

Yacimiento niquelífero Yagrumaje Oeste.

Objetivo general:

Modelamiento geométrico litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste para la validación del modelo matemático.

Objetivos específicos:

- Caracterización de las menas en el Yacimiento Yagrumaje Oeste
- Elaboración del modelo litológico.
- Validación del modelo matemático.

Hipótesis:

Si se obtiene el modelo litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste con el menor grado de incertidumbre, se podría validar los resultados del modelo de bloques existente y se determinaría en cada frente de minería con mayor precisión los diversos tipos de litológicos, de modo que se optimizaría la extracción mineral.

Resultados esperados:

En el yacimiento se ha creado anteriormente el modelo geológico de forma parcial, hasta hoy no se han modelado los diferentes estratos litológico, por lo que se requiere de un modelo geométrico completo de todo el yacimiento Yagrumaje Oeste, de modo que se valide con el menor grado de incertidumbre los recursos existentes, utilizando los resultados de las exploraciones geológicas en correspondencia con la Ley de Minas y su reglamento para Cuba y la declaración de proyectos minerales de Canadá, aplicando los criterios incluidos dentro del convenio del decreto Ley 385 para la estimación de recursos validando el modelo geométrico litológico respecto al modelo ya existente para este yacimiento.

Métodos:

Se debe tener presente los siguientes métodos para la creación del modelo geométrico litológico.

- Continuidad geológica.
- Densidad de la red de exploración (grado de estudio).
- Interpolación contra extrapolación.
- Consideraciones tecnológicas.

Capítulo I Caracterización del Objeto de Estudio

1.1. Ubicación geográfica del área de estudio

La región comprendida en la que se realizan los trabajos se muestra en la siguiente tabla la cual se encuentra localizada entre los vértices de coordenadas nacionales siguientes a escala 1: 50 000.

Tabla N° 1. Coordenadas del área de estudio.

Vértices	Norte	Este		Vértices	Norte	Este
01	701046	218034		07	701900	218034
02	701273	218034		08	702074	218034
03	701273	218234		09	702074	218341
04	701273	218234		10	703783	218341
05	701393	218555		11	703770	218407
06	701900	218555		12	704251	218407



Figura No.1. Ubicación geográfica del área de estudio.

El yacimiento Yagrumaje Oeste, ubicado aproximadamente a 8 km del pueblo de Moa, ocupa un área efectiva de 3.8 Km². Está limitado al Norte por el río Yagrumaje el cual separa el

yacimiento en dos partes, al Sur por la línea convencional que lo separa del yacimiento Camarioca Este, al Oeste por el río Los Lirios y al Este por el río Punta Gorda.

1.2. Accesibilidad

El acceso vía terrestre desde la provincia de Holguín hasta el municipio de Moa es a través de carretera, además está la carretera que comunica el municipio de Moa con el municipio de Baracoa provincia de Guantánamo.

El yacimiento, a su vez, presenta diferentes caminos temporales realizados durante las labores de exploración y explotación que comunican hacia las áreas de interés. El acceso hasta la planta de Preparación de pulpa de Moa Nickel SA será a través del camino principal que da acceso a los yacimientos Moa Oriental y Camarioca Norte.

1.3. Relieve

El relieve es típicamente montañoso, constituido por colinas elevadas y pequeñas, cuyas alturas oscilan entre 600 y 800 m sobre el nivel del mar. La mayor elevación es el alto de La Calinga con 1 100 m sobre el nivel del mar. El sistema orográfico tiene dirección preponderante E – W y NE – SW, direcciones que se mantienen con un paralelismo bastante marcado con el eje longitudinal de la Isla.

1.4. Clima

La región de estudio se caracteriza por condiciones climáticas propias de un clima tropical lluvioso, muy húmedo y con precipitaciones mayores a los 1000 mm/año. Las particularidades de la orografía y por ende de su relieve inciden en buena medida en las características climatológicas de la región, además de la latitud geográfica - latitud: 20° Norte -. La conjugación del relieve y su alineación entre el Este y el Noreste con la dirección de los vientos alisios procedentes del océano Atlántico ocasionan que el aire cargado de humedad es frenado por el sistema montañoso, originando las intensas precipitaciones que se producen en la mayor parte del año.

La época de mayor volumen de las precipitaciones se producen desde septiembre hasta marzo, - época lluviosa -, coincide con la temporada invernal y de abril a agosto, - época de seca - que coincide con la primavera y el verano. En el resto del país, como puede valorarse,

el régimen de precipitaciones está invertido en comparación con el régimen de lluvias existentes en la región de Moa - Baracoa.

Las variaciones de las temperaturas son pequeñas en sentido general, manifestándose temperaturas cálidas, - próximas a los 28°C - 30°C -, en los meses de verano, en cambio, las temperaturas mínimas se presentan en la temporada invernal, siendo enero y febrero los meses más fríos motivado por el arribo de los frentes fríos provenientes del continente. Es una peculiaridad de las condiciones climatológicas del territorio que los frentes fríos se mantengan frecuentemente estacionarios, ocasionando los valores altos de precipitaciones durante la temporada invernal.

La conjugación de la composición máfica y ultramáfica de los horizontes del complejo ofiolítico, las características del relieve y del clima, propios de la región, constituyen los factores geológicos hipergénicos fundamentales que dieron lugar a la formación de las potentes y ricas cortezas de intemperismo de perfil laterítico, lo que ha sido señalado por varios autores (Smirnov, V.I., 1986)¹⁰⁵. Potentes y ricas cortezas de intemperismo de perfil laterítico, lo que ha sido señalado por varios autores (Smirnov, V.I., 1986)¹⁰⁵.

1.5. Características Socio Económicas

Económicamente Moa constituye una de las zonas más ricas del país en lo que a recursos minerales se refiere, siendo el centro minero de mayor importancia de la nación. Asociados con las cortezas de intemperismo se encuentran los yacimientos ferroniquelíferos que representan la mayor riqueza minera del país. La región cuenta también con recursos importantes de piedras ornamentales, decorativas, arcillas para cerámica roja y Cromo.

En correspondencia con los recursos existentes en la zona, se encuentran en explotación dos plantas procesadoras de menas de níquel: la Comandante Pedro Sotto Alba Moa Nickel SA y la Comandante Ernesto Che Guevara. Una tercera planta para la obtención de ferroníquel se encuentra en fase de construcción. Otras industrias y empresas relacionadas con la actividad minero metalúrgica son la Empresa Mecánica del Níquel, la UPI Las Camariocas, la Empresa Constructora y Reparadora de la Industria del Níquel, el Centro de Proyectos del Níquel y varios organismos y dependencias económicas como la Empresa Geominera Oriente, el Combinado Lácteo y otros.

1.6. Características geológicas del territorio.

La geología de la región se caracteriza por una gran complejidad condicionada por la variedad litológica presente y los distintos eventos tectónicos ocurridos en el paso del tiempo geológico, lo que justifica los diferentes estudios y clasificaciones realizadas, basadas en criterios o parámetros específicos según el objeto de la investigación.

En 1989, F. Quintas en su tesis doctoral, realiza la clasificación geológica regional según ocho asociaciones estructuro-formacionales (AEF), de las cuales seis se encuentran representadas en el área de investigación. Él se basó en la teoría que explica el origen y evolución de los arcos insulares, así como la formación de las plataformas, las etapas evolutivas y los conjuntos litológicos faciales típicos de cada estadio.

En 1997, Iturralde-Vinent, reconoce en la constitución geológica del archipiélago cubano 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 metamorfozados de edad pre-Eoceno Medio, que ocupan en la actualidad una posición muy diferente a la original. El autor divide al cinturón plegado en unidades continentales y unidades oceánicas. En Cuba Oriental las unidades continentales están representadas por el Terreno Asunción, compuesto por dos unidades litoestratigráficas bien diferenciadas, la Fm. Sierra Verde y la Fm. La Asunción. 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 neoa autóctono está constituido por materiales terrígenos carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado.

En 2001, Leduar Ramayo estudio las texturas de los minerales en El Rifle-Hato Viejo, región de Moa donde realizó una clasificación y una descripción genética del área de la siguiente forma:

I) Rocas de afinidad ofiolítica

- Dunitas y peridotitas serpentinizadas
- Cúmulos Máficos

- Basaltos en almohadillas

II) Arco volcánico cretácico

- Fm: Santo Domingo

III) Piggy Back del campaniense tardío-daniense

- Fm: Mícara
- Fm: Gran Tierra

IV) Arco volcánico terciario

- Fm: Sabaneta

V) Piggy Back del Eoceno Medio-Oligoceno

- Fm: Múcaral
- Fm: Yateras

VI) Neoautóctono

- Formaciones cuaternarias

La faja Mayarí-Baracoa a su vez la divide en tres macizos: Mayarí-Cristal, Sierra del Convento y Moa-Baracoa, el área de estudio se encuentra en el Macizo Moa-Baracoa localizándose en el extremo oriental de la Faja Mayarí-Baracoa. Ocupando un área aproximada de 1 500 km² donde se presenta un gran desarrollo de los complejos ultramáfico, complejo máfico y vulcano-sedimentario mientras que el complejo de diques de diabasas está muy mal representado, apareciendo las diabasas descritas en la región en forma de bloques tectónicos incluidos en los niveles de gabros, sobre todo en la parte superior del complejo cumulativo. Se estima un espesor de aproximadamente 1000 metros para el complejo ultramáfico y 500 metros para el de gabros, mientras que para el complejo vulcano-sedimentario se ha estimado un espesor de 1200 metros.

1.6.1. Complejo de rocas ultrabásicas

Aflora en toda la porción central y meridional del área y está constituido predominantemente por harzburgitas y subordinadamente dunitas, lherzolitas y piroxenitas. Estas rocas se caracterizan por presentar un grado de serpentización variable, varios investigadores tienen su teorías pero muchos, han llegado incluso a considerar el proceso como una manifestación de autometamorfismo de las intrusiones. Sin embargo, ha predominado el criterio de procesos dinamo-metamórficos durante la elevación y emplazamiento de las grandes masas peridotíticas a la superficie en presencia de agua, ya que la serpentización, como se ha señalado en diversas investigaciones se desarrolla más intensamente hacia los bordes de los macizos sobre todo, en los límites tectónicos de sobre corrimiento de estos sobre las rocas autóctonas. Las rocas de este complejo se caracterizan por presentar un color verde oscuro o gris verdoso y por un alto grado de agrietamiento.

Los complejos máficos están representados por gabros olivínicos, gabro-noritas, anortositas y gabros normales de diferentes granulometrías. Los cuerpos de gabro tienen una estructura de grandes bloques y la mayoría de éstos se disponen en las zonas periféricas del complejo ultramáfico. En el sector Moa-Baracoa están representados dos tipos de gabros, los llamados gabros bandeados y los gabros masivos en las partes más altas del corte. En la región de estudio los gabros afloran siempre asociados a las serpentinitas, apareciendo en forma de bloques en las zonas de Quesigua-Cayo Guam-Mercedita, Centeno-Miraflores y Farallones-Caimanes.

Los complejos de diques de diabasas están muy mal representados, apareciendo las diabasas descritas en la región en forma de bloques tectónicos incluidos en los niveles de gabros, sobre todo en la parte superior del complejo cumulativo.

1.6.2. Complejo vulcano-sedimentario

Está en contacto tectónico con los demás complejos del corte ofiolítico y está representado por formaciones. El conjunto aparece con una coloración negro o verde oscuro. Este es un complejo bien estudiado y que esta descrito en las formaciones presentes en el territorio.

Formación Santo Domingo: única representante del arco volcánico cretácico en el área, está constituida por tobas, lavas y aglomerados, apareciendo pequeños cuerpos de pórfidos dioríticos, andesitas y diabasas. Se incluyen además en esta formación las calizas pizarrosas

finamente estratificadas y muy plegadas de color grisáceo. Se le asigna una edad Cretácico Aptiano-Turoniano. Aflora en la región de Farallones-Calentura y en una pequeña área en la localidad de Centeno.

Formación Mícará: está compuesta por tres facies terrígenas y terrígenas carbonatadas. En el inferior está constituida por aleurolitas masivas, mal estratificadas; brechas; areniscas; arcillas y calizas. En la media presenta Secuencia olistostrómica compuesta por margas, areniscas, aleurolitas, gravelitas y conglomerados. En la parte superior Predominan las aleurolitas y subordinadamente brechas y areniscas tobáceas, la parte más alta, con intercalaciones de tobas ácidas bentonizadas y calizas. De edad Maestrichtiano-Daniano. Aflora en la zona de Los Indios de Cananova y borde suroeste del cerro de Miraflores.

Formación La Picota: esta constituida por intercalaciones de areniscas polimícticas y conglobrechas mal seleccionadas que se intercalan con argilitas. Cretácico Superior (Campaniano-Maestrichtiano). Aflora en la base de la Sierra del Maquey y en la meseta de Caimanes.

Formación Sabaneta: Está constituida por rocas vulcanógenas-sedimentarias de granos finos, frecuentemente zeolitizadas, con intercalaciones de calizas, silicitas, tobas cloritizadas y rara vez basaltos. De edad Paleoceno Inferior (Daniano parte alta)- Eoceno Medio. En la zona de Farallones el corte está compuesto por tobas vitroclásticas y cristalolitoclásticas zeolitizadas, tobas vítreas y tobas cineríticas. Las calizas tobáceas y tufitas aparecen regularmente hacia la parte alta de la formación. En Los Indios de Cananova, en la base de la formación se intercalan areniscas de granos gruesos y algunas brechas, donde fueron encontrados fósiles que indican una edad Paleoceno-Daniano. Aflora en un área extensa de la región de Cananova hasta Farallones y en un pequeño bloque en Yamanigüey. Perteneciente a las cuencas superpuestas o piggy-back de la segunda generación aflora en el área la Sierra de Capiro.

Formación Júcaro: Está constituida por calizas margosas poco consolidadas y a veces por margas de edad Oligoceno-Mioceno. Aflora por toda la costa en la región de Cananova y Yamanigüey.

Formación Yateras: Está constituida por calizas organodetríticas típicas de complejos arrecifales y bancos carbonatados con intercalaciones de margas. Presentan bruscos

cambios faciales en cortas distancias, con una abundante fauna de foraminíferos bentónicos y planctónicos, lo que ha permitido asignarle una edad Oligoceno Superior hasta el Mioceno. Aflora en la región de Yamanigüey, formando una franja por toda la costa.

Formación Mucaral: Margas con intercalaciones de calizas arcillosas, areniscas polimícticas, conglomerados polimícticos, limolitas y tobas. Con una edad del Eoceno Medio (parte alta) - Eoceno Superior.

Existen otras formaciones en el territorio que están documentadas en el área por pozos que se han realizado estas no afloran.

Depósitos Cuaternarios: Estos depósitos están constituidos por calizas organodetríticas con gran contenido de fauna, predominando los moluscos contemporáneos. Aparecen también aleurolitas calcáreas, arenas margosas y arcillas. Los depósitos ubicados en los márgenes, cauces y desembocaduras fluviales están constituidos por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, aleurolitas y arcillas derivadas de la erosión fluvial. Constituyen una cobertura prácticamente continua en forma de franja a lo largo de la costa y discontinua en las partes interiores.

Neoautóctono: Las rocas y estructuras del neoautóctono cubano se formaron después de la consolidación del substrato plegado, es decir, a partir del eoceno superior. Está constituido por secuencias sedimentarias donde predominan las rocas carbonatadas sobre rocas terrígenas, depositadas en régimen de plataforma continental, aparece representado en la región por las formaciones Júcaro y Yateras que yacen discordantemente sobre las unidades del cinturón plegado. Estructuralmente estas secuencias se caracterizan por su yacencia monoclinal suave u horizontal, con algunas perturbaciones en las zonas donde existen dislocaciones jóvenes.

1.6.3. Principales Sistemas de Fallas del Territorio.

En los estudios tectónicos precedentes del territorio se han reconocido y fueron cartografiados cuatro sistemas de estructuras disyuntivas que corresponden a cada uno de los periodos de la evolución geotectónica (Rodríguez, 1998). Las fallas más representativas por sistemas son.

El primer sistema y más antiguo de la región el cual se encuentra pasivo las fallas de este sistema son: Falla El Liria y Falla Caimanes Abajo.

El segundo sistema se encuentra activo y en él se encuentran las siguientes fallas:

Falla Los Indios; En varios puntos esta estructura aparece cortada y desplazada por fallas de dirección norte-noreste. Su trazado es en forma de una línea curva cóncava hacia el oeste-sudoeste con un rumbo que oscila entre los 10° y 30° oeste en los diferentes tramos que la conforman.

Falla Cayo Guam con una dirección $N15^{\circ}W$, se extiende desde la parte alta del río de igual nombre esta estructura aparece cortada y desplazada en varios tramos por fallas de dirección noreste y sublatitudinales.

Falla Moa es la estructura de mayor extensión y su trazo corresponde con una línea cóncava hacia el este con el arco mayor en la zona de Calentura, Haciéndose más recta hacia el norte con una dirección de $N48^{\circ}E$, mientras que en su parte meridional tiene un rumbo $N25^{\circ}W$.

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

Falla Cabaña; orientación $N70^{\circ}E$ hasta la zona de Zambumbia donde es truncada por un sistema de fallas submeridionales En las cercanías de Centeno esta estructura es cortada y desplazada por la falla Cananova tomando una orientación $N56^{\circ}E$.

Falla Quesigua; se expresa a través de un arco con su parte cóncava hacia el este nordeste, manteniendo en su parte septentrional, donde su trazo es más recto un rumbo $N10^{\circ}E$ y en la meridional, $N40^{\circ}W$.

Falla Maquey; asume un rumbo $N65^{\circ}E$ por más de siete kilómetros hasta Calentura abajo donde se cruza con las fallas Moa y Caimanes. En su parte más occidental mantiene una orientación $N78^{\circ}E$ siendo cortada y desplazada por estructuras de orientación noroeste.

En el tercer sistema al igual que el segundo activo se encuentran las fallas:

Falla Cananova; presenta rumbo predominante $N53^{\circ}W$. Es cortada en diferentes puntos por estructuras submeridionales, caracterizándose toda la zona de falla por el grado de cizallamiento de las rocas que corta.

Falla El Medio; con un rumbo aproximado de N40°E. Al igual que la Falla Cananova, origina un alto cizallamiento de las rocas a través de todo su trazo.

Cuanto sistema el cual también está activo las fallas más reconocidas son; Falla Cupey, Falla Arroyón.

1.7. Geología regional.

Las secuencias mantélicas y de acumulados de la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa se han datado como Jurásico-Cretácico Temprano y las rocas volcano-sedimentarias como Hauteriviense (?)-Campaniense(?) (Iturralde-Vinent, 1996). Los contactos observados con las estructuras circundantes son tectónicos. Estas estructuras son complicadas debido al clásico emplazamiento que presentan, estando afectadas por dislocaciones plicativas y disyuntivas. Las ofiolitas del norte de Cuba son características de una cuenca de back arc.

Esto sugiere que la cuenca donde se formaban los niveles vulcanógenos-sedimentarios de la ofiolita se desarrollaba al mismo tipo que el arco volcánico. Esta relación espacio-temporal entre la ofiolita y el arco de isla Cretácico es sustentada también a partir de los rasgos geoquímicos de los niveles de gabros de la secuencia ofiolítica del norte de Cuba (Fonseca et al; 1985), los cuales son indicativos de un ambiente genético de suprasubducción.

1.8. Geología del yacimiento local.

Las rocas que componen el yacimiento son: rocas harzburgitas del complejo cumulativo y serpentinita por harzburgitas. Otras rocas con carácter subordinado son las wherlitas, gabros y las plagioclasas. La corteza de intemperismo presente en esta área es del tipo residual, in situ. El origen de este yacimiento se debe fundamentalmente a la intemperización de estas rocas.

Yagrumaje Oeste se compone esencialmente de rocas ultramáficas, presentándose rocas gabroideas poco productivas o estériles respecto al níquel, principalmente en la periferia noreste del área en cuestión. También se observan muy pequeñas áreas de menor importancia de este tipo de rocas dispersas interiormente en algunos cuerpos minerales, lo que se recalca por presentar relativamente altos contenidos de Al_2O_3 en el mineral, lo que deberá tomarse en cuenta durante la asimilación industrial de las menas de estas localidades.

1.8.1.Hidrogeología

Las condiciones hidrogeológicas de este yacimiento al igual que Yagrumaje Norte, están condicionadas a los períodos de seca y lluvia, presentando complejidades mayores en época de lluvia y en período de sequía moderada, mientras que en época de intensa sequía las condiciones hidrogeológicas son simples. Los niveles del agua en época de seca descienden rápidamente y luego se mantienen estables, hasta tanto comienza la lluvia, donde ascienden rápidamente y al terminar estas, en pocos días retornan al comportamiento de periodo de seca prolongado. La dirección de las aguas es Noroeste y Noreste.

El Yacimiento Yagrumaje Oeste se ubica en el macizo montañoso Moa – Baracoa del norte de las provincias orientales de Cuba. Las rocas que conforman su basamento pertenecen a las Ofiolitas del Cinturón Septentrional, por sus características petrográficas y químicas están representados principalmente por cúmulos ultramáficos, donde son más representativas las harzburgitas serpentinizadas y las serpentinitas por harzburgitas, en menor proporción plagioclasitas y cúmulos máficos representados por gabroides, estos han sido sometidos a procesos metazomáticos, los que han provocado fuertes alteraciones, dando lugar a la uralitización, saussuritización, talquitización, cloritización, argilitización, y carbonatización de estas rocas. El origen de este yacimiento se debe fundamentalmente a la intemperización de estas rocas.

1.8.2.Rocas Encajantes

La litología de las rocas madres que dieron origen a la corteza de intemperismo y a los cuerpos minerales se compone esencialmente de rocas ultramáficas, están representadas principalmente por dos variedades de rocas, estas son la harzburgita serpentinizada y la serpentinita por harzburgita.

Harzburgita Serpentinizada:

Estas rocas tienen su coloración predominantemente verde, en ocasiones presentan tonalidades que van desde verde oscuro hasta verde grisáceo, se presentan con estructura masiva, compacta, en ocasiones tienen algunas grietas rellenas de una mineralización blanca amarillenta, y a veces se observa cierta oxidación. Las texturas predominantes son la hipidiomórfica relíctica, reticular y nodular.

En la composición Mineralógica de estas rocas está presente olivino relíctico, ortopiroxenos (los cuales en mayor o menor grado están afectados por los procesos de serpentinización) y minerales del grupo de la Serpentina.

Olivino: Su contenido en la roca está entre 15 y 35 %, con granos que se presentan en forma subredondeada dándole a la roca un aspecto nodular, en ocasiones muchos han sido sustituidos parcialmente por iddingsita, en su mayoría estos granos están totalmente bordeados por minerales del grupo de la serpentina (Lizardita, Antigorita, Crisotilo), que le dan a la roca un aspecto reticular.

Ortopiroxeno: Su contenido en la roca está alrededor de un 25 %, su textura es hipidiomórfica relíctica, por lo general presentan un alto grado de alteración, resultando una pseudomorfización de estos piroxenos por minerales del grupo de la serpentina (Bastita), a lo largo de las fracturas de los granos se ha desarrollado lizardita y en menor proporción crisotilo, en ocasiones en algunas grietas o fracturas y en los bordes estos granos se ha desarrollado un proceso de talquitización.

Minerales del grupo de la Serpentina: Son muy frecuentes en estas rocas, su contenido varía desde 38 hasta 70 %, estando representados fundamentalmente por lizardita, crisotilo y antigorita, estos minerales se encuentran por lo general en los retículos que bordean los granos de olivino y en ocasiones rellenando grietas (Crisotilo y Antigorita), la iddingsita se encuentra sustituyendo parcialmente a los granos de olivino y en ocasiones está más o menos transformada en óxido de hierro.

Rellenando grietas también se observa carbonato y talco.

La mena metálica fundamental es la magnetita, la que se encuentra entre 2 y 3 %, ésta se presenta en ocasiones con textura hipidiomórfica y también en forma de granos muy finos diseminada por toda la roca. La cromita no alcanza el 1 % y generalmente está en forma esquelética y corroída.

Serpentinita por Harzburgita.

Rocas de color gris verdoso con grietas rellenas de una mineralización blanco amarillenta algo sedosa, estructura masiva, compacta, textura variable predominando la reticular, relíctica nodular, hipidiomórfica relíctica y más escasamente fibroblástica relíctica. Estas rocas están constituidas fundamentalmente por minerales del grupo de la serpentina, ortopiroxeno y relictos de olivino. Rellenando grietas hay crisotilo y una mezcla de carbonato y arcilla.

Olivino: Su contenido en la roca varía entre 1 y 7 %, se encuentran parcial o totalmente sustituidos por serpofitaiddingsita, esta última en ocasiones limonitizada. Los granos relícticos se presentan en forma subredondeada, y en su mayoría están totalmente bordeados por minerales del grupo de la Serpentina (Lizardita, Antigorita, Crisotilo), que le dan a la roca un aspecto reticular.

Ortopiroxeno: Su contenido en la roca está alrededor de un 13 a 20 %, su textura es hipidiomórfica relíctica, por lo general presentan un alto grado de alteración, resultando una pseudomorfización de estos piroxenos por minerales del grupo de la serpentina (Bastita), a lo largo de las fracturas de los granos se ha desarrollado lizardita y en menor proporción crisotilo, en ocasiones en algunas grietas o fracturas y en los bordes estos granos se ha desarrollado un proceso de talquitización.

Minerales del grupo de la Serpentina: Son muy frecuentes en estas rocas, su contenido varía desde 76 hasta 80 % y están representados fundamentalmente por lizardita, crisotilo y antigorita, éstos forman una red o malla alrededor de lo que fueron granos de olivino, en ocasiones se encuentran relleno de grietas (Crisotilo y Antigorita), la iddingsita se aparece sustituyendo parcialmente o totalmente a los granos de olivino y en ocasiones está limonitizada.

La mena metálica fundamental es la magnetita, la que se encuentra con contenidos entre 1 y 2 %, la espínela cromífera se presenta en forma esquelética o algo corroída y no sobrepasa el 1 %.

1.8.3. Rocas Mineralizadas

La corteza de intemperismo del Yacimiento Yagrumaje Oeste se ha desarrollado a partir de rocas ultrabásicas serpentinizadas, por lo general están constituidas por minerales del grupo de la serpentina, los cuales conforman una textura serpentínico-reticular-nodular que bordea

los relictos de olivino que quedan en la roca e hipidiomórfica granular conformada por los ortopiroxenos bastitizados. e representa fundamentalmente en el área estudiada del yacimiento las características físicas y mineralógicas de las variedades de las rocas.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Introducción

Un modelo geológico es la representación gráfica en 2D y/o en 3D de un conjunto de variables regionalizadas interpretadas en el espacio tridimensional ajustadas a modelos teóricos estacionarios teniendo presente la información geológica precedente y fundamentos conceptuales de la génesis del yacimiento. En el presente capítulo abordaremos sobre el modelo geológico, las partes que lo integran así como la metodología utilizada en la confección del Modelo Litológico.

2.2. Antecedentes históricos de la modelación y otras concepciones.

A pesar de que existen muchos criterios de lo que es la modelación de yacimientos, con todas sus concepciones y particularidades (M. David, 1984; Chica Olmo, 1989, etc.), ésta se ha convertido en una herramienta indispensable para la exploración y explotación de los yacimientos minerales.

En la década del sesenta, con el desarrollo de los métodos geoestadísticos y la aparición de nuevas técnicas de cálculo de reservas, posibilitadas por los avances en la informática, comenzó a crecer el embrión de la modelación como herramienta para todas las etapas de cualquier proyecto minero y se unieron las concepciones existentes para dar lugar a las que se utilizan en la actualidad.

De forma general se desarrollaron concepciones por separado de lo que es la modelación, fundamentalmente encaminadas a la exploración y explotación de los yacimientos y otras.

Con el desarrollo en la década del sesenta de los métodos geoestadísticos y la aparición de nuevas técnicas de cálculo de reservas, posibilitadas por los avances en la informática comenzó a crecer el embrión de la modelación como herramienta para todas las etapas de cualquier proyecto minero y se unen las concepciones existentes para dar lugar a lo que se utiliza en la actualidad.

La aplicación de la modelación se hizo común y luego indispensable con el surgimiento de software mineros, los cuales tuvieron un desarrollo controlado por las exigencias y los avances de las técnicas geoestadísticas; este desarrollo transitó por tres estadios fundamentales: El primero se basaba en la amplia utilización de métodos determinísticos de cálculo y el empleo de métodos tradicionales de cálculo de reservas; el segundo dado por el aumento de los métodos geoestadísticos, con modelos matemáticos creados de forma arbitraria sin tener en cuenta límites geológicos y el tercer ó actual estadio, con amplia utilización de los modelos geológicos y geométricos en el cálculo, la incorporación de nuevas técnicas geoestadísticas, de simulación, de optimización etc.

Es posible afirmar que estamos en el comienzo de una cuarta etapa, donde los modelos económicos comienzan a alcanzar un lugar importante en las empresas mineras y los modelos matemáticos en general se caracterizan por tener valores fluctuantes de contenidos proporcionales (Grade Ore Proportion) y cut-off, proporción escombro - mena (Ore Proportion) y toda esa información para cada bloque. Es decir se introduce un modelo basado en proporciones en dependencia del cut-off elegido; A partir de estos datos y otros Optimización: en el contexto de la planificación industrial es un grupo de técnicas que introducen métodos analíticos matemáticos en las actividades de planificación (Ken Lane como costo minero, costo de procesamiento y precio en el mercado se presenta un modelo final con información del valor del bloque con respecto al cut-off, lo que resulta mucho más eficiente en la planificación minera, estos modelos se conocen como o simplemente (J. L. Pretorius & L. F. Baars, 1999), todo esto de forma dinámica regido por el valor variable del dinero en el tiempo, avance de la tecnología y otros.

2.3. El origen del modelo geológico clásico.

El modelo de bloques es una representación física, en términos de bases de datos que caracterizan una serie de bloques o celdas cuboidales orientadas en los ejes X, Y, Z del sistema cartesiano.

El primero en plantear este método fue Lerchs Grossmann en 1964, con el objetivo de representar la realidad modelada del yacimiento para poder aplicar el algoritmo de optimización del corte de la cantera a cielo abierto creado por él. En 1982 W. P. C. Stokes fue el primero en presentar el primer modelo computarizado. Al principio no se aceptaba las formas regulares para su representación, en 1984 Peter Stokes menciona muchas formas interesantes de la forma de los bloques, pero al final la forma cuboidal prevaleció.

La aplicación de los modelos del tipo clásico comenzó en las grandes minas de cobre explotadas a cielo abierto, encabezado por un gran número de matemáticos, los cuales crearon las herramientas y los conceptos mineros de planificación modernos (utilizados actualmente en las principales empresas mineras del mundo).

2.4. Antecedentes Internacionales.

La modelación tiene como cuna las principales potencias mineras y económicas del mundo, cada una de ellas destacándose en unas o varias de sus etapas, por ejemplo Australia aún lleva a la cabeza la optimización y la modelación económica de los yacimientos dirigida por la Whittle Programming, la cual puede ser considerada como un monopolio en esta materia. Países como Francia y Canadá acogieron en sus centros de investigación a los así nombrados “padres de la geoestadística”, entre los que se destacan Matheron, M. David y otros. Actualmente estos países precursores de la modelación y dueños de la tecnología necesaria para ejecutarla son los que llevan la cabecera en su aplicación; con el desarrollo de la globalización las inversiones mineras de estos países se han multiplicado en el tercer mundo transfiriendo de esta

manera las técnicas y parte de las tecnologías y el conocimiento científico, es fácil comprobarlo observando que las publicaciones en la materia en su inmensa mayoría pertenecen a las potencias económicas, por lo que no es absurdo afirmar que esta técnica en el tercer mundo aún es incipiente.

2.5. Antecedentes Nacionales

Nuestro país tiene en esta materia una situación general similar a la del resto del tercer mundo; solo con carácter muy localizado se realizan investigaciones en este campo. En la actualidad se comienzan a dar los primeros pasos en la aplicación eficiente, y organizada a niveles empresariales, de estas técnicas y ya se ha implementado en algunas minas pequeñas, como Oro Castellano y otras. En las lateritas se han realizado algunos trabajos encaminados a esta materia, pero con objetivos muy específicos, fundamentalmente dirigidos a la modelación geológica, destacándose el proyecto Pinares de Mayarí, donde se sigue de forma interesante la metodología propuesta para este estadio de la modelación, además resulta poco convencional por las técnicas empleadas en el mundo.

Algunos investigadores han realizado aportes importantes puntuales en este campo y no es excesivamente optimista ni ilusa la afirmación de que Cuba tiene posibilidades de convertirse en un centro de referencia en la modelación de este tipo de yacimiento, aunque aún estamos muy lejos de alcanzar esta meta.

2.6. La definición de modelo de yacimiento mineral

Según Cox, Singer y Barton (1986) y Ariosa-Díaz Martínez (2001) el término “modelo” genera, en el contexto de las ciencias de la Tierra, una amplia variedad de imágenes mentales que van desde la duplicación física de la forma de un objeto, como sucede en los modelos tridimensionales a escala de laboreo de una mina, la geometrización espacial de un yacimiento y sus cuerpos minerales, un modelo con la expresión de los campos físicos que revela el yacimiento, un modelo para el cálculo de las reservas del yacimiento... hasta un concepto unificador que explica o describe un fenómeno complejo. Es en este contexto que

se trabaja esta investigación.

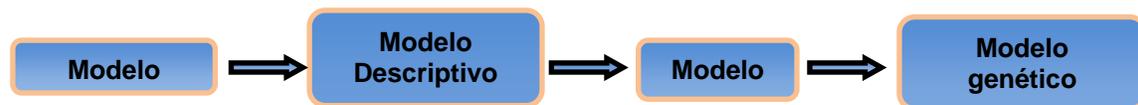
Se define a un modelo de yacimiento mineral como “la información sistemáticamente ordenada que describe los atributos esenciales (propiedades) de una clase de yacimiento mineral”.

Están implícitos en esta definición dos aspectos esenciales:(Henley y Berger, 1993):

1. El modelo, como un sistema de clasificación aceptable.
2. El modelo, como una selección consciente de cuáles pueden ser los atributos esenciales de este sistema de clasificación.

Se aprecia una coincidencia del criterio de Ludingtonetal(1985) y el de estos autores al señalar que el modelo puede ser empírico o descriptivo en cuyo caso sus atributos se reconocen como esenciales aunque se desconozcan sus interrelaciones, o puede ser conceptual o genético, en cuyo caso los atributos están interrelacionados a través de algunos elementos fundamentales.

La secuencia de pensamiento es: (Ariosa Iznaga, 2002)



Henley y Berger (1993) indican que los modelos pueden ser definidos más simplemente como “una descripción tentativa de un sistema o teoría que es válida para todas sus propiedades conocidas” o como “un esquema preliminar que sirve de plan ya partir del cual, en el caso de los yacimientos minerales, es posible el descubrimiento de estilos específicos de yacimientos”

Los modelos son redes de información que se construyen para una finalidad específica y por tanto debe ser inherente a cada modelo una selección de la información, una red de vínculos de información y un objetivo para su utilización.

Siguiendo a Barton (1993) un factor que favorece a los modelos genéticos sobre el simplemente descriptivo es el volumen puro y transparente de la información

descriptiva necesaria para representar los variados rasgos de un yacimiento.

Plumlee y Nash (1995) definen a un modelo de yacimiento mineral como “un sumario sistemático de información concerniente a las características geológicas, ley, tamaño y génesis de una clase de yacimientos minerales similares” También consideran estos autores que los modelos pueden empíricos o basados en observaciones o datos medidos y/o teóricos fundamentados en ideas conceptuales concernientes a la génesis del yacimiento.

Hogdson (1993) señala al modelo de yacimiento mineral como “un patrón conceptual y/o empírico que encierra tanto a los rasgos descriptivos del tipo de yacimiento como una explicación de estos rasgos en términos de procesos geológicos”.

Díaz Martínez R. (Comunicación personal) considera que "los modelos geológicos son ante todo una acumulación de información que sirve para la comparación y la organización de los datos en grupos".

Indica que la búsqueda de los yacimientos minerales fue empírica en sus inicios pero que en la actualidad es deductiva; esta etapa deductiva se descompone en dos miembros que son la determinación de las características del yacimiento y la selección del yacimiento. A partir de ellos se produce la organización en grupos de la información y se obtiene la tipología del yacimiento mineral.

Concluye señalando que "un modelo geológico es una figura que reúne todas las características tipológicas según un orden lógico, dinámico y deductivo. Permite enmarcar de forma fácil una información nueva en el contexto general de una característica a partir de aquellas conocidas". En este caso el modelo se convierte en “conjunto mnemónico” el cual permite a quien prospecta, la memorización de las características útiles y utilizables en cualquier momento. Se trata de un sintetizador de conocimientos de uso imprescindible para el Geólogo de yacimientos minerales

Según la opinión del autor de esta investigación un modelo descriptivo de yacimiento mineral se puede definir como "una selección de las características geológicas y tecnológicas de un yacimiento que en calidad de atributos esenciales

e invariantes lo distinguen de otro yacimiento, siendo el fundamental de todo la génesis de su mineralización principal y secundaria, y que pueden ser utilizadas para su estudio, exploración, evaluación y desarrollo"

Cox (1993) indicó que desde el surgimiento del concepto moderno de modelo de yacimientos minerales, se ha producido una discusión sobre su importancia y los peligros para la exploración de recursos minerales e indica que uno de los puntos principales es que al ser los modelos un método extremadamente útil de organización de los datos pueden tender a la simplificación de fenómenos naturales muy complejos como son lo que generan y caracterizan a estos objetos geológicos. Dicho de otra manera: datos importantes del ya cimiento pueden pasar por alto al no ser incorporados en el modelo.

Como hemos señalado cada modelo tiene sus limitaciones, particularmente aquellas que pretenden "retratar" a los rasgos esenciales de los fenómenos naturales. A este respecto Hodgson (1993) indicó que las interacciones entre los constructores de los modelos que se han publicado, que con frecuencia son Geólogos de instituciones académicas y los Geólogos de exploración, son fundamentales para la evolución de modelos más útiles y seguros.

Sucede en ocasiones que son el yacimiento que no se ha podido clasificar o una observación que no puede explicar con coherencia, lo que nos permite avanzar en nuestra comprensión. Los elementos fundamentales para la evaluación del potencial de recursos minerales son las descripciones de los tipos de yacimientos patrones que se utilizan para agrupar a yacimientos similares.

Estas descripciones patrones se utilizan como "definiciones de yacimientos" y por evaluación de expertos en análisis del potencial mineral de zonas geológicas perspectivas, proporcionan la base para la selección de los datos para la evaluación cuantitativa (Grunsky, 1995).

Cox y Singer (1986) en el USGS clasifican a los modelos con un esquema fundamentado en el ambiente geólogo-tectónico de ubicación de los yacimientos minerales. Lefebure et al (1995), Lefebure y Ray(1995) y Lefebure y Höy(1996) utilizan tres esquemas de clasificación:

- Sobre la base de grupos de yacimientos.
- De acuerdo con la litología encajantes asociada más frecuentemente.
- Por el producto principal del yacimiento mineral.

2.7. El modelo geológico y partes que lo integran.

El modelo geológico es el más importante pues define las características que tendrá el modelo del yacimiento. "Deposit interpretation and modeling consist of establishing the continuities, the distribution, the limits, and the grade of the mineral/metal of interest, thereby establishing a discrete zone or body."

De esta manera Michel David (1991) define su concepto de modelación de yacimientos y la importancia que tiene para la modelación el conocimiento geológico del yacimiento y el entorno geológico en que se enmarca el mismo.

Como es obvio, la geología del yacimiento regula el comportamiento, variabilidad y distribución de las variables regionalizadas en el espacio; además, el conocimiento de un fenómeno geológico, es premisa previa para el empleo de cualquiera de las herramientas matemáticas.

En la mayoría de las modelaciones realizadas en otros yacimientos, fundamentalmente la modelación matemática, este proceso parte del análisis geológico, con el cual se realiza un modelo previo del yacimiento. El resto de los modelos y herramientas empleadas son simplemente una vía para alcanzar mayor precisión en los resultados, o simplemente para facilitar las decisiones y operaciones mineras. Él está formado por tres partes fundamentales:

1. Modelo geólogo- genético.
2. Modelo geométrico.
3. Modelo matemático.

Estos están estrechamente relacionados, lo que indica que para obtener uno hay que tener en cuenta los otros y así sucesivamente. En su conjunto explican las particularidades del yacimiento modelado lográndose la estimación y simulación del fenómeno analizado de forma eficaz.

Por la amplia aplicación que ha tenido la Geoestadística en la modelación de yacimientos, asumimos como enlace cuantitativo y cualitativo de los tres Modelos anteriormente planteados, siempre y cuando sea posible y lógico este camino.

La utilización de la teoría de las variables regionalizadas (**VR**) tiene la ventaja de ser la única capaz de dar respuesta satisfactoria a los problemas con precisión óptima (a partir de la información disponible), considerando a la vez los aspectos de variabilidad del fenómeno natural; las fluctuaciones locales de éste sugieren una interpretación probabilística del mismo, por lo que es lógico sugerir un modelo de esta naturaleza (Primer Congreso de Geoestadística de Roma, MATHERON 1976); por todo lo planteado es posible afirmar que el modelo probabilístico y la teoría de la VR permiten presentar siempre en términos operativos los problemas de estimación y simulación del fenómeno cosa que no es posible con una óptica determinística del asunto (no considera la variabilidad del fenómeno estudiado) a pesar de que los métodos determinísticos en ciertos casos aportan modelos adecuados de los fenómenos.

2.7.1.El modelo geólogo – genético.

En su esencia recoge toda la información geológica relacionada con el yacimiento objeto de estudio, tanto de datos experimentales, como datos inferidos por métodos analógicos, ej.

Proceso de evolución geológica de una zona determinada, reconstrucción de los sucesos geológicos a partir de datos estratigráficos, etc.

Algunos autores subdividen éste modelo en dos descriptivo y genético.

Submodelo descriptivo.

Este constituye la base de la organización sistemática de la información sobre uno o grupos de yacimientos y permite el agrupamiento de los mismos en diferentes categorías taxonómicas, sobre todo durante la etapa de prospección.

Durante la etapa de exploración y explotación del yacimiento se utiliza toda la información geológica acumulada para determinar las principales características de las menas y sus diferentes tipos tecnológicos. También permite

describir los procesos geológicos (espacialmente separables o no), caracterizados cada uno o grupos de ellos por características particulares que pueden ser consideradas como poblaciones estadísticas diferentes, con una disposición espacial determinada y muchas veces describible perfectamente de forma estructural a través de la teoría de las VR.

Este submodelo se construye a través de un método operativo que consiste en la realización de una sinopsis que resume las características objetivas del yacimiento. Estas características permiten la confección del marco geológico regional y el marco geológico local del yacimiento, con un grado de subjetividad mínimo.

El submodelo genético.

Es el resultado de la evolución del submodelo descriptivo y su calidad depende de la complejidad del contexto geológico y el grado de conocimiento geológico reflejado de una forma u otra en el submodelo descriptivo; estos se subdividen dos tipos: el de probabilidad de presencia y los de cuantificación de procesos. Los primeros predicen la probabilidad de que un depósito o una de sus partes (ej. redepósitos y menas in situ) aparezca en una posición determinada en el espacio. Por su parte, los submodelos de cuantificación de procesos son aquellos que describen cuantitativamente los procesos relacionados con la formación de un depósito mineral y solo en muy pocos casos, es posible que alcance una exactitud importante por lo complejo que resulta esta faena.

2.7.2. Modelo geométrico.

Este tiene como objetivo separar el yacimiento de las rocas de caja y a su vez subdividir el yacimiento de forma tal que los límites espaciales de cada subzona constituyan soportes donde las variables regionalizadas caractericen poblaciones estadísticamente regulares, sin o con interpretación geológica posible. Los límites también pueden tener un carácter eminentemente técnico, económico, ecológico, legal o de algún otro tipo que facilite la ejecución del proyecto minero en cuestión.

Los límites pueden ser de dos tipos en dependencia de su naturaleza; para su determinación es necesario contar con observaciones visuales y con pruebas estadísticas. (Michel David, 1991):

Primarios: Son límites explícitos, que se corresponden con la litología, los rasgos estructurales tridimensionales o cambios bruscos en la mineralización observada, estos son considerados como límites físicos.

Secundarios: son aquellos que se determinan a través del comportamiento de los elementos químicos, en ocasiones estos límites no se pueden determinar fácilmente. A este tipo de límite nosotros les llamamos límites matemáticos.

En la práctica la determinación de estos límites se realiza a través de:

- El Modelo geólogo- genético que permite obtener los límites físicos con diferentes grados de precisión.
- Modelo matemático: por su esencia requiere la determinación de los límites del tipo secundario para definir por separado las características de las diferentes poblaciones estadísticas separadas, la existencia de cambios en la variabilidad o zonas con alto error de estimación, así como cualquier otro tipo de anomalía matemática espacialmente describible, que indique la existencia de dos o más poblaciones estadísticas sin subdividir espacialmente.
- Utilización conjunta de los modelos anteriormente mencionados: es el método más utilizado donde es posible separar el yacimiento utilizando los dos tipos de límites.

Desde el punto de vista probabilístico el modelo geométrico es el conjunto de campos geométricos que definen las VR en el espacio.

La subdivisión espacial del yacimiento, utilizando herramientas matemáticas, se realiza a través de técnicas de la estadística multivariada (análisis cluster y otras técnicas de clasificación supervisada y no supervisada), así como el análisis estructural del fenómeno utilizando la teoría de las VR. Para la subdivisión según límites físicos se emplean un gran número de herramientas

geológicas y geofísicas, en el que juega un papel principal el mapeo geológico y la perforación.

2.7.3. Modelo matemático.

También conocido como modelo numérico o de bloques (GENCOM software, 1998), en esencia es el resultado de la estimación o la simulación (condicional o no) de las propiedades de cada VR en un espacio limitado por el campo geométrico y la asignación de valores, que pueden o no caracterizar determinado espacio R^n del modelo geométrico.

Para su confección se utilizan un gran número de útiles metodológicos, en los que se incluyen métodos estadísticos y determinísticos, solamente utilizables si se cuenta con medios técnicos poderosos como son los software mineros especializados, por la complejidad y el gran número de cálculos involucrados.

La estimación y la simulación se pueden realizar por dos enfoques fundamentales: determinísticos y probabilístico anteriormente mencionados, (José R. Alfonso Roche, 1989; Mario Chica Olmo, 1988; Michel David, 1991).

La modelación matemática también tiene otros enfoques pero en su esencia no es más que la caracterización del comportamiento de las VR y otras variables en el espacio y en función de ellas determinar por diferentes vías su valor en un soporte de tamaño determinado y definido en un campo geométrico previamente establecido.

Es de gran importancia, pues permite conocer la variabilidad de los datos a escala espacial, de esta se desprenden un sin número de modelos también de carácter numérico, que permiten simular todos los procesos naturales y artificiales llevados a cabo en el desarrollo del proceso minero (explotación, almacenamiento, economía, etc.).

Los principales tipos de Modelos matemáticos se muestran a continuación, estos se diferencian por la naturaleza de los datos y por su utilización:

- **Modelo hidrogeológico:** caracteriza el movimiento del flujo de las

aguas subterráneas del yacimiento, así como su régimen y particularidades de los diferentes complejos acuíferos presentes en la zona.

- **Modelo económico** (GENCOM software, 1998): caracteriza los parámetros económicos del yacimiento de forma espacial, para cada bloque del modelo matemático o para cada campo del modelo geométrico. Un ejemplo de estos parámetros es: el costo minero por tipo de roca, entre otros. La utilización de este modelo es esencial para realizar la optimización económica de la minería.
- **Modelo de densidad** (GENCOM software, 1998): caracteriza la densidad de las rocas en el espacio, se emplea esencialmente para el cálculo de reservas y para la planificación de la minería en dependencia de la calidad del mineral
- **Modelo de la ley del mineral o** (GENCOM software, 1998): caracteriza la distribución espacial de la ley del mineral, es el más importante de todos los modelos y la columna vertebral de la planificación de la minería.
- **Modelo de recurso y reservas o resource model** (GENCOM software, 1998, Micro LYNX, 1998): caracteriza los recursos y a partir de él se calculan las reservas locales y globales, del yacimiento, su ejecución depende del modelo anterior y de un gran número de parámetros técnicos y económicos, es de difícil ejecución y se considera uno de los productos finales de la modelación del yacimiento.
- **Modelo estadístico** (Mario chica Olmo, 1988; Michel David, 1991 y 1976; Matheron, 1978): Caracteriza la estructura y la variabilidad de los datos en el espacio, así como la continuidad, distribución estadística, momentos, etc. se emplea en la obtención de los dos modelos anteriormente mencionados y en la planificación minera, para simular la mezcla óptima de la materia prima mineral y el esquema más sostenible de los flujos de carga.
- **Modelos creados con técnicas de RRE:** aplicado recientemente a algunas

minas de oro sudafricanas; se caracteriza por el empleo de proporciones de los parámetros que los caracterizan, en función de cantidad de posibles Cut – Off. No está generalizado en todos los tipos de yacimientos por su reciente aplicación pero se puede considerar un ejemplo del alcance y poder de análisis que facilita la modelación del yacimiento.

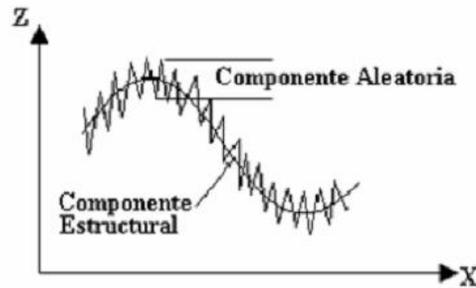
- **Otros:** existe una gran cantidad de modelos particulares para cada tipo de mina, entre ellos se destacan el modelo físico mecánico de las rocas, entre muchos otros.

2.8. La geoestadística como herramienta para la caracterización y modelamiento de un yacimiento.

La geoestadística es una rama reciente que combina a las ciencias matemáticas con las geológicas que, a diferencia de la estadística convencional, sirve para cuantificar la incertidumbre y especificar la forma en que ésta varía en el espacio-tiempo. Uno de sus campos de aplicación es la caracterización de reservorios, que involucra un conjunto de métodos determinísticos y probabilísticos, cuyo objetivo es definir el modelo más probable de un reservorio, con sus formas de cuerpos, heterogeneidades petrofísicas, geometría estructural y caracterización paleoambiental.

La Geoestadística se define como una aplicación de la Teoría de Funciones Aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales, o simplemente, el estudio de las variables aleatorias distribuidas en el espacio y en el tiempo.

Muchos fenómenos naturales distribuidos en el espacio (p. ej. la mineralización en un yacimiento geológico, tipos de estructuras geológicas, etc.), presentan un carácter mixto, un comportamiento caótico o aleatorio a escala local, pero a la vez estructural a gran escala:



Se puede sugerir la idea de interpretar este fenómeno en términos de Función Aleatoria (FA), es decir, a cada punto X del espacio E se le asocia la Variable Aleatoria $Z(X)$.

Para dos puntos diferentes X e Y de E, se tendrán dos variables aleatorias $Z(X)$ y $Z(Y)$ diferentes pero no independientes, y es precisamente su grado de correlación el encargado de reflejar la continuidad de la mineralización, o de cualquier otro fenómeno en estudio.

El éxito de esta técnica es la determinación de la función de correlación espacial de los datos $Z=Z(E)$.

El Kriging es un método de interpolación que se utiliza para encontrar la forma más precisa de estimación posible $Z^*(X)$ a partir de la información disponible. Este valor estimado de un valor real y desconocido $Z(X)$, se obtiene como una combinación lineal de pesos asociados a cada X_i donde fue muestreado un valor $Z(X_i)$ ($i = 1, \dots, n$). Para realizar esta estimación se deben cumplir dos condiciones.

- A. El estimador debe ser insesgado, o sea $E[Z^*(X) - Z(X)] = 0$.
- B. La varianza $Var[Z^*(X) - Z(X)]$ es mínima, de este modo se logra minimizar la varianza de error de estimación, por lo que las variables se distribuyen en dirección Norte-Sur para el Ni, Fe y para el Co la distribución es omnidireccional.

A diferencia de otros métodos de interpolación, como p. ej. el inverso de la distancia, el kriging utiliza las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado, por lo que su uso implica un análisis previo de la

información con el objetivo de definir o extraer de esta información inicial un modelo que represente su continuidad espacial.

En ciertos puntos $\{P_1, \dots, P_n\}$ donde $P_i = (X_{i1}, \dots, X_{ik}) \in D \subseteq R^m$ se han medido los valores de una variable W y se han obtenido los valores aleatorio $W_i = W(P_i)$. Para poder estimar el valor de W_e en cierto punto P_0 debe realizarse primero lo que algunos autores llaman Análisis Variográfico (Matheron, G. (1971)) que no es más que la búsqueda de una función que exprese la relación que hay entre la distancia entre los puntos de D y la variabilidad de W y luego, teniendo en cuenta las características particulares del problema que resolvemos, estableceremos el tipo de kriging que se utilizará y así como sus respectivos parámetros (forma y dimensiones de los paneles, estrategias de búsqueda, tratamiento de los pesos negativos, etc.) para obtener el valor estimado W_e y el valor de la varianza de estimación σ_e^2 que indica el error probable que se comete al estimar.

Se comienza explicando la definición clásica de la estimación por kriging, cuando se supone que la variabilidad está expresada por el variograma $\gamma(h)$ o $g(h)$ y es una función de la distancia euclidiana h (Cuador Gil, José Quintín, 2002) en dependencia del método geoestadístico definida entre puntos del dominio D . La expresión analítica de este variograma usualmente se obtiene mediante el ajuste de uno o varios modelos teóricos a un variograma experimental y debe cumplir cierta restricción basada en la necesidad de que la varianza de cualquier estimación debe ser positiva.

Elementos básicos en la práctica del Kriging.

La práctica de la estimación por kriging tiene mucho de arte: Hay que conocer profundamente sus aspectos técnicos, es indispensable la práctica y además, es necesaria cierta dosis de inspiración. Todos los autores reconocen que lo primario es realizar un correcto análisis variográfico que consiste básicamente en determinar los siguientes elementos:

- Efecto pepita.
- Alcance.

- Meseta.
- Anisotropía.
- Zona de Influencia.
- Tipo de variograma.

Y teniendo en cuenta las características particulares del problema que resolvemos, establecer el tipo de kriging que se utilizará y así como sus respectivos parámetros (forma y dimensiones de los paneles, estrategias de búsqueda, tratamiento de los pesos negativos, etc.).

En la bibliografía enumerada al final de este trabajo (y en otras) han sido tratados profusamente las caracterizaciones y los procedimientos para determinar dichos elementos por lo que en esta exposición se concentra la atención en la influencia que tienen ellos y otros elementos, en el valor estimado W_e y en el valor de la varianza de estimación σ_e^2 .

Efecto Pepita: Desde el punto de vista numérico esta variable que generalmente se denota C_0 toma valores no negativos y en la medida que aumenta desde 0 hasta el valor de la varianza de los datos σ^2 , se tiene que:

1. Los valores de los pesos a_i tienden al valor $\frac{1}{k}$.
2. El valor estimado W_e tiende a la media aritmética de los datos $W(P_i)$ con $i=1,2,\dots,k$.
3. El valor de μ aumenta y tiende a $\frac{\sigma^2}{k}$.
4. El valor de σ_e^2 aumenta hasta $\frac{\sigma^2}{k}$ cuando se trata de kriging de bloque y hasta $\sigma^2 + \frac{\sigma^2}{k}$ cuando se trata de kriging puntual.

Alcance: Para un variograma simple y transitivo, en la medida que el alcance aumenta desde 0 hasta el valor de la mayor distancia entre dos puntos

pertencientes a los datos, se produce un cambio importante en el modelo de la variabilidad expresado mediante el variograma. Se tiene que:

- Para variogramas no decrecientes, al aumentar el alcance entonces disminuye el valor puntual del variograma para cada una de las distancias menores que el nuevo alcance. En la práctica esto significa que el valor de σ_e^2 disminuye cuando aumenta el alcance.
- Las variaciones de W_e en general no están correlacionadas con los cambios del valor del alcance. Para valores relativamente altos del alcance con respecto a las distancias entre los puntos relacionados con una estimación, los cambios del alcance definen pocas variaciones en el valor de W_e .

Cuando se trata de variogramas anidados entonces los cambios en el alcance de cualquiera de las estructuras que lo forman producen efectos análogos si se ha considerado una anisotropía global.

Meseta: En el caso de variogramas simples, permaneciendo invariables el resto de los elementos que analizamos, al aumentar el valor de la meseta:

- Permanece constante el valor estimado W_e .
- Aumenta el valor de la varianza de estimación σ_e^2 .

Para variogramas anidados no permanece constante el valor de W_e .

2.9. Kriging Ordinario

El Krigeage de bloques es similar al Kriging puntual, con la diferencia de que el valor calculado se le asigna a un bloque y no a un punto, el cálculo es simple y se basa en la determinación del valor de n puntos de discretización distribuidos regularmente en el bloque, al que se le asigna el valor medio del mismo.

Este método es conocido como método geoestadístico o método de krigeage, el cual ha desarrollado un gran número de variantes del Kriging, pero en su esencia consiste en estimar el valor de una variable regionalizada en un punto o

volumen a partir de unos factores de ponderación que funcionan de forma semejante a como lo hace en el inverso de la distancia.

Este valor se caracteriza por ser el mejor estimador lineal insesgado; los factores de ponderación se determinan de forma tal que la varianza de estimación es mínima; lineal porque es una combinación lineal de la información; insesgado porque la esperanza matemática del error es nulo (considerando como error la diferencia entre el error real y el estimado). Los factores de ponderación se calculan a partir de un sistema de ecuaciones conocidas como ecuaciones de kriging, donde las incógnitas para resolver el sistema se obtiene a partir del variograma modelado.

2.10. Las variables regionalizadas (VR).

En 1965 el matemático francés Matheron, conocido como el padre de la geoestadística define el concepto de la variable regionalizada de la siguiente manera: “Dans un grand nombre d’activités humaines, notamment dans les sciences de la terre, l’art de mines, etc ... on s’intéresse à la répartition dans l’espace de certaines grandeurs, que nous appellerons, d’un terme général, des variables régionalisées...”

La VR es aquella que caracteriza cualitativa y cuantitativamente un fenómeno en tiempo y/o espacio con estructura de autocorrelación, dicho de otra manera, es aquella cuyo valor en un punto dentro de un yacimiento es función de su magnitud y de su soporte (volumen, forma y orientación).

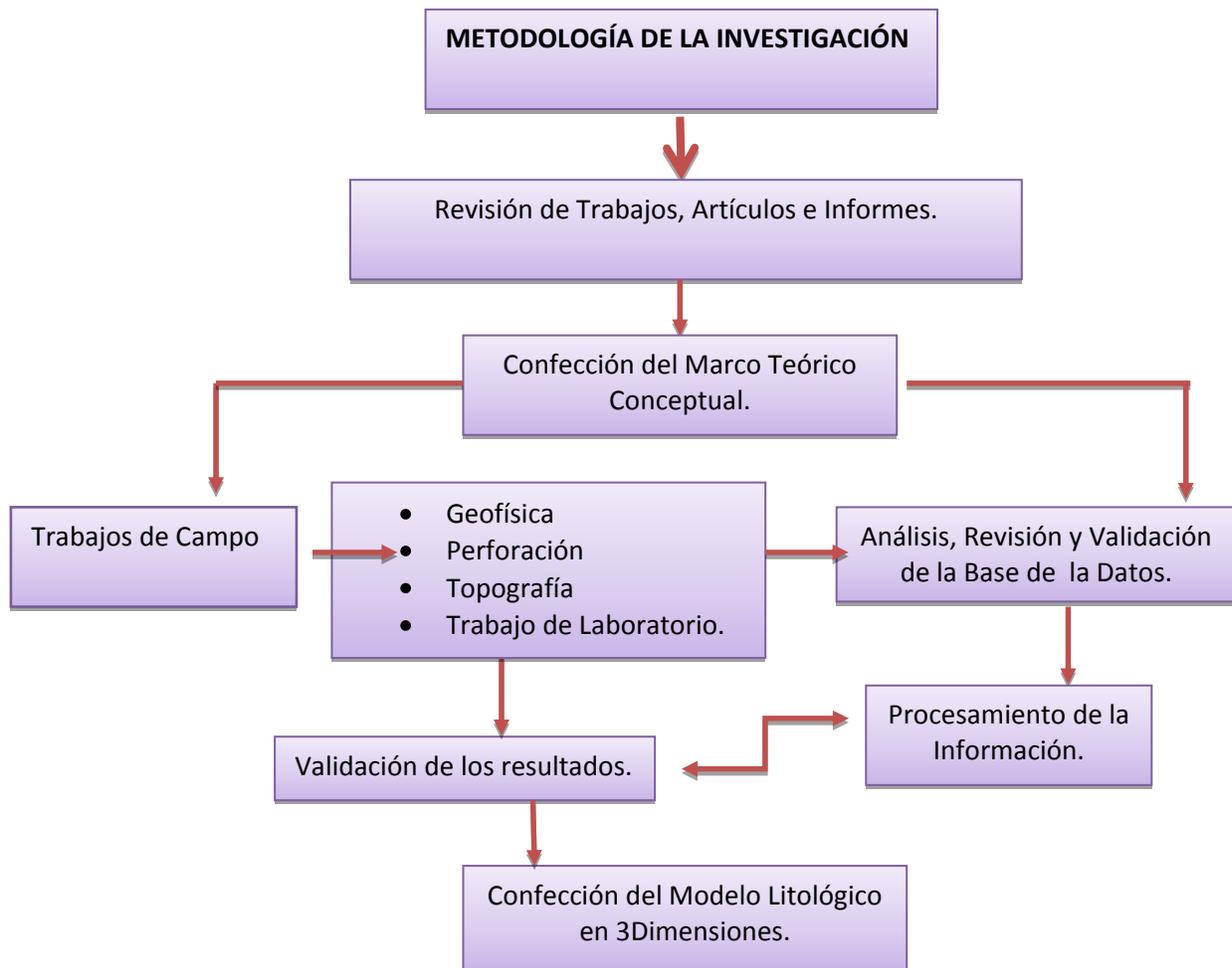
De lo anteriormente planteado se deduce que las VR no son más que aquellas variables, usualmente utilizadas en la vida práctica (Ni, Fe, Co, Etc.) que se caracterizan por tener un carácter aleatorio y a su vez tener una estructura definida en una región determinada en el espacio, regida por sus propiedades y fenómenos geológicos que la controlan; esta estructura generalmente tiene un sentido geológico por lo que la convierte en una herramienta poderosa en la modelación de un yacimiento

Como puede apreciarse claramente es importante la utilización de la VR para definir los diferentes campos geométricos donde estas se desarrollan en el espacio, esto es en esencia la determinación o mejoramiento del modelo geométrico. La VR permite a su vez determinar las características que tendrá el modelo matemático; es decir, el tamaño y forma de los bloques, la anisotropía de los datos, tiene gran influencia en la determinación de los valores de cada uno de los bloques del modelo matemático independientemente de su naturaleza, determinados estos por estimación y modelación.

Es importante destacar que para realizar esto es necesario tener muy en cuenta las otras partes del modelo geológico, pues la VR por sí sola no permite determinar las características de cualquiera de los sub-modelos de forma correcta, si no que la determinación de los componentes del modelo geológico se realiza de forma interactiva entre las VR y el resto de los sub-modelos (Geológico, geométrico y matemático).

2.11. Metodología de la investigación

Para la confección del modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste se llevaron a cabo las siguientes etapas: preliminar, trabajos de campo, laboratorio, gabinete donde se llevó a cabo el procesamiento de la información para la creación del modelo litológico.



2.11.1. Preliminar

En esta etapa se hizo una recopilación de toda la información existente de la materia a investigar, se realizó una búsqueda bibliográfica en el centro de información del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa sobre el área de estudio, así como trabajos precedentes relacionados con el tema. Se consultaron artículos científicos, trabajos de diplomas, tesis de maestría y doctorales, libros, revistas. Se realizaron búsquedas en sitios de internet. Desarrollando el marco conceptual con toda la información geológica. Con toda la información recopilada se desarrolló el marco teórico conceptual.

2.11.2. Trabajos de Campo

Los trabajos se iniciaron en noviembre del 2002 con el estudio de redes, se realizaron (5 perfiles a perforar, de ellos 2 en dirección Norte Sur y 3 perfiles en dirección Este Oeste), los pozos de los mismos se ubicaron a 16.0 metros unos de otros, apoyándonos además en geofísica de superficie a un promedio dentro de la red de perforación de 8.0 metros

Para el estudio de las características del Yacimiento se llevó a cabo el siguiente complejo de métodos.

- Perforación Hollow Auger en corteza y Holow Auger – integral hasta 2m de basamento.
- Documentación macroscópica durante perforación.
- Toma de muestra mineralógica.
- Análisis granulométrico por vía húmeda usándolos tamices 0.80; 0.30; 0.15; 0.074 y 0.044mm.
- Separación de las clases granulométricas por sus propiedades magnéticas mediante la utilización del imán de mano.
- Análisis químico con las siguientes determinaciones; Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , NiO , CoO , FeO_{Cr} , Na_2O , K_2O y PPI.
- Análisis mineralógico óptico
- Recálculo químico mineralógico de la muestra global.
- Recálculo químico mineralógico por clases granulométricas.

2.11.3. Resultados del estudio petrográfico del yacimiento Yagrumaje Oeste.

Para estudio del basamento fueron seleccionados 10 bloques en cada uno de los cuales se realizó un pozo de perforación mineralógico con toma de muestra para estudio petrográfico. Esta selección se realizó con el objetivo de conocer las características petrográficas de sus rocas y a las muestras seleccionadas se le realizó sección delgada y análisis químico de 13 determinaciones. Los pozos seleccionados para la investigación están ubicados de forma tal que son

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

representativos de toda el área y en ellos se determinó la presencia de Serpentinitas por Harzburgitas y Harzburgitas Serpentinizadas, con predominio de las primeras.

Tabla N°.2 Relación de pozos muestreados y sus correspondientes coordenadas.

N°.	Pozo	Muestra	X	Y	Z	Cantidad Muestras
1	165217	216205	703119.99	217646.20	269.03	1
2	175047	216210	702515.44	217250.34	244.43	1
3	155182	216216	702650.44	217716.77	239.72	1
4	155069	216223	702583.44	217782.92	245.31	1
5	165004	216229	702415.97	217683.00	237.49	1
6	155202	216237	702952.75	217983.77	238.32	1
7	144907	216244	702216.07	218283.44	192.67	1
8	134787	216251	701616.62	218316.81	179.10	1
9	144739	216257	701683.86	218183.21	194.12	1
10	154638	216261	701350.30	217880.51	202.56	1

Características petrográficas de las rocas del basamento.

Tabla N°.3 Variedades de rocas estudiadas en el Yacimiento.

No.	Tipo de roca	Cantidad Muestra
1	Harzburgita Serpentinizada	4
2	Serpentinita por Harzburgita	6
Total		10

2.11.4. Trabajos topográficos

Para los trabajos topográficos este proyecto se dividió en tres sectores a los cuales se les llamó Oeste; Este y Ampliación, los que se trazaron, levantaron y amarraron de forma independiente por tener divisiones naturales como el echo del rio Yagrumaje circula el oeste de la zona este, el este de la zona oeste, el sur de la Ampliación y además la línea de alta tensión separa la zona de este de la Ampliación.

Para la realización de estos trabajos se llevaron a cabo 5 etapas de trabajo:

1. Trabajos realizados en la creación de la red de apoyo.
2. Trazado de líneas y replanteo de labores.
3. Amarre de labores
4. Levantamiento topográfico (taquimétrico)
5. Trabajos de gabinete

2.11.5. Trabajos Geofísicos

Para dar cumplimiento a la tarea geológica propuesta, se realizaron los métodos geofísicos, sondeo eléctrico vertical de polarización inducida (SEV-PI) y mediciones de susceptibilidad magnética (SM) a muestras de pozos, con los objetivos de determinar:

1. Potencia y extensión de la corteza de intemperismo
2. Determinación de la susceptibilidad magnética (SM) como un parámetro más para la evaluación integral de las menas

A solicitud del cliente (ECCG), teniendo en cuenta como experiencia los resultado del método de magnetometría empleada en los trabajos recientes en yacimientos lateríticos este se incorpora al complejo de métodos realizados, con el objetivo de:

1. Aumentar el grado de conocimiento de la tectónica del yacimiento.

2.11.6. Metodología de los trabajos de campo

Se midió la SM a 17 980 muestras de pozos de 200 gramos de peso, secas y pulverizadas, tomadas a intervalos de un metro, la red de perforación fue de 33 x 33m y 23 x 23m en el sector denominado ampliación. A cada muestra se le realizaron 6 mediciones, promediándola con el objetivo de lograr una buena caracterización. Los equipos utilizados fueron el KT-6 de fabricación checa, portátil y digital y los controles con el equipo IMV de fabricación soviética

Para el método de magnetometría se utilizó el magnetómetro protónico MP-2 de fabricación checa que mide el campo Total "T", el paso de medición utilizado fue de 8 m por itinerarios. Se controló el equipo diariamente en el punto de control antes y después de las mediciones de campo. Estas mediciones no abarcaron la totalidad del área, por la rotura del único equipo disponible, siendo imposible su arreglo en el tiempo establecido por los trabajos de campo.

Para las mediciones de SEV-PI se utilizó el equipo Saris de fabricación canadiense, el cual da directamente la cargabilidad y resistividad aparente, dada en mv/v y en Ωm respectivamente.

La calidad de las mediciones se controló repitiendo el 10% y 3% de los puntos medidos para SM t SEV-PI respectivamente y el error de las mismas se evaluó con la fórmula del error relativo, el cuál en ningún caso excedió el error permisible.

El procesamiento estadístico de la información se realizó con los software profesionales Statist y Excel, incluyendo el cálculo de los estadígrafos centrales y del coeficiente de variación, análisis de correlación.

Tabla No .4 Volúmenes de los trabajos

Método	Mediciones		
	PFO	PFC	PFT
Susceptibilidad Magnética	17980	1800	19780
Sev-PI	2622	79	2701
Magnetometría	22.2km	-----	-----

2.11.7. Trabajos de perforación

Se perforaron 10 pozos mineralógicos por el método Hollow Auger con diámetro de 89 mm, colectándose un total de 61 muestras, las mismas fueron sometidas a un conjunto de métodos, de los cuales, los utilizados para la identificación y descripción de los minerales fue análisis mineralógico óptico y recálculo químico mineralógico. Como resultado de este estudio se confirmó el predominio de la mena LB y de la goethita como fase mineralógica principal portadora de Ni.

2.11.8. Toma de las muestras

Para realizar el estudio de la composición sustancial del yacimiento se tomaron 51 muestras mineralógicas en pozos de perforación, las cuales están distribuidas en 10 bloques y en todo el perfil litológico.

2.11.9. Procesamiento de la información

Base de datos

En la base de datos utilizada se encuentran las tablas con las coordenadas nacionales de la boca de los pozos, la información de todos los análisis químicos, los pesos volumétricos, etc..., las cuales fueron, editadas, revisadas y ajustadas a un formato asimilable. La base de datos cuenta con 4884 pozos, de ellos, el 99.04% fueron perforados en la red de 33.33 x 33.33 m y los 0.96% restantes fueron perforados en la red de 23.5 x 23.5 m. La base de datos cuenta con 33,355.50 m perforados de los mismos se recuperaron 34,210.00 muestras las cuales fueron usadas para la creación del modelo litológico.

Estructura de los ficheros que conforman la base de datos

Se prepararon ficheros en formato ASCII, quedando conformada la base de datos con la siguiente estructura:

HEADER: Identificación del pozo (HOLE-ID), Coordenadas de la boca de los pozos (X, Y, Z), profundidad de perforación (LENGTH).

ASSAYS: Hole-ID, desde (FROM), hasta (TO), longitud de muestreo (LENGTH), contenidos químicos de Fe, Ni, Co, Al, SiO₂, Mg, peso volumétrico por muestra

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

(PVM), susceptibilidad magnética (SM), código de las menas (MENA), litología (LITO), descripción litológica (DESCRIP), código litológico (LITOCOD).

CAPÍTULO III. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Estructura y morfología del yacimiento.

El área en cuestión se compone mayormente por menas limoníticas con amplia difusión en los ocres inestructurales no perspectivas para la minería que rellenan el espacio entre los cuerpos minerales, constituyendo áreas prácticamente estériles. Las menas saprolíticas se ubican casi totalmente en la parte periférica oriental del yacimiento contribuyendo notablemente al potencial menífero de los correspondientes cuerpos minerales. En el resto del área se presentan aisladamente en forma de pequeñas manchas de forma irregular, por lo que no juegan un papel preponderante en el tonelaje.

1.9. Potencia, estructura y morfología

Los valores menores de potencia de la corteza (< 5 m) y por ende de mineral LB+SB (< 3 m), que se ubican entre los núcleos de alta potencia, provocan el acuñaamiento y separación de los cuerpos minerales. El coeficiente promedio de mineralización es de 98.81 % dentro del área de los cuerpos minerales, lo que denota una alta continuidad de la capa de menas (LB principalmente), mientras que fuera de los cuerpos minerales en las áreas no perspectivas es de 40.1%. A estas características, hay que añadir la discontinuidad debido a la presencia de afloramientos (sin corteza), aunque la causa principal de la gran difusión de pozos no minerales se debe a la presencia de los ocres inestructurales.

El área en cuestión se compone mayormente de perfiles litológicos lateríticos, con amplia difusión de los ocres inestructurales no perspectivas para la minería que rellenan el espacio entre los cuerpos minerales, constituyendo áreas prácticamente estériles. Los perfiles laterítico-saprolíticos se ubican casi totalmente en la parte periférica oriental del área de Yagrumaje Oeste contribuyendo notablemente al potencial menífero de los cuerpos minerales correspondientes. En el resto del área, ellos se presentan aisladamente en forma de manchas pequeñas de forma irregular, por lo que no juegan un papel preponderante en el tonelaje menífero de sus localidades.

La morfología de la corteza de intemperismo y del depósito mineral LB+SB, así como la distribución espacial de los valores altos de potencia de los cuerpos minerales se ubican solamente dentro de las áreas de mayor potencia de la corteza (> 5 m), resultando

prácticamente estériles o no perspectivas para la minería las zonas con baja potencia, destacándose los cuerpos minerales YO1, YO2, YO3, YO5, YO6 y YO7, con altas potencias de mineral entre 10 m y 25 m por pozo y que forman áreas compactas muy perspectivas para la minería. En la actualidad todos esos cuerpos están en explotación en mayor o menor medida.

Los mayores valores de Ni en el mineral se hallaban sólo muy localmente formando sectores continuos dentro de los cuerpos minerales YO2, YO5 y YO7.

Los valores altos de contenido de Fe (48.0 % - 60.0 %) en el mineral se observan principalmente en el cuerpo mineral central YO1 y amplios sectores del YO3, mientras que hacia la periferia del área los valores de Fe son menores (45.0 % - 48.0 %), encontrándose los menores valores (40.0 % - 45.0 %) en los cuerpos donde se observan las mayores concentraciones de la mena SB. En sentido general este yacimiento presenta contenidos elevados de hierro (mayores de 40 %).

El contenido de Co se comporta proporcional a las regularidades de la distribución del Fe, lo que se explica por su mayor asociación a la laterita donde predomina el contenido de Fe y manganeso, a los cuales se asocia el cobalto.

3.2. Características litológicas del Yacimiento.

El estudio del comportamiento litológico de las muestras en el perfil laterítico se realizó mediante el análisis de las clases granulométricas 0.80; 0.30; 0.15; 0.074; 0.044 y < 0.044 mm para determinar su composición granulométrica y química. Para la composición mineralógica y distribución magnética se tuvieron en cuenta las clases 0.30; 0.15 y 0.074 mm.

La corteza de intemperismo del Yacimiento Yagrumaje Oeste se ha desarrollado mayoritariamente a partir de rocas ultrabásicas serpentinizadas, éstas por lo general son de color verde oscuro a verde claro, masivas, constituidas en su mayoría por minerales del grupo de la serpentina los cuales conforman una textura serpentínico- reticular- nodular que bordea los relictos de olivino que quedan en la roca, e hipidiomorfa granular conformada por los ortopiroxenos bastitizados. Contienen además magnetita, cromita y óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso entre otras mineralizaciones.

3.3. Características de las menas en el Yacimiento Yagrumaje Oeste

Las condiciones de cálculo industrial para la clasificación de las menas del Yacimiento se establecieron para Ni = 1.0, 0.9, 0.8 %.

El aumento o disminución de la cantidad de menas en cada zona litológica está determinado por la variación del níquel desde 1.0 hasta 0.8 %, siendo esta última variante donde se agrupa la mayor cantidad de menas de balance (LB), con 64.7 %.

3.3.1. Mena Laterítica de Balance (LB)

Se localiza en toda la zona de los ocres con una profundidad aproximada desde 0.70 hasta 15.40 m, su concentración es predominante en la zona de los Ocres Estructurales Finales (OEF). En la parte superior del corte tienen una coloración parda rojiza y son deleznales, al avanzar en la profundidad la coloración se hace más amarillenta, algunas tienen aspecto pastoso. En estas menas existe predominio de las partículas finas (≤ 0.044 mm), siendo el promedio para las tres variantes en los OEF de 81.6 a 82.1 %, en el resto de los horizontes los valores elevados en la clase más gruesa (≥ 0.80 mm) se debe a las concreciones de hierro que se encuentran incrustadas o en intercalaciones en la masa mineral y a los pequeños fragmentos de Serpentinita.

Tabla N^o 4 Contenidos promedios (%) mena LB

Mena LB	≤ 0.044 mm (%)			
	OICP	OI	OEF	OEI
V 1.0	-	83.7	81.8	66.5
V 0.9	-	73.9	82.1	49.1
V 0.8	45.8	76.0	81.6	49.1

Los minerales más electromagnéticos se acumulan en los OEI en la clase 0.15 mm con valores que van desde 67.4 a 80.9 %, y los magnéticos en el horizonte de los OI y OEF. (Ver Tabla 5)

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

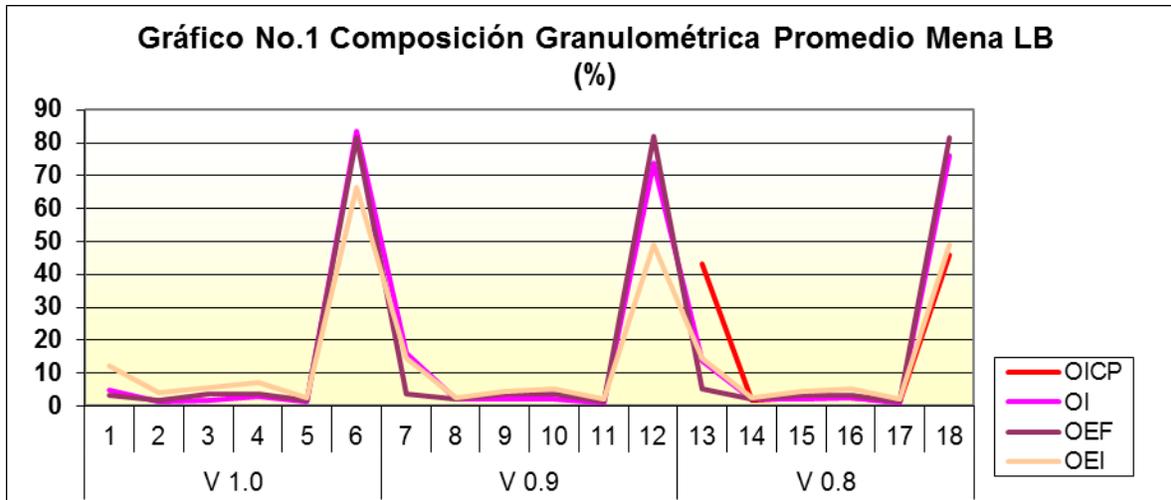
Tabla N°.5 Distribución Magnética Promedio por variantes de cálculo mena LB (%).

LB	OICP			OI			OEF			OEI		
	0.30	0.15	0.074	0.30	0.15	0.074	0.30	0.15	0.074	0.30	0.15	0.074
Fracción Electromagnética												
1.0				49.3	34.7	36.0	39.5	31.7	31.7	75.0	67.4	52.4
0.9				47.7	21.6	16.8	17.6	24.5	19.4	42.8	80.9	75.6
0.8	26.0	32.9	31.1	35.4	22.0	17.5	17.1	23.2	18.5	42.8	80.85	75.6
Fracción Magnética												
LB	OICP			OI			OEF			OEI		
	0.30	0.15	0.074	0.30	0.15	0.074	0.30	0.15	0.074	0.30	0.15	0.074
1.0				50.7	65.3	64.0	60.4	61.2	68.2	25.0	32.6	47.6
0.9				9.9	21.9	29.4	19.2	43.3	42.7	11.9	29.0	50.7
0.8	8.8	21.2	19.2	11.5	22.9	34.4	19.5	42.1	43.0	11.9	28.95	50.65

Las menas LB están compuestas en más del 50 % por Fe₂O₃ y en correspondencia la fase mineralógica fundamental es la goethítica con valores superiores al 37 %. (Ver tabla N°6)

Tabla N°.6 Composición Mineralógica Promedio por variantes de cálculo mena LB (%).

LB	OICP			OI			OEF			OEI		
	1.0	0.9	0.8	1.0	0.9	0.8	1.0	0.9	0.8	1.0	0.9	0.8
MinSerp	-	-	3	3	3	3	4	4	4	15	11	11
MinArc	-	-	8	8	7	8	9	9	8	16	14	14
Gibbsita	-	-	11	9	9	9	9	9	9	8	8	8
Goethita	-	-	53	54	54	54	51	52	52	37	42	42
Magnetita	-	-	6	6	6	6	6	6	6	4	4	4
Cromita	-	-	8	8	8	8	9	9	8	11	10	10
MinMang	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hematita	-	-	6	6	6	6	6	6	6	4	5	5
Cuarzo	-	-	T	T	T	T	1	1	1	1	1	1
Maghemita	-	-	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4



Variante	0.080 mm	0.30 mm	0.15 mm	0.074 mm	0.044 mm	< 0.044 mm
V 1.0:	1	2	3	4	5	6
V 0.9:	7	8	9	10	11	12
V 0.8:	13	14	15	16	17	18

3.3.2. Mena serpentínica de balance (SB)

Se localiza en la zona de los Ocreos Estructurales Iniciales con una profundidad aproximada desde 7.0 hasta 9.80 m. Tienen una coloración que va desde pardo amarillento hasta verdoso, son semicompactas. Estas menas tienen como promedio el 66.7 % de sus partículas de tamaño ≤ 0.044 mm, en algunas muestras la clase más gruesa alcanza el 18.2 % debido a los pequeños fragmentos de serpentinita.

En todas las clases granulométricas son electromagnéticas en más del 66 %, los minerales más electromagnéticos por lo general se acumulan en la clase ≥ 0.30 mm, están compuestas en un 38.40 % por Fe_2O_3 , SiO_2 en 23.2 % y MgO en un 16.0 %, en correspondencia la fase mineralógica fundamental es la goethítica con 32 %, seguida de los minerales de serpentina con promedio de 18.7 %, el óxido de aluminio alcanza valor medio de 5.1 % y está asociado fundamentalmente a los minerales arcillosos (18 %).

3.3.3. Mena laterítica fuera de balance (LF).

Se corresponde con la parte superior de la zona de los ocres, desde los OICC hasta los OEI, a una profundidad entre 0.8 y 14.0 m, es mayoritaria la clase < 0.044 y existe predominio de los minerales electromagnéticos, la fase mineralógica principal es la goethita y en correspondencia se presentan los mayores valores en el Fe₂O₃.

Tabla N°.7 Composición Mineralógica Promedio por variantes de cálculo mena LF (%)

Composición Mineralógica					
	OICP	OI	OEF	OEI	RMF
Min. Serpentina	3	3	4	13	-
Min. Arcilloso	8	8	8	14	-
Gibbsita	13	10	9	8	-
Goethita	51	54	52	40	-
Magnetita	6	6	6	4	-
Espinela Cromífera	8	8	8	10	-
Min. Manganeseo	1	1	1	1	-
Hematita	6	6	6	4	-
Cuarzo	T	T	1	1	-
Maghemita	5	5	5	4	-

Tabla N°.8 Composición Granulométrica Promedio Mena LF (%)

Composición Granulométrica					
	OICP	OI	OEF	OEI	RMF
0.80 mm	52.7	16.8	6.1	15.4	-
0.30 mm	4.6	2.4	2.3	3.0	-
0.15 mm	3.3	2.3	3.3	4.0	-
0.074 mm	2.7	2.8	3.3	4.0	-
0.044 mm	1.1	1.1	1.1	1.7	-
<0.044 mm	33.7	71.9	79.7	58.6	-

3.4. Clasificación y características generales de los diferentes horizontes litológicos.

3.4.1. Ocre estructural inicial (OEI).

Son de color pardo amarillento con tonalidades verdosas, se observan relictos de la estructura de la roca madre, en ocasiones presentan intercalaciones de serpentinita desintegrada y fragmentos de serpentinita dura. Se observan vetillas de minerales de manganeso, óxidos e hidróxidos de Hierro. Se localizan entre 7.0 y 14.0 m.

En este horizonte predomina la granulometría ≤ 0.044 mm, los minerales son fundamentalmente electromagnéticos, siendo mayor su concentración en los tamaños de grano ≥ 0.30 mm, los minerales más magnéticos se concentran en la clase ≥ 0.074 mm.

La fase mineralógica principal es la goethítica, en menor proporción minerales arcillosos y minerales del grupo de la serpentina.

En este horizonte, la sílice presente es fundamentalmente constitucional y está asociada a los minerales de serpentina y del tipo arcilloso, el Al_2O_3 se relaciona con los minerales arcillosos y en menor proporción con las espínelas cromíferas y la gibbsita, el MgO tiene aquí sus mayores concentraciones y está asociado a los minerales del grupo de la serpentina.

En este horizonte están relacionadas menas del tipo FF, LB, LF y RE con predominio de las SB.

3.4.2. Ocre estructural final (OEF).

Son de color pardo amarillento, aunque en ocasiones es pardo oscuro (rojizo), semicompacto, en ellos se observa de forma muy discreta la estructura relíctica de la roca madre, finas vetillas de minerales de manganeso, óxidos e hidróxidos de hierro. Se localizan entre 1.50 y 15.4 m.

Es el horizonte de granulometría más fina predominando los tamaños de grano ≤ 0.044 mm, los minerales son más magnéticos y se concentran en la clase ≥ 0.074 mm, los electromagnéticos se acumulan más en la clase ≥ 0.30 mm.

La fase mineralógica principal es la goethítica, en menor proporción la gibbsita y minerales arcillosos.

La sílice presente está asociada a los minerales de serpentina y del tipo arcilloso, el Al_2O_3 se relaciona con la gibbsita, la espínela cromífera y en menor proporción a los minerales arcillosos, el MgO está asociado a los minerales del grupo de la serpentina.

En este horizonte están relacionadas menas del tipo FF, LB y LF, con predominio las LB.

3.4.3. Ocre inestructurales sin concreciones de hierro (OI).

Su color es pardo claro, por lo general semicompacto, presenta puntos de color negro (mineralización de cromo espínela). Se localizan entre 0.0 y 4.50 predomina la granulometría ≤ 0.044 mm, los minerales con tamaño de grano entre 0.30 y 0.15 mm son fundamentalmente electromagnéticos, siendo mayor la concentración en la clase ≥ 0.30 mm, los minerales ≥ 0.074 mm tienen tendencia a ser más magnéticos. La fase mineralógica principal es la goethítica, en menor proporción la gibbsita, espínelas cromíferas y minerales del tipo arcilloso.

La sílice presente está asociada a los minerales de serpentina y del tipo arcilloso, el Al_2O_3 se relaciona con la gibbsita, la espínela cromífera y en menor proporción a los minerales arcillosos, el MgO está asociado a los minerales del grupo de la serpentina. En este horizonte están relacionadas menas del tipo FF y LB, con predominio de las LB.

3.4.4. Ocre inestructurales con concreciones de hierro (OICP).

Su color es pardo oscuro (rojizo), deleznable, los perdigones ocupan como promedio el 35 % de la masa mineral, con diámetro varía entre 0.5 mm hasta 2 cm, en ocasiones se observan fragmentos de coraza de hierro, presentan óxidos e hidróxidos de hierro y escasa mineralización de manganeso. Se localizan entre 0.0 y 6.0 m. Aproximadamente el 52.7 % de sus partículas es ≥ 0.80 mm y el 33.7 % ≤ 0.044 mm siendo sus minerales muy electromagnéticos. La fase mineralógica principal es la goethítica, en menor proporción la gibbsita y espínelas cromíferas. La sílice presente está asociada a los minerales de Serpentina y del tipo arcilloso, el Al_2O_3 se relaciona con la gibbsita, la espínela cromífera y en menor proporción a los minerales arcillosos, el MgO está asociado a los minerales del grupo de la serpentina. En este horizonte están relacionadas menas del tipo FF y LB, con predominio las FF.

Gráfico No.2 Composición media de la Granulometría por Litologías (%)

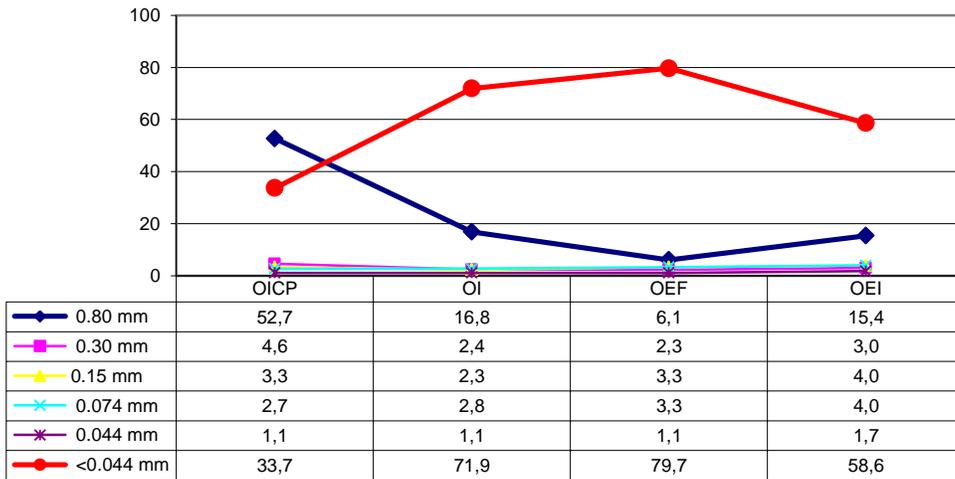
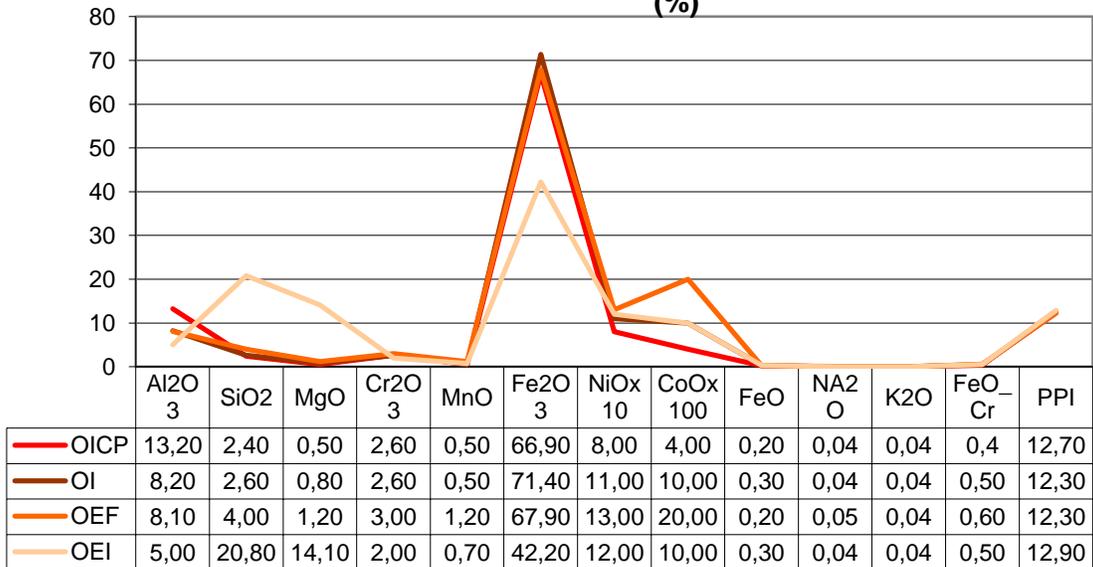
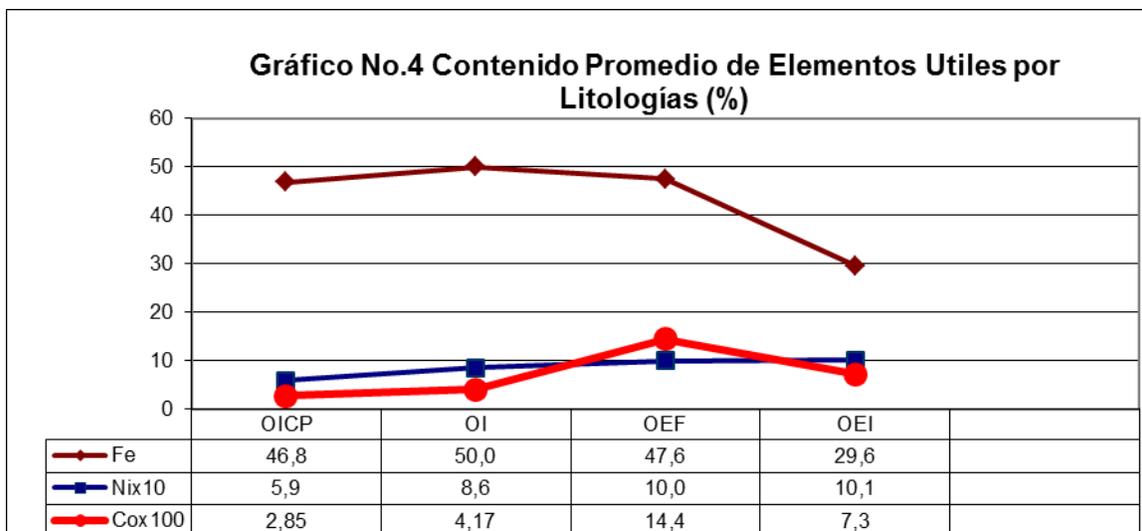


Gráfico No.3 Valor medio de la Composición Química por Litologías (%)





3.4.5. Análisis de las pendientes

El mapa de pendiente se categorizó en los siguientes rangos:

1. Ligeramente inclinados ($0^{\circ} - 5^{\circ}$) = ($0^{\circ} - 8.7^{\circ}$) %
2. Medianamente inclinados ($5^{\circ} - 10^{\circ}$) = ($8.7^{\circ} - 18^{\circ}$) %
3. Inclinados ($10^{\circ} - 15^{\circ}$) = ($18^{\circ} - 27^{\circ}$) %
4. Fuertemente inclinados a abruptos ($> 15^{\circ}$) = ($> 27^{\circ}$) %

El análisis se realizó **utilizando también como base el mapa topo figura del** yacimiento y se pudo observar la diferencia en los ángulos de las pendientes y la distribución de los mismos.

Están presente los cuatro rangos de pendientes seleccionados, se puede observar que los valores más bajos del orden $0-10^{\circ}$ (de ligeramente inclinados a Medianamente inclinados) se distribuyen por todo el yacimiento y siguiendo la dirección de los parteaguas que en este caso se presentan con un mejor comportamiento hacia la parte Noreste.

La distribución de las pendientes con valores del orden $10-15^{\circ}$ está en todos los sectores del yacimiento, coincidiendo con la dirección del río y en el área del nacimiento de arroyos y cañadas. El mayor desarrollo de este rango se encuentra en la parte Noroeste y centro del yacimiento. Estas superficies aplanadas juegan un papel controlador de las mayores potencias de corteza friable y del mineral de significación industrial (menas LB+SB).

Las mayores pendientes están poco distribuidas, las localidades de mayores pendientes del terreno ($>15^{\circ}$), están ubicadas en las orillas del río Yagrumaje y superficies inclinadas que

componen el sistema de arroyos y cañadas. Solamente aparecen pequeñas zonas donde la pendiente se encuentra por encima de los 30° , con mayor desarrollo en la parte Suroeste.

En general, podrán ser consideradas como zonas potencialmente inestables los que presentan relieves y paisajes con las siguientes características.

1. Zonas topográficamente elevadas y escarpadas.
2. Zonas de cárcavas.
3. Relieves con drenajes y cursos de agua meandriformes encajados.
4. Relieves escalonados y aterrazados

Lo anteriormente se refleja en las zonas expuestas a riesgos de movimiento del suelo como son:

- ✓ Zonas estables: áreas con pendientes menores de 5 por ciento, el riesgo de movimientos ligados a la naturaleza del suelo es nulo, sólo que si se exponen mucho tiempo a la meteorización y erosión serán afectados considerablemente formándose grietas y surcos.
- ✓ Zonas de inestabilidad potencial: corresponden a áreas con pendientes de $10-30^{\circ}$, con zonas con un riesgo potencial de movimientos superficiales.
- ✓ Zonas inestables: son áreas con riesgo real de inestabilidad, presencia de deslizamientos y movimientos superficiales.

Consideramos muy importante que la parte minera tenga en consideración el mapa de pendiente tanto a la hora de su planificación como en la selección del equipamiento minero, esto contribuirá de manera favorable en explotación más racional del yacimiento. (Ver figura No.2)

Los componentes nocivos SiO_2 y MgO se relacionan inversamente con la propagación de los valores de Fe, estando los valores más altos ubicados principalmente en la periferia del yacimiento y en algunos otros lugares dispersos con mayor potencia de saprolitas, relacionados con las menas SB.

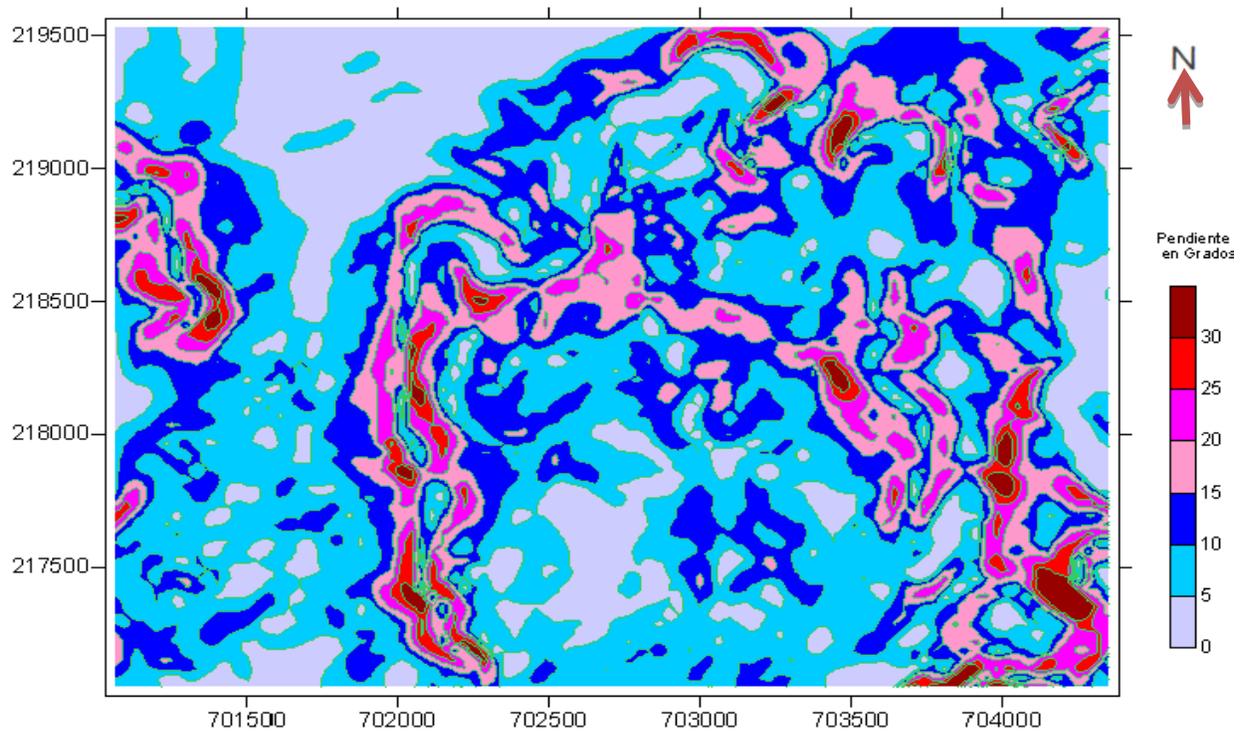


Figura N°.2 Mapa de pendiente.

3.5. Características de los parámetros, potencias y contenidos dentro del modelo.

Después de realizar la interpolación y estimación de las leyes en el modelo, realizamos las figuras de dispersión de los resultados obtenidos de cada elemento así como los de isocontenidos, donde pudimos apreciar lo siguiente:

El yacimiento se caracteriza por presentar poco volumen de escombro, los mayores valores de potencia (3 m) se encuentran poco difundidos, prevaleciendo estos en el cuerpo YO1. (Ver figura N° 3).

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

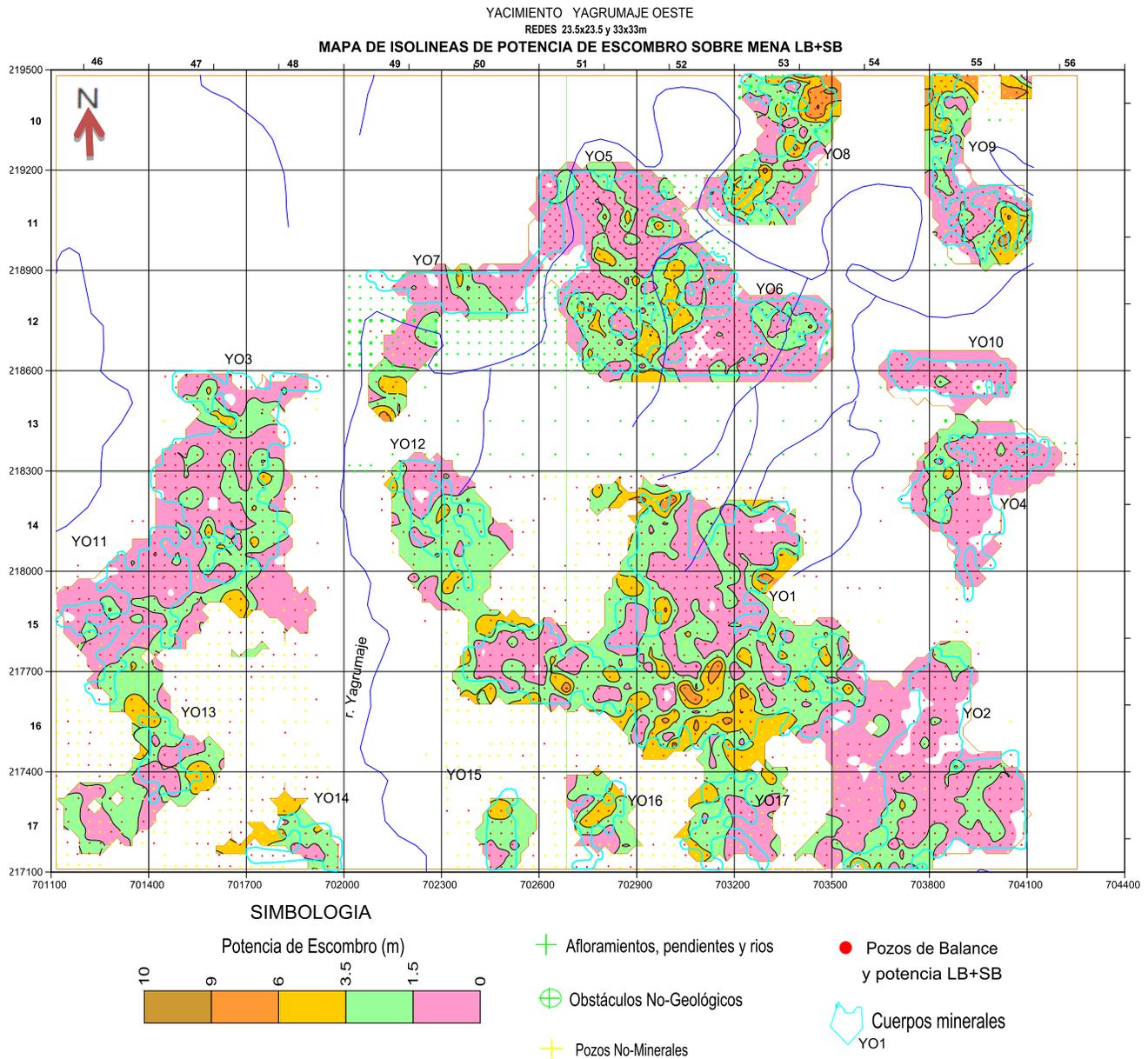


Figura N^o.3 Potencia de escombro.

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

Encontramos las mayores potencias de mineral (>6 m), en los cuerpos YO1, YO7 y YO8.
(Ver figura No.4)

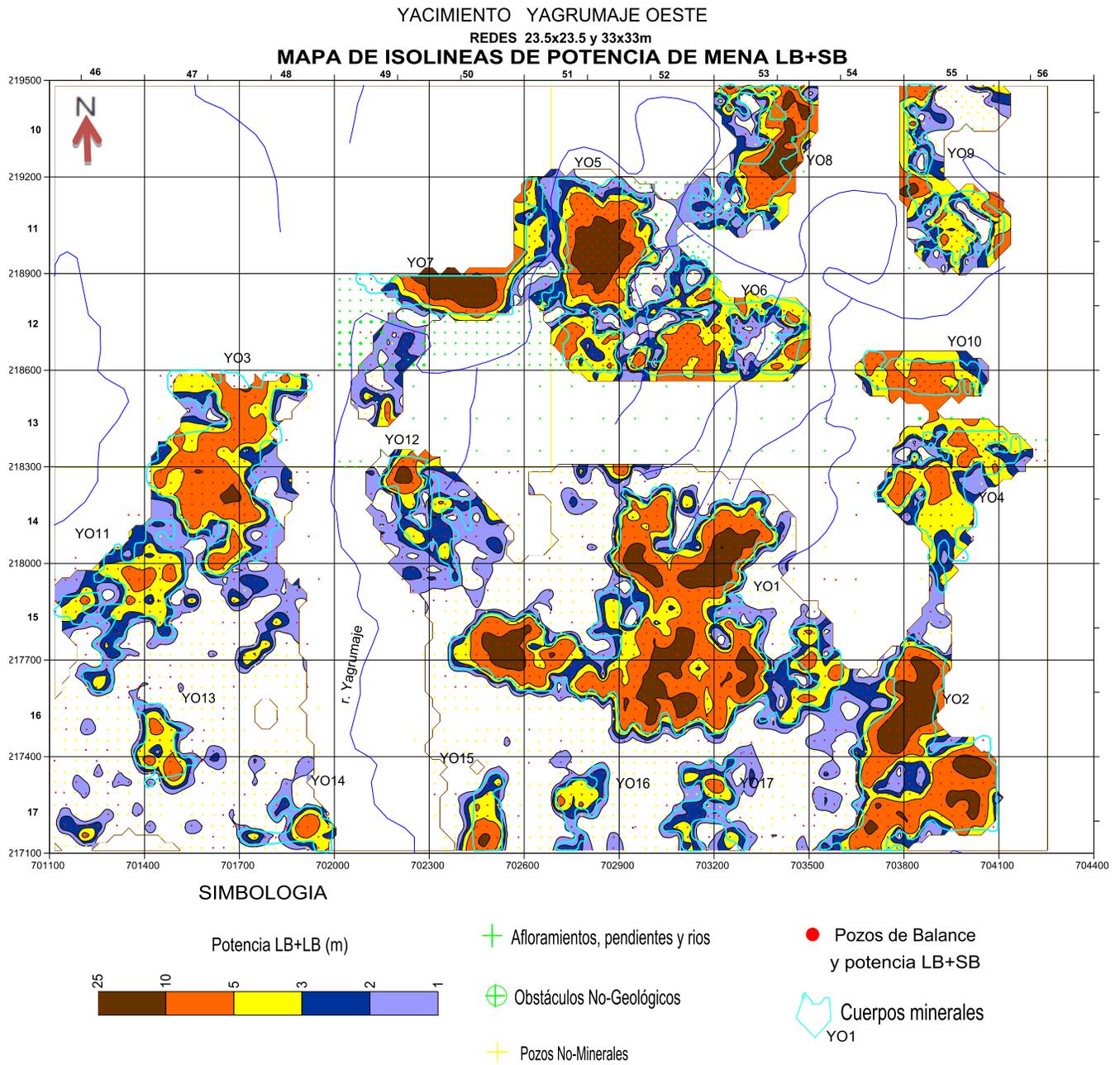


Figura N°.4 Potencia de mena LB+SB.

El Ni en el mineral se caracteriza porque la distribución de los valores bajos (0.90-1.10%) poseen mayor continuidad espacial en casi todo el yacimiento, sobretodo en el cuerpo YO1. En algunos cuerpos encontramos contenidos de Ni entre 1.15% y 1.25% de forma irregular, dispersos o continuos. Los mayores valores de Ni en el mineral (>1.25 %) se hallan sólo muy localmente, formando sectores continuos dentro de los cuerpos minerales YO2, YO5 y YO7.

En el escombro el valor promedio de Ni es de 0.80 %, prevalecen los de 0.7 a 0.9 % y en menor grado desde 0.5 a 0.8 % Ni.

El Fe se distribuye en el mineral de forma tal, que se observa un predominio de valores altos de Fe (mayores de 48 %) en la parte central del yacimiento, principalmente en el cuerpo mineral YO1 y partes del cuerpo YO3, mientras que hacia la periferia del área los valores son menores (45-48 %), encontrándose los menores valores (menores de 40 %) en la parte más periférica hacia el sureste (YO2) y hacia el norte (YO8 y YO9). En el escombro los valores de Fe entre 40 y 48 % se distribuyen de forma regular en casi todo el yacimiento, siendo el promedio de 44.77%.

El contenido de Co posee una distribución similar a la del Fe, lo que se explica por su mayor asociación a la laterita (perfiles lateríticos), donde predomina el contenido de Fe y manganeso, a los cuales se asocia el cobalto, los contenidos mayores de 0.150 % los encontramos fundamentalmente en el cuerpo YO1, YO3, YO5 y YO6.

El cobalto en el escombro presenta un promedio de 0.095 %, distribuyéndose de manera regular en casi todo el yacimiento los valores entre 0.050 % y 0.100 %.

La distribución de los componentes nocivos SiO_2 y MgO se relacionan directamente e inversamente con la difusión de los valores de Fe, aunque ambos forman un campo continuo más amplio de sus valores bajos ($\text{SiO}_2 = 2-5 \%$; $\text{MgO} < 2.5 \%$), estando los valores más altos ubicados principalmente en la periferia del área y en algunos otros lugares dispersos con mayor potencia de saprolitas, relacionadas con los perfiles laterítico-saprolíticos y las menas SB que en ellos se forman.

La distribución del Al_2O_3 está relacionado directamente con el Fe, los valores que más se destacan son entre 7 % a 10 %.

3.6. Análisis de los modelos

Con el estudio realizado en los capítulos anteriores en este yacimiento; se realizó una validación del modelo geotecnológico con el modelo geométrico litológico, geoméricamente se representan los límites entre las superficies de ambos modelos, el cual no presentó diferencias mayores a 0.5%.

Construcción de los modelos litológicos.

Modelamiento de las superficies.

Con el levantamiento topográfico inicial se creó la superficie topográfica inicial (Ver figura N°.4.), y con el fondo de las perforaciones se creó la superficie de fondo, dentro de estos límites se crearon las superficies donde limitan los principales diferentes tipos de las menas LB, SB_{AFe} y SB_{BFe}; la superficie del fondo de la LB, es la misma superficie del techo de la mena SB_{AFe}, el límite creado entre la mena SB_{AFe} es la misma superficie del techo de la mena SB_{BFe} esto se realizó seleccionando el último intervalo en los registros de perforación con los criterios asignados para cada tipo de mena. La superficie del fondo de perforación de cada pozo es la misma superficie de fondo de la mena SB_{BFe} (Ver tabla N°.9.).

Tabla N°. 9. Tipos de superficies geológicas.

Nombre			Descripción
Surface	Topo	Initial	Superficie topográfica inicial
Surface	Topo	Current	Superficie topográfica actual
Surface	Bottom	LB	Superficie de fondo de la mena LB
Surface	Bottom	SB _{AFe}	Superficie de fondo de la mena Alto Hierro
Surface	Bottom	SB _{BFe}	Superficie de fondo de la mena Bajo Hierro
Surface	Bottom	Litology from code 1 to 67	Superficie de fondo de cada horizonte litológico
Surface	Bottom	Drillhole	Superficie fondo de perforación

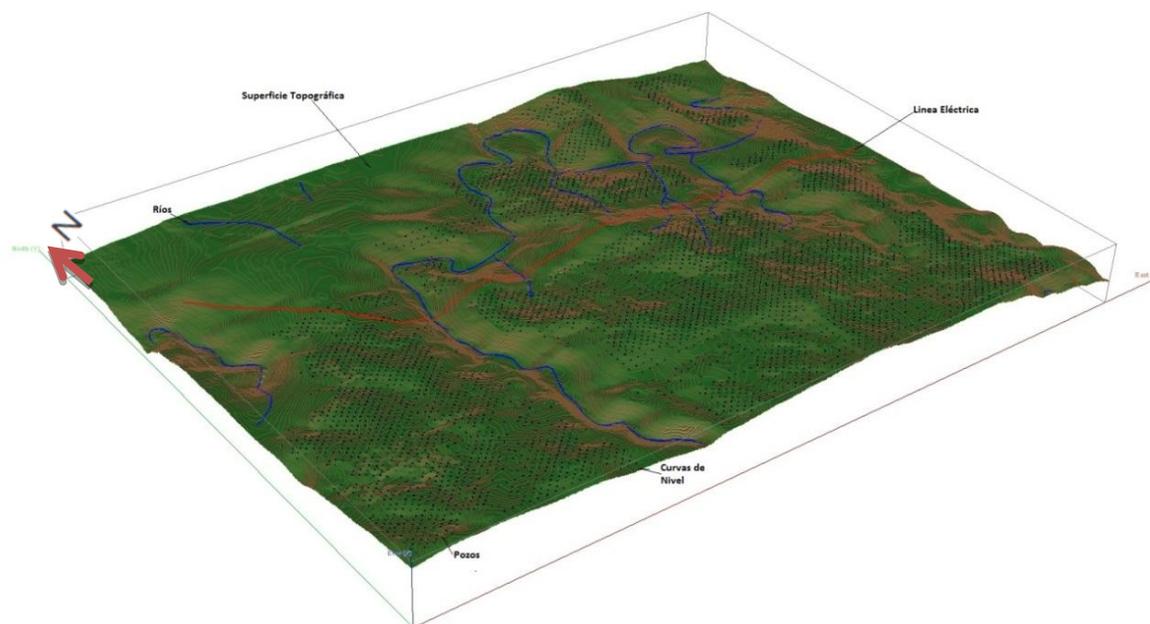


Figura N°.5. Superficie topográfica inicial en 3D.

Modelando litológicamente sobre la base de las observaciones y documentación geológica de muchos afloramientos, incluyendo cortes patrones y pozos básicos (ordinarios “donde aparecen los registros de perforación de la base de datos que el geólogo de campo documentó”) avanzados por redes de diferentes densidades (23.23×23.23 y 33.33×33.33) (Ver figura N°.4.), así como del estudio detallado de las paredes de los pozos criollos (Base de Datos). Se utilizaron los resultados de los análisis químicos, mineralógicos, granulométricos, de propiedades físicas (pesos volumétricos, humedad natural, etc.) y petrofísicas.

Las superficies de cada horizonte litológico se crearon teniendo presente cada código litológico, creando como límite el piso de cada una de las mismas hasta llegar a la superficie fondo de pozo (Ver figura N°.6, 8 y 12.). Usando el más reciente levantamiento del modelo digital del terreno suministrado por la Empresa Ernesto Che Guevara, se creó la superficie topográfica actual (Ver figura N°.6.).

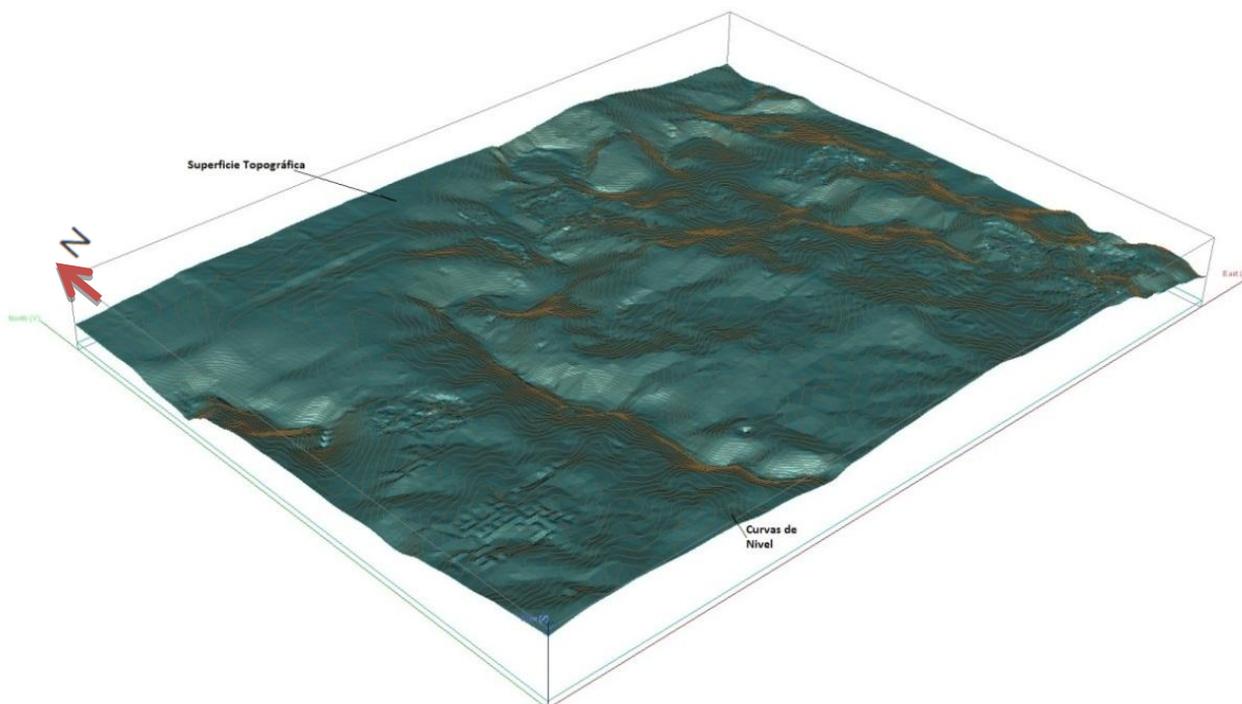


Figura N°.6. Superficie topográfica actual en 3D.

A partir del conocimiento de las condiciones litológicas y geomorfológicas la modelación se realizó teniendo en cuenta los diferentes tipos de menas. Se determinaron el fondo de cada una de las litologías presentes en el yacimiento, donde se observan los bruscos cambios litológicos a partir del Ocre estructural Inicial (OEI), los horizontes Roca madre lixiviada (RML), alterada y ocretizada (RML), Roca madre desintegrada y agrietada (RMA), Corteza por Mafitas (Gabro), Peridotita (P), Serpentinita (S) y Mafitas (RG) existe transición entre las mismas, en muchos sectores desaparecen como es el caso de la RML y Sp (Ver figura N°.12 y 13.).

En el yacimiento se representan diferentes tipos de litologías las cuales se muestran en una sección del perfil litológico 217141 NS (Ver figura N°.12). Las secuencias litológicas se representan desde la topografía inicial con la cual se han validado todas y cada una de las capas en el perfil, teniendo en cuenta los gráficos N°.2, 3 y 4 se observa que los OICP es la primera capa litológica presente en todo el yacimiento excepto en el sector Oeste hacia el centro del yacimiento al Oeste del Río Yagrumaje aflorando allí las capas litológicas de la (RD). En el yacimiento existen bruscos cambios litológicos lo cual no es típico en los yacimientos residuales de níquel. (Ver figura N°.12.).

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

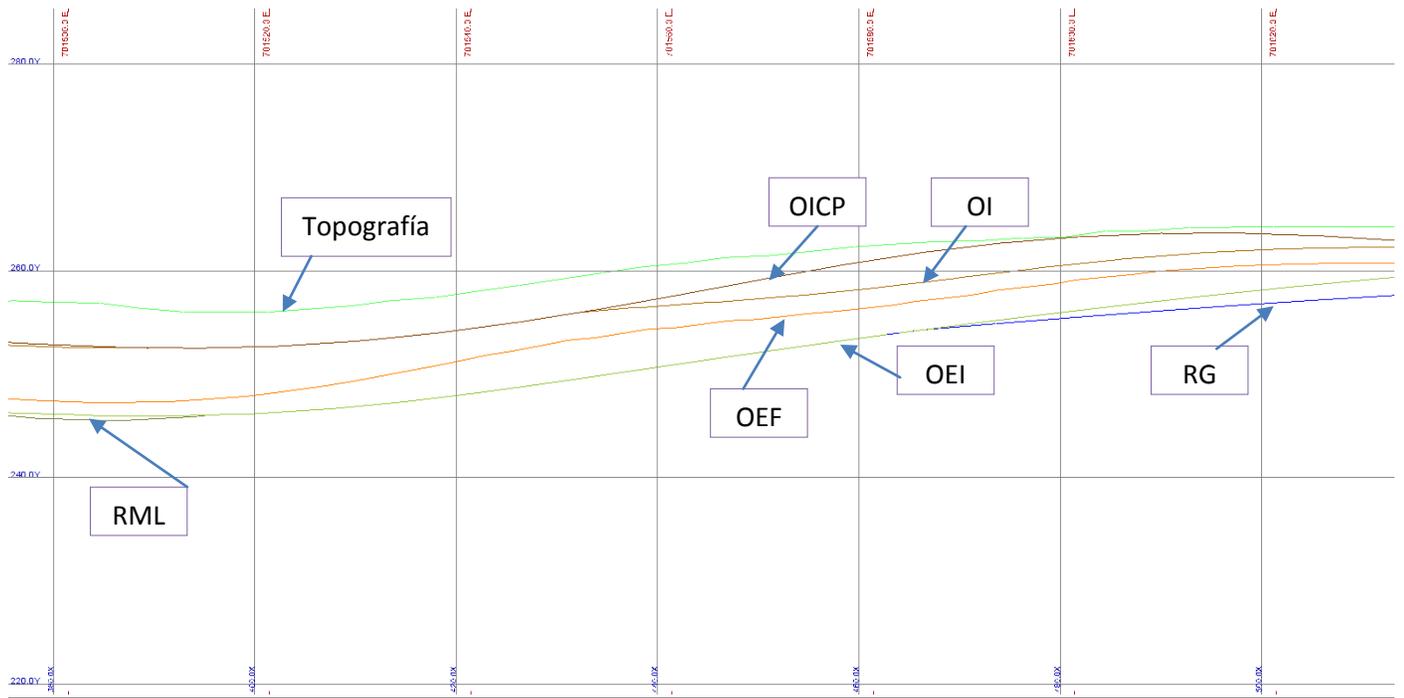


Figura N°. 12 Perfil Vertical 217146 NS en dirección Norte-Sur.

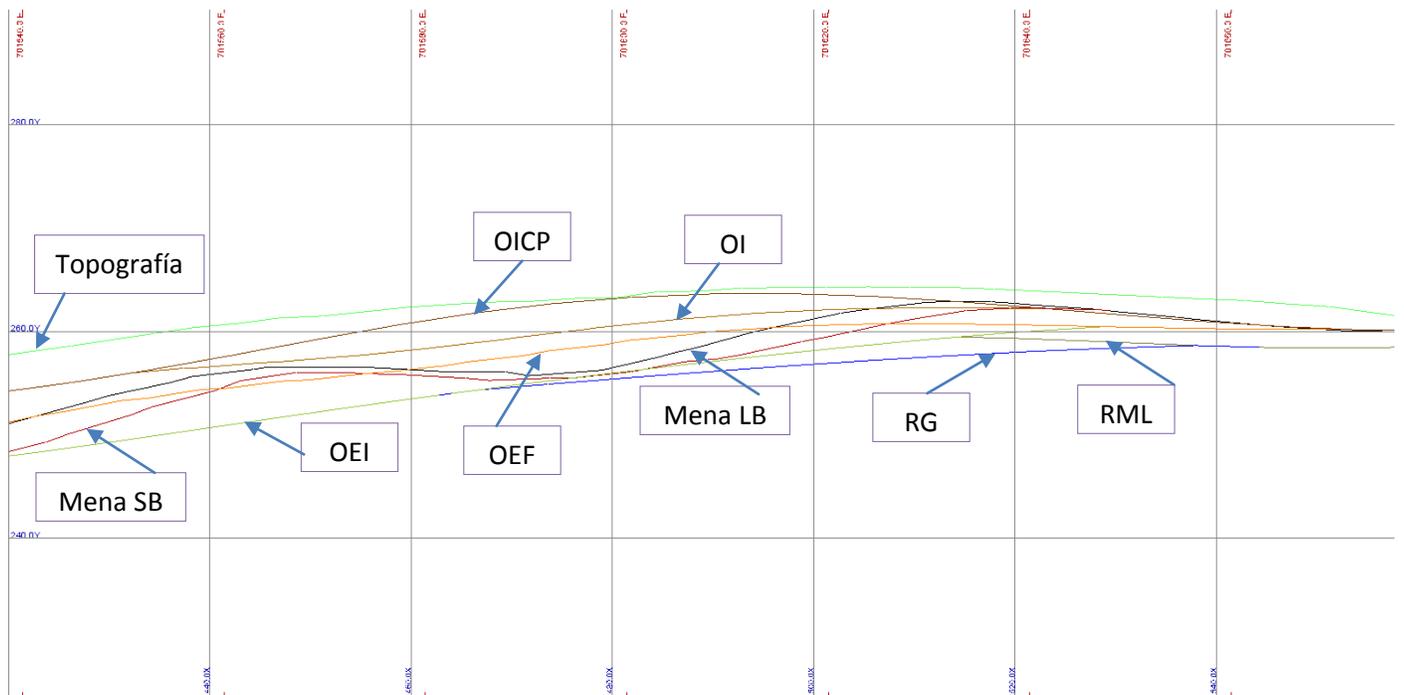


Figura N°. 13 Perfil Vertical 217146 NS en dirección Norte-Sur.

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

Las secciones usadas para la modelación están espaciadas entre 33.33×33.3 m; para poder ajustar el cuerpo geológico desde el punto de vista litológico, se transfirió la información obtenida hasta el momento a los planos de sección transversal, correlacionando el cuerpo mineral y las fallas principales que lo afectan. Posteriormente, con esta información se construyeron los sólidos que representan todo lo que es limonita (color rojo) y saprolita (azul) los que representan el cuerpo mineral contorneado por la envoltura anteriormente expuesta. (Ver figura N°.9.).

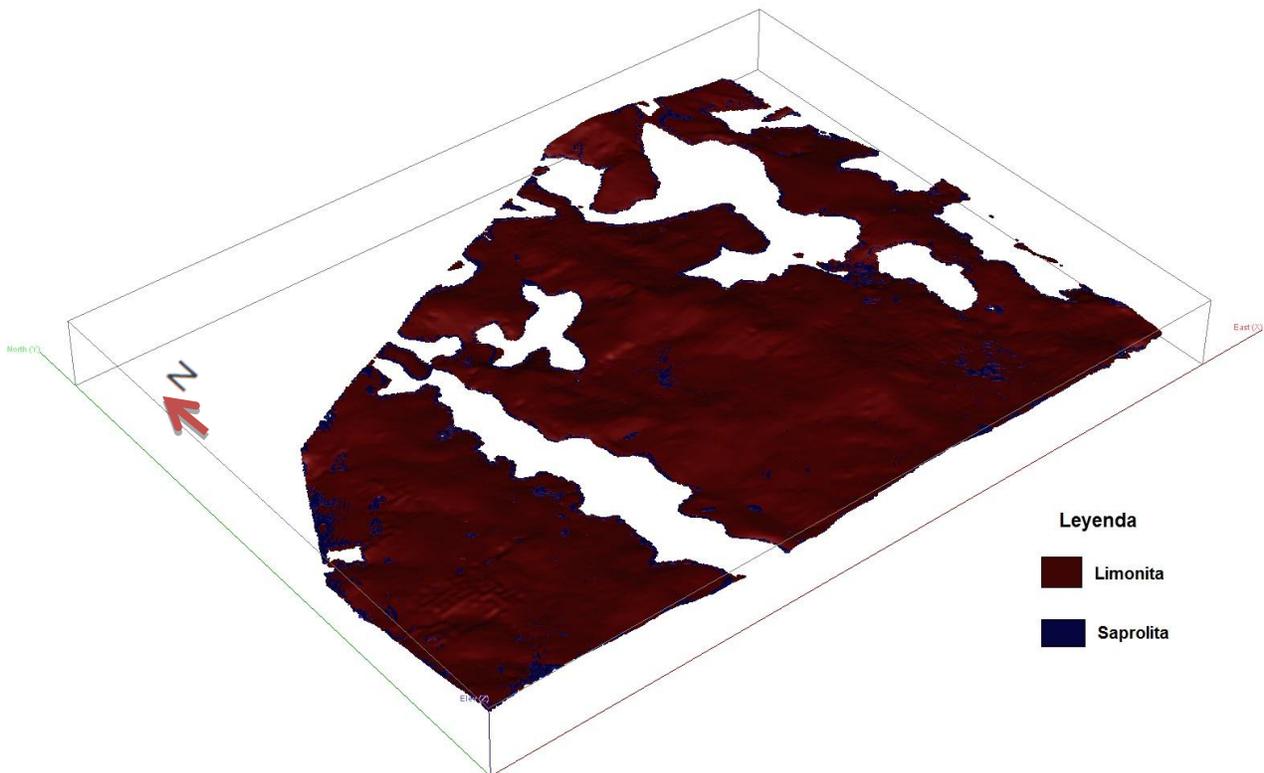


Figura N°.9. Sólidos de los horizontes litológicos de la Mena LB y SB en 3D.

En la foto N°.7 se representa en 3D (tres dimensiones) la complejidad del modelo litológico realizado teniendo en cuenta toda la información precedente donde se observan las intercalaciones entre cada una de las capas litológicas presentes en toda la extensión del yacimiento realizando una extrapolación en aquellos sectores donde la información geológica es escasa. (La foto N°.8 representa la misma información en 2D).

Analizando el modelo litológico en (2D) podemos decir que la litología que más abunda en este yacimiento son los Ogres Inestructurales con perdigones de Hierro (OICP) en este tipo

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

de litología la mena que predomina es la Limonita Ferruginosa fuera de balance (FF) la cual contiene altos porcentos de Fe, Los Ogres Estructurales Finales (OEF) tienen alta distribución en todo el sector de estudio, estos se localizan entre 1.50 y 15.4 m, en ellos predominan las laterita de balance (LB) compuestas en más del 50 % por Fe_2O_3 y la limonita fuera de balance (LF), al igual que en los ogres inestructurales sin concreciones de hierro (OI) donde la LB es la mena que más abunda. Los ogres estructurales iniciales (OEI) también representan gran extensión en el yacimiento al igual que la mena que en ellos predomina la serpentinita de balance (SB). Las demás litologías se presentan dispersas por todo el yacimiento, ya que no existe una homogeneidad del perfil. Podemos concluir diciendo que en el yacimiento los mayores valores van desde OICP, OEF, OI y OEI respectivamente (ver foto N° 8).

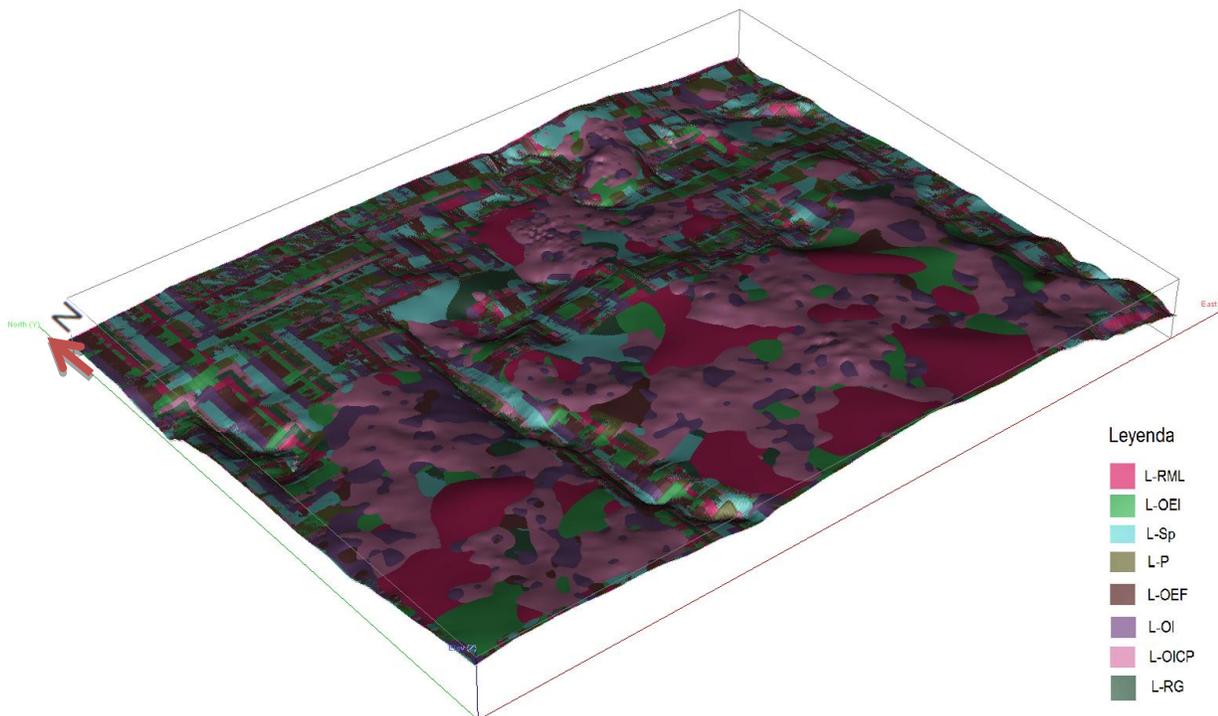


Figura N°.7. Superficies de fondo del modelo litológico en 3D.

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

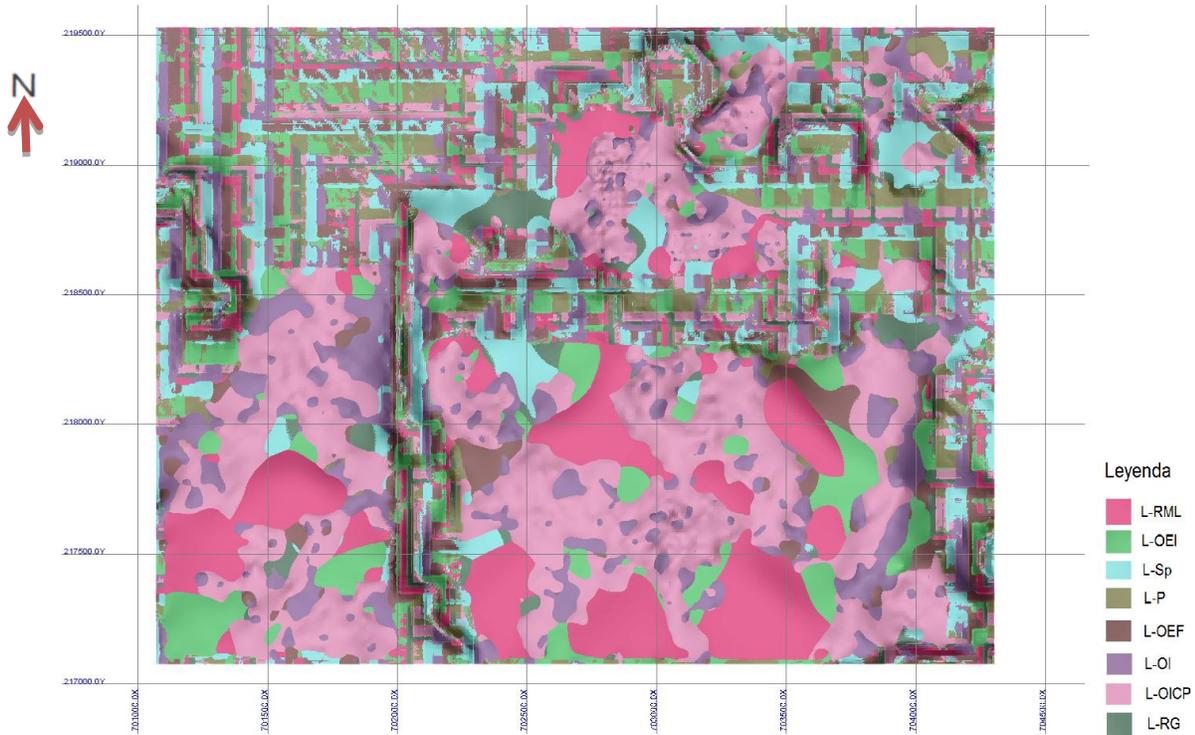
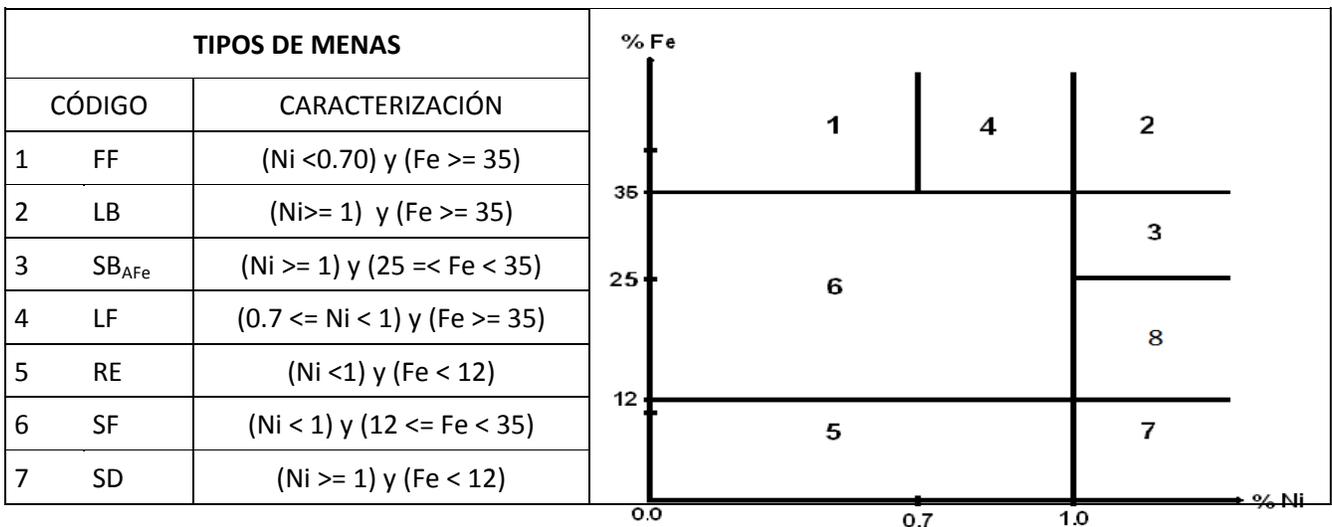


Figura N°.8. Superficies de fondo del modelo litológico en 2D.

Las figuras N°.10 y 11 representan la validación entre el modelo litológico respecto al modelo tecnológico, mostrando la relación que existe entre las litologías y la menas con los principales tipos de menas (LB y SB) y con todas las menas que la empresa Moa Nickel S.A. determina para optimizar la extracción y explotación del mineral (Ver figura N°.13 y la tabla N°.10).

Tabla N°.10. Diferentes tipos de menas tecnológicas de la empresa Moa Nickel S.A.



Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

8	SB _{BFe}	(Ni >= 1) y (12 <= Fe < 25)	
---	-------------------	-----------------------------	--

Descripción de las Menas:

FF : Limonita Ferruginosa fuera de balance	RE : Roca estéril
LB : Limonita de Balance	SF : Serpentina fuera de balance
SB _{AFe} : Saprolita de Balance de alto Fe	SD : Serpentina Dura
LF : Limonita fuera de balance	SB _{BFe} : Serpentina de Balance de bajo Fe

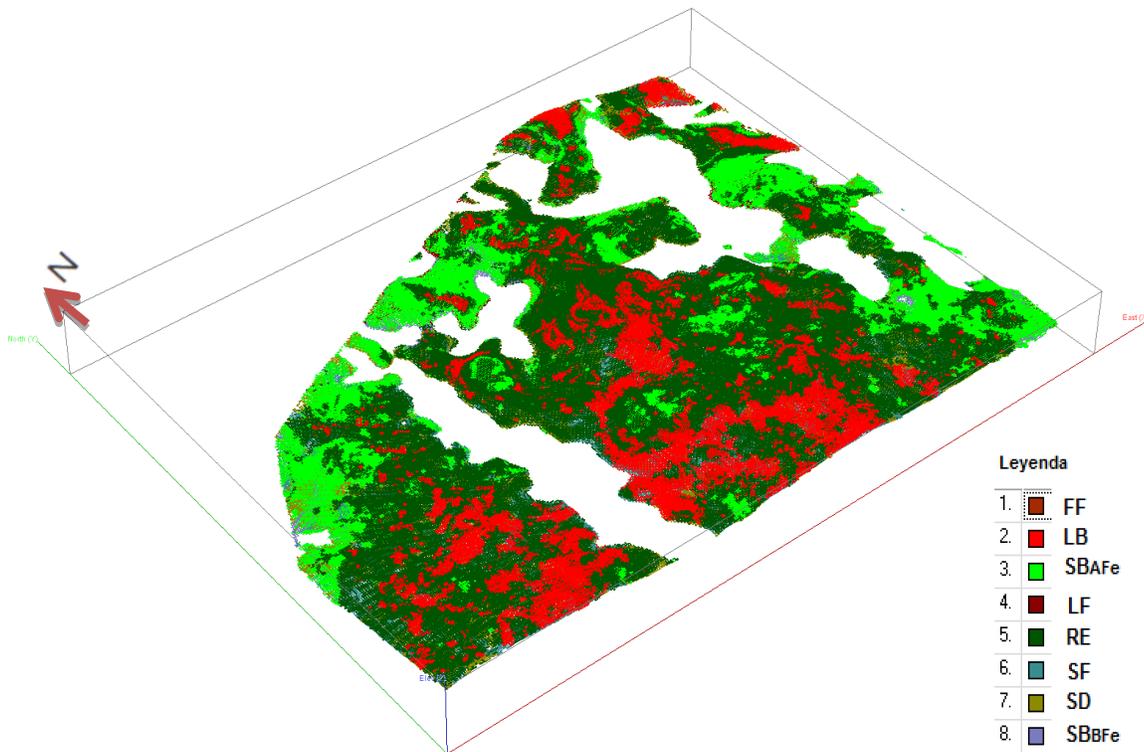


Figura N°.10. Modelo Matemático por tipo de Mena de los horizontes litológicos en 3D.

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

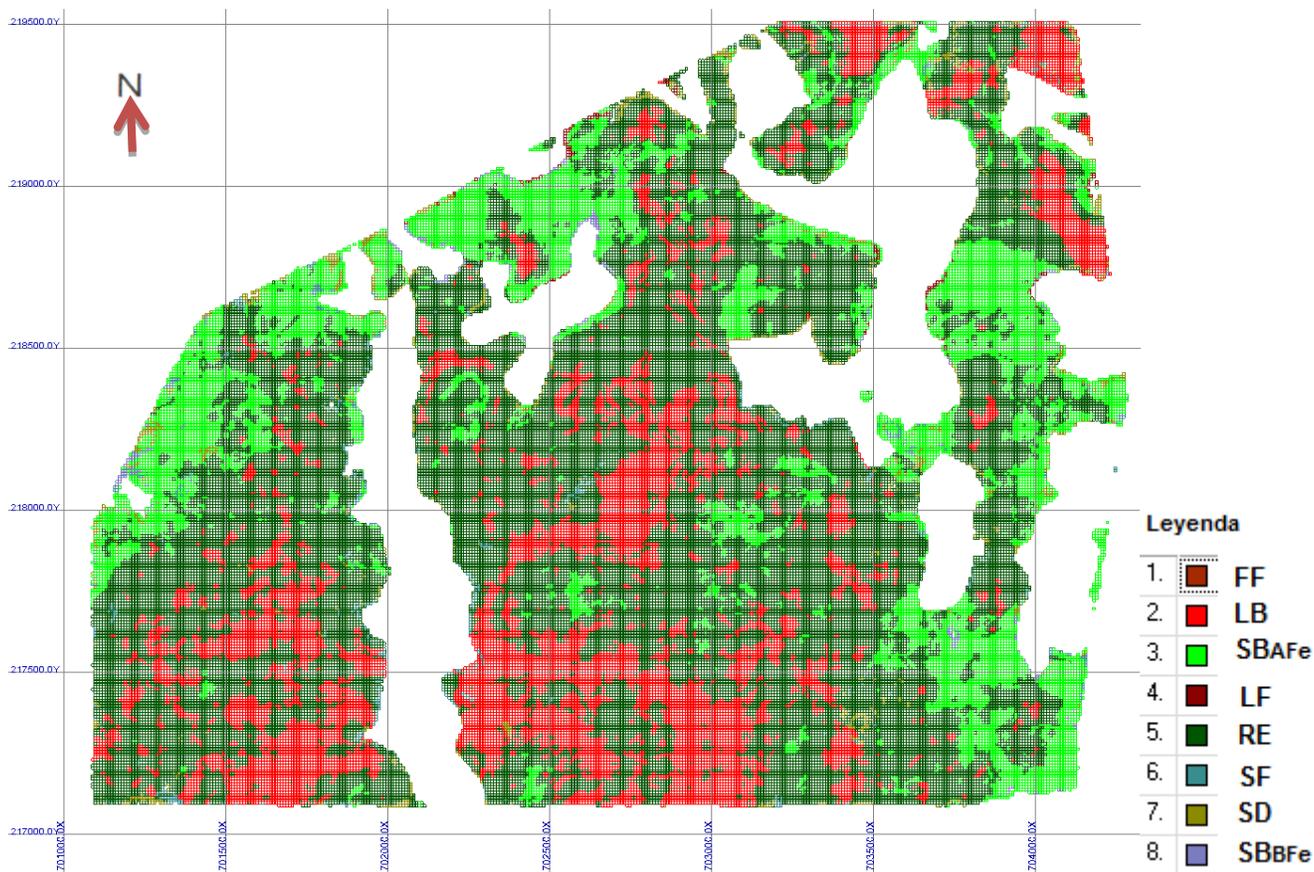


Figura N°.11. Modelo Matemático por tipo de Mena de los horizontes litológicos en 2D.

A partir de la elaboración del modelo teconológico podemos definir las litologías que se presentan en todo el yacimiento, (FF, LB, SBAFe, LF, RE, SFSD, SBBFe),

Los modelos están creados por superficies que representan diferencias substanciales entre sí mismas por causa de la ubicación espacial, esto se debe a los estudios realizados desde las descripciones realizadas por el geólogo en el campo, hasta los resultados determinados en el laboratorio, así como los controles internos y externos, lo cual permitió corroborar la confiabilidad de los resultados. Con el modelamiento de cada horizonte litológico ya validado con la topografía actual, se realizó un cálculo con el modelo geológico por Moa Nickel S.A. donde los resultados se compararon con la estimación hecha desde el modelo litológico demostrando una diferencia (desviación) de 0.48 % del volumen estimado, las leyes (Grade Elements) y los nocivos presentan una desviación mucho menor. (Ver tabla N°.11.).

Tabla N°.11. Validación de los recursos estimados en el yacimiento de Yagrumaje Oeste.

Modelo Geométrico Litológico del yacimiento Yagrumaje Oeste

Tipo de Modelo	Volumen %	Desviación %	Fe %	Ni %	Co %	Al %	SiO₂ %	Mg %
Modelo tecnológico	100	0.48	45.85	1.18	0.135	4.59	4.68	1.30
Modelo Litológico	99.52		46.07	1.19	0.136	4.61	4.70	1.31

Conclusiones

- En el modelo litológico están presentes las cortezas de intemperismo de rocas máficas y ultramáficas, el cual no engloba una secuencia lógica del perfil litológico, donde se resalta la ausencia y acuñaamiento de varias capas, condicionando bruscos cambios litológicos representados en el modelo, afirmando las interpretaciones geológicas pretéritas.
- El modelo litológico demuestra que la corteza de intemperismo y el depósito mineral, presentan zonas con baja potencia, por lo que prácticamente resultan no perspectivas para la minería, destacándose algunos sectores con altas potencias mineral entre 10 m y 25 m que forman áreas compactas muy perspectivas para la minería.
- Con los resultados obtenidos de los recursos estimados del modelo tecnológico y litológico se validaron ambos resultados determinando que el modelo matemático respecto al modelo litológico presenta un 99.52 % de confiabilidad.
- En el yacimiento Yagrumaje Oeste predomina principalmente la mena LF en casi toda la extensión del área de estudio, la mena FF también presenta gran predominio de igual modo que la mena LB las que aparecen difundidas por todo el yacimiento; el resto de las menas se muestran de forma aisladas en todo el sector de estudio.

Recomendaciones

- Continuar realizando comprobaciones geológicas complementarias en aquellas zonas extrapoladas a los pozos de exploración donde existe mayor grado de incertidumbre (grandes potencias de mineral, escombros, posibles intercalaciones, etc) de forma tal que se obtenga una mayor caracterización del lugar antes de comenzar la minería.
- Establecer las diferentes posibles denominaciones de los tipos de perfiles de intemperismo conocidas que se realizan sobre la base de los criterios mineralógicos y por criterios litológicos.
- Determinar el tipo de clasificación litológica al cual pertenecen los perfiles de intemperismo, basados en una clasificación mineralógica y comprobar si reflejan adecuadamente la génesis y la diversidad de los tipos de perfiles existentes, así como su perspectiva industrial.

Bibliografía

1. Matheron, G. (1963) – Principles Of Geostatistics. Economic Geology, V. 58, 1246-66.
2. Matheron, G.(1971) – The Theory Of Regionalized Variables And Its Applications. Cahier No 5, Centre De Morphologie Mathematique De Fontainebleau, 211 P.
3. Cuador Gil, José Quintín, 2002: “Estudios De Estimación Y Simulación Geoestadística Para La Caracterización De Parámetros Geólogo - Industriales En El Yacimiento Laterítico Punta Gorda”. Departamento De Geología, Universidad De Pinar Del Rio “Hermanos Saiz Montes De Oca”. Tesis Doctoral. 108 Páginas.
4. Toirac Proenza, Raidel, 2003: “Modelo Tridimensional Y Reestimación De Recursos (Arena Para La Construcción) Al Oeste De Guane”. Memorias Del V Congreso De Geología Y Minería. Edición Digital De La Sociedad Cubana De Geología. Ciudad De La Habana, Marzo, 2003.
5. Clark, Isobel (1977) - Practical Geostatistics. Geostokos Limited, United Kingdom. Digital Version Of [Http://Uk.Geocities.Com/Drisobelclark/Pg1979](http://Uk.Geocities.Com/Drisobelclark/Pg1979), 119 P.
6. Estévez Cruz, Elmidio Y José Quintín Cuador Gil (2003) - El Kriging Indicador Y El Control De La Ley En El Yacimiento Oro Castellano. Memorias Del V Congreso De Geología Y Minería. Edición Digital De La Sociedad Cubana De Geología. Ciudad De La Habana, Marzo, 2003.
7. Estévez Cruz, Elmidio Y J. Q. Cuador Gil, 2003a: “Yacimiento Oro Castellano: Evaluación Y Comparación De Técnicas De Estimación Espacial”. Revista Geología Y Minería, Número 1, Volumen 19 Del 2003.
8. Iturralde-Vinent, M.A. 1996.Ofiolitas Y Arcos Volcánicos De Cuba.I.G.C.P.Project364, Special Contribution No. 1.
9. Elmidio Estévez Cruz, 2000: “3d Orebody Modelling And Resourvce Estimation Of The Jucaro Deposit, Pinar Del Rio, Cuba” Revista Minería Y Geología Vol. Xvii No. 2, 2000
10. Adrián Mtinez-Vargas, Jairo Ramírez-Garcia, 2005: “Desarrollo Actual De La Geoestadística En El Mundo” Revista Minería Y Geología V. 21 N. 4, 2005
11. José Daniel Ariosa-Iznaga, Resumen De Tesis Doctoral/2002: “La Modelacion Descriptiva En El Ejemplo De Los Yacimientos Lateríticos De Cuba Oriental” Minería Y Geología V. 21 N. 1, 2005

12. Adrián Martínez Vargas, Arístides Alejandro Legrá Lobaina, Norberto Ferrera Alba, Luis F. Mena Matos: "Modelo Digital Del Relieve Original Del Yacimiento Punta Gorda" Revista Minería Y Geología, Issn 0258 5979, Nos. 3-4, 2003
13. Adrián Martínez Vargas, Niurka Pérez Melo: "¿Cuál Es El Mejor Método Para Estimar Variables En Yacimientos Lateríticos De Níquel Y Cobalto?" Revista Minería Y Geología V. 22n. 3, 2006.
14. Casarreal Valdés, Guillermo, Orestes Díaz Valdés, Wilman M. Oliva Márquez, 1999: "El Modelo Digital Del Terreno Y El Uso Del Criterio Geomorfológico Para La Búsqueda De Yacimientos Minerales". Revista Geología Y Minería, Número 3, Volumen 17 Del 2000, Páginas 12-15.
15. Casarreal Valdés, Guillermo, Orestes Díaz Valdés, Wilman M. Oliva Márquez, 2001: "El Modelo Digital Del Terreno Y El Uso Del Criterio Geomorfológico Para La Búsqueda De Yacimientos Minerales". Sección Geomática En Las Memorias Del Iv Congreso De Geología Y Minería. Edición Digital De La Sociedad Cubana De Geología. Ciudad De La Habana, Marzo, 2001.
16. Estévez Cruz, Elmidio Y J. Q. Cuador Gil, 2003a: "Yacimiento Oro Castellano: Evaluación Y Comparación De Técnicas De Estimación Espacial". Revista Geología Y Minería, Número 1, Volumen 19 Del 2003, En Prensa.
17. Estévez Cruz, Elmidio Y José Quintín Cuador Gil, 2003b: "El Kriging Indicador Y El Control De La Ley En El Yacimiento Oro Castellano". Memorias Del V Congreso De Geología Y Minería. Edición Digital De La Sociedad Cubana De Geología. Ciudad De La Habana, Marzo, 2003.
18. Hart, David And Albert J. Rudman (1997) - Least-Squares Fit Of An Ellipse To Anisotropic Polar Data: Application To Azimuthal Resistivity Surveys In Karst Regions. Computers & Geosciences, V. 23, Issue 2, March 1997, 189-194 P.
19. Jian, Xiaodong, Ricardo A. Olea And Yu Yun-Sheng (1996) - Semivariogram Modeling By Weighted Least Squares. Computers & Geosciences, V. 22, Issue 4, May 1996, 387-397 P.
20. Rodríguez Ruíz, Héctor J., 1990: "Premisas Geológicas Para La Automatización Integral De Los Trabajos De Prospección En Yacimientos Niquelíferos De

- Intemperismo”. Departamento De Geología Del Instituto Superior Minero Metalúrgico De Moa, Tesis Doctoral. 124 Páginas.
21. Toirac Proenza, Raidel, 2003: “Modelo Tridimensional Y Reestimación De Recursos (Arena Para La Construcción) Al Oeste De Guane”. Memorias Del V Congreso De Geología Y Minería. Edición Digital De La Sociedad Cubana De Geología. Ciudad De La Habana, Marzo, 2003.
22. David, Michel, 1977: “Geostatistical Ore Reserves Estimation”. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1977, 364 P.
23. Gemcom® User’s Manual: Emcom Software International Inc. , 901 – 580
24. Hornby Street, Vancouver, British Columbia, V6c 3b6, Canada, 1999.
25. Surfer® Version 11, User Manual: Copyright © 1999. Golden Software, Inc.
26. Brunsdon, D. 1996. The Nature, Use And Problems Of Historical Archives For The Temporal Occurrence Of Landslides, With Specific Reference To The South Coast Of Britain, Ventnor, Isle Of Wight. Geomorphology 15, 241–258 P.
- 27.