

**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ.”
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**Tesis presentada en Opción al Título Académico de Master en
Geología**

Procedimiento para la selección de áreas perspectivas durante la exploración y explotación de yacimientos lateríticos mediante Sistemas de Información Geográfica. Caso de estudio yacimiento Yagrumaje Sur

Maestría en Geología, Mención Geología de Yacimientos Minerales Sólidos
9^{na} Edición

Autor: Ing. Maylín Barrera Veitía
Tutor(es): Dra. Alina Rodríguez Infante

Año 2015

Dedicatoria

Esta tesis va dedicada a mi hermano Ernesto Barrera Veitía

Agradecimientos

Agradezco a mis profesores, que tanto tesón ha puesto en mi enseñanza, a mi familia por todo su apoyo brindado y por estar presente en los tiempos difíciles. A todo el que de una forma u otra ha colaborado para que esta investigación haya sido posible.

Pensamiento

Un científico debe tomarse la libertad de plantear cualquier cuestión, de dudar de cualquier afirmación, de corregir errores.

Robert Oppenheimer

Síntesis

La presente investigación titulada “Procedimiento para la selección de áreas perspectivas durante la exploración y explotación de yacimientos lateríticos con el empleo de Sistema de Información Geográfica. Caso de estudio yacimiento Yagrumaje Sur” se desarrolló siguiendo tres etapas metodológicas. En la primera etapa se definió el diseño de la investigación y se realizó la revisión bibliográfica de todos los trabajos relacionados con la temática tanto en Cuba como en el mundo. En la segunda etapa se definieron las variables, los mapas temáticos a realizar y se estableció el procedimiento a seguir para determinar las áreas perspectivas del yacimiento. En la última etapa de la investigación se realizó la interpretación y caracterización de los resultados obtenidos, definiéndose tres áreas perspectivas para la zona de estudio: poco, medianamente y muy perspectivas.

Summary

The present investigation titled "Procedure for the selection of perspective areas during exploration and exploitation of lateritic deposits with the use of Information System Geographic. Case study Yagrumaje Sur deposit" it was develop following three stages methodology. The investigation's design was circumscribed in the first stage and the bibliographic revision of all of the works related with the subject matter so much in Cuba like in the world. They defined variables, the thematic maps to realize in second stage and the procedure became established to follow to determine the perspective areas of the deposit. In last stage of investigation came true interpretation and characterization of the obtained results, defining three perspective areas for the survey area: little, mildly and very perspective.

Índice

Dedicatoria	I
Pensamiento	III
Síntesis	IV
Summary	V
Índice.....	VI
Índice de Figuras.....	VIII
Índice de tablas	X
Abreviaturas empleadas en la investigación	XI
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: RASGOS FISICO-GEOGRÁFICOS Y GEOLÓGICOS DEL YACIMIENTO YAGRUMAJE SUR	4
Introducción	4
Rasgos físicos-geográficos	4
Investigaciones precedentes.....	6
Rasgos geológicos regionales	11
Rasgos geológicos del yacimiento	16
Generalidades geoquímicas y mineralógicas del yacimiento Yagrumaje Sur	23
Conclusiones	25
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS DURANTE LA INVESTIGACIÓN	26
Introducción	26
Metodología de la investigación	26
Procedimiento para el establecimiento de áreas perspectivas mediante el uso de SIG	28
Muestreo comprobatorio	34
Conclusiones	36

CAPÍTULO III: IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS PERSPECTIVAS PARA LA EXPLOTACIÓN Y EXPLOTACIÓN MINERA EN EL YACIMIENTO YAGRUMAJE SUR.	37
Introducción	37
Análisis del comportamiento de las variables	37
Caracterización de las áreas perspectivas del yacimiento Yagrumaje Sur	53
Caracterización geoquímica de las áreas de comprobación.....	56
Conclusiones	57
CONCLUSIONES.....	58
RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	68

Índice de Figuras

Figura 1. Plano de ubicación geográfica del yacimiento Yagrumaje Sur.....	5
Figura 2. Mapa geológico esquemático de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoa autóctono (Iturralde-Vinent, 1996a).....	12
Figura 3. Mapa geológico del basamento del yacimiento Yagrumaje Sur (Barrientos, K 2007).	16
Figura 4. Perfil esquemático del yacimiento Yagrumaje Sur. *ES: Menas ferruginosas (FF, FB y LF).....	24
Figura 5. Flujo de procesamiento de los mapas de potencia y contenido.	29
Figura 6. Etapas metodológicas seguidas en la investigación.....	30
Figura 7. Flujo de procesamiento para la clasificación de los mapas temáticos.....	31
Figura 8. Flujograma del procedimiento para el establecimiento de las áreas perspectivas	33
Figura 9. Horizonte de la corteza laterítica muestreados	34
Figura 10. Mapa de potencia en el horizonte de escombros	38
Figura 11. Mapa de potencia del horizonte de LB+SB	39
Figura 12. Mapa de relación de potencia Esc/LB+SB	40
Figura 13. Mapa de isocontenido de Ni en el horizonte de escombros	41
Figura 14. Mapa de isocontenido de Ni en el horizonte de LB+SB	42
Figura 15. Mapa de isocontenido de Fe en el horizonte de escombros	43
Figura 16. Mapa de isocontenido de Fe en el horizonte de LB+SB.....	44
Figura 17. Mapa de isocontenido de Co en el horizonte de escombros	45
Figura 18. Mapa de isocontenido de Co en el horizonte de LB+SB	46
Figura 19. Mapa de isocontenido de Si en el horizonte de escombros	47
Figura 20. Mapa de isocontenido de Si en el horizonte de LB+SB.....	47
Figura 21. Mapa de isocontenido de Mg en el horizonte de escombros	48
Figura 22. Mapa de isocontenido de Mg en el horizonte de LB+SB.....	49
Figura 23. Mapa de isocontenido de Al en el horizonte de escombros	50
Figura 24. Mapa de isocontenido de Al en el horizonte de LB+SB.....	51
Figura 25. Vista en 3D de los mapas temáticos empleados en el establecimiento de las áreas perspectivas para el yacimiento Yagrumaje Sur.....	53
Figura 26. Mapa de áreas perspectivas para el yacimiento Yagrumaje Sur.....	54

Índice de tablas

Tabla 1. Rocas pertenecientes a la región según (Quintas, 1989) e (Iturralde-Vinent, 1996a). (Tomado de Rodríguez, 1998) y modificado por la autora	14
Tabla 2. Parámetros fundamentales de la corteza. Ley de corte 1,0 % Ni.	20
Tabla 3. Correlación entre los distintos términos empleados	20
Tabla 4. Variables que componen cada parámetro	27
Tabla 5. Códigos numéricos empleados en el mapa geológico.....	29
Tabla 6. Rangos de reclasificación de las variables empleadas en el procedimiento	32
Tabla 7. Código de reclasificación	32
Tabla 8. Matriz de correlación entre los componentes útiles y nocivos en el horizonte de escombro.....	52
Tabla 9. Matriz de correlación entre los componentes útiles y nocivos en el horizonte de LB+SB	52
Tabla 10: Composición química de los sectores muestreados.....	56

Abreviaturas empleadas en la investigación

Abreviatura	Significado
SIG	Sistema de Información Geográfico
FF	Mena ferrosa fuera de balance
FB	Mena ferrosa de balance
LF	Mena laterítica niquelífera fuera de balance
LB	Mena limonítica de balance
SB	Mena serpentinitica o saprolita de balance
SD	Mena de serpentinita dura
ME	Material escamoso
Ma	Material arcilloso
FM	Formación
Pot	Potencia
ONRM	Oficina Nacional de Recursos Minerales
CD	Compact Disc
ISMMM	Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Pot	Potencia
Esc	Escombros
EAA	Espectrometría de Absorción Atómica

INTRODUCCIÓN

Uno de los eslabones principales en la economía de nuestro país lo constituye la minería desarrollada a cielo abierto en los yacimientos ferroniquelíferos del nordeste de la provincia de Holguín; en los que para la exploración, explotación y racionalización de sus recursos no se ha hecho extensivo el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Aunque existen algunos trabajos orientados a la sectorización de yacimientos lateríticos como los realizados por (Vera_Sardiñas et al., 2001) y (Cruz_Oroza et al., 2006) no existe un procedimiento que considere los SIG para el establecimiento de las áreas perspectivas de un depósito laterítico.

Existen varias definiciones de los SIG, algunas de ellas acentúan su componente de base de datos, otras sus funcionalidades, pero todas coinciden en que constituyen una herramienta útil para el análisis integrado de la información espacial, facilitando la toma de decisiones en muchas áreas vitales del desarrollo.

En Cuba en los últimos años se ha implementado el uso de los SIG en investigaciones que están relacionadas con los temas de susceptibilidad por deslizamiento de tierra, vulnerabilidad, medioambiente, pronóstico de áreas favorables para depósitos. Algunos de estos estudios consisten en el inventario e interpretación de diversos datos fisiográficos que tienen relación con la interacción del relieve, vegetación, geología, geomorfología, hidrogeología, suelos (Acosta_Aguila et al., 2013) y (Estévez_Cruz & Ramírez_Hernández, 2009). También se han elaborado mapas de peligrosidad de las áreas los que se han categorizado en dependencia de su incidencia en zonas de poca, media o muy peligrosa. Sobre la base de esto y teniendo en cuenta la metodología que han sido utilizadas en estos trabajos se decidió aplicar los SIG en los yacimientos lateríticos.

Los depósitos lateríticos cubanos se caracterizan por presentar una alta concentración de níquel, cobalto y hierro que están relacionados con la meteorización de la roca madre, la topografía, el clima. La identificación de las zonas de mayor acumulación de estos elementos es importante en esta investigación debido a que permite la racionalización y un uso mejor de los recursos minerales.

La combinación de la información del basamento en conjunto con las concentraciones geoquímicas de los elementos tanto útiles como nocivos y la variedad del tipo de mena permitirán identificar las áreas con mayor perspectivas para la minería.

La separación y reconocimiento de anomalías geoquímicas en los suelos es un problema básico en la exploración geoquímica. Las características espaciales exhibidas respecto algunos elementos en los depósitos meníferos proporcionan las pautas a la exploración mineral. Los mapas geoquímicos permiten determinar áreas con anomalías y a la vez la caracterización de una tendencia de un elemento o elementos con el propósito de la racionalización del recurso mineral (Xu & Chueng, 2001).

Ante esta situación se requiere del análisis de la variación de las variables que influyen durante la formación de las cortezas lateríticas como son: basamento, pendiente, potencia, contenido de elementos útiles y nocivos. Esto demanda de una información espacial precisa que permita obtener resultados fiables acerca de la distribución de estas variables en la corteza. A partir de este análisis se podrá delimitar las áreas que son perspectivas para la explotación minera en el yacimiento Yagrumaje Sur.

Problema

¿Cómo desarrollar un procedimiento que permita establecer las áreas perspectivas para la exploración y explotación minera mediante el uso de un SIG?

Objeto

Las variables empleadas en el procedimiento

Objetivo principal

Definir un procedimiento que permita establecer las áreas perspectivas para la exploración y explotación minera en el yacimiento Yagrumaje Sur mediante un SIG.

De este objetivo principal se derivan otros objetivos específicos tales como:

- Definir las variables a aplicar en el procedimiento
- Establecer un procedimiento para la determinación de las áreas perspectivas mediante el uso de los SIG
- Analizar el comportamiento de las variables a emplear en el procedimiento
- Caracterizar las áreas perspectivas

Hipótesis

Si se logra establecer un procedimiento mediante el uso de los SIG y caracterizar las variables definidas entonces será posible determinar las áreas que son perspectivas para la exploración y explotación minera.

Resultados esperados

Integración de los mapas temáticos para generar el mapa de áreas perspectivas del yacimiento Yagrumaje Sur con el objetivo de lograr una explotación más racional de los recursos.

Aplicabilidad de la investigación:

Las lateritas constituyen la materia prima mineral principal de las industrias del níquel cubana su uso y aprovechamiento racional permitirá trabajar con mayor precisión en la solución de problemas de diversa índole. La presente investigación permite definir a través de un procedimiento las áreas más perspectivas para la exploración y explotación de los recursos minerales.

Capítulo I

CAPITULO I: RASGOS FISICO-GEOGRÁFICOS Y GEOLÓGICOS DEL YACIMIENTO YAGRUMAJE SUR

Introducción

Rasgos físicos-geográficos

Investigaciones precedentes

Rasgos geológicos regionales

Rasgos geológicos del yacimiento

Generalidades geoquímicas y mineralógicas del yacimiento Yagrumaje Sur

Conclusiones

Introducción

En este capítulo se hace un resumen de los datos generales geográficos y geológicos del bloque oriental cubano así como de los principales renglones económicos; también se destaca la importancia que brindan los Sistemas de Información Geográfica durante la etapa de exploración y explotación geológica tanto en Cuba como en el mundo. Y por último, se hace un pequeño análisis de las generalidades geoquímicas y mineralógicas que caracterizan al área de estudio.

Rasgos físicos-geográficos

El yacimiento Yagrumaje Sur se encuentra ubicado en la parte noreste de la provincia Holguín, localizado en el extremo oriental de la faja Mayarí-Baracoa. Ubicándose según el sistema Lambert entre las coordenadas X=704000 – 706800; Y=217395 – 220100.

Geográficamente limita al norte con el yacimiento Yagrumaje Norte y el Poblado de Punta Gorda Arriba, al este con el río Cayo Guam, al oeste con el río Punta Gorda y al sur por la línea convencional que lo separa con el yacimiento Camarioca Este; abarcando una superficie de 2,37 km². (ver Figura 1)

El área donde está emplazado el yacimiento posee un clima subtropical como el del resto del país, existiendo dos períodos de lluvias (septiembre-febrero y mayo-junio). Las precipitaciones anuales constituyen de 2 300 a 2 700 mm. La humedad relativa del aire es de un 79 %, la temperatura promedio anual del aire es de 24 °C, con oscilaciones de 15 a 30 °C.

El área del yacimiento se caracteriza por tener un relieve de montañas bajas y premontañas, con cotas absolutas desde 219 m en el sur hasta 52.5 m en el norte y valles profundos en los ríos Cayo Guam y Punta Gorda y otros arroyos. El relieve se presenta bien diseccionado por las cañadas y pendientes de los arroyos y tributarios relacionados con la cabecera de los ríos Cayo Guam, Punta Gorda y Yagrumaje, que se han desarrollado siguiendo principalmente líneas tectónicas, que afectan relevantemente al área de Yagrumaje Sur. La forma del depósito es irregular y se extiende de sur a norte.

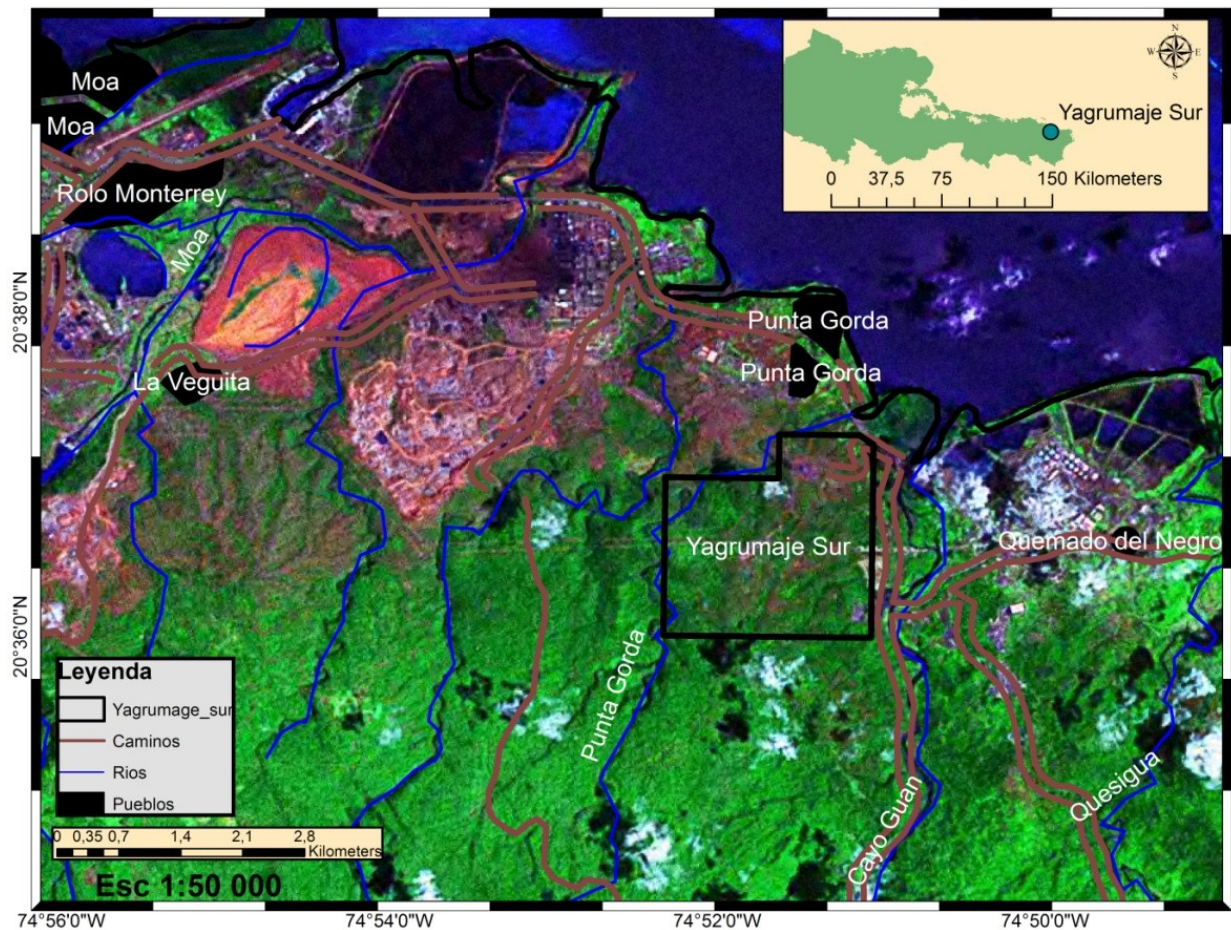


Figura 1. Plano de ubicación geográfica del yacimiento Yagrumaje Sur.

La vegetación es tropical; las montañas están cubiertas de manera espesa por arbustos espinosos entrelazados por lianas. En las zonas peniplanizadas donde se desarrollan las lateritas, crecen de manera abundante los pinos.

Las mayores acumulaciones de agua vienen determinadas por las serpentinitas y peridotitas serpentinizadas las cuales presentan un alto grado de agrietamiento originado

por el intemperismo. Se destaca en este yacimiento un complejo acuífero, donde hay un rápido incremento del derrame subterráneo en sentido vertical, originado por la alta porosidad de las lateritas y agrietamiento de las serpentinitas ya señaladas. La infiltración vertical se limita localmente donde los ocreos se presentan con propiedades arcillosas. Los niveles de las aguas cambian con el tiempo lo cual está relacionado con los períodos de lluvia y seca. Las aguas superficiales y subterráneas corren desde las zonas más elevadas topográficamente ubicadas en la parte sur y central del yacimiento, dando origen a pequeños arroyos. La dirección es de sur a norte y noreste.

La economía de la región está determinada principalmente por la Industria Minero Metalúrgica, la que presenta un extraordinario desarrollo, siendo su fuente principal las menas ferroniquelíferas-cobálticas friables, las cuales están muy extendidas en numerosos yacimientos y sectores conocidos, existen además yacimientos y manifestaciones de cromitas.

Investigaciones precedentes

Los trabajos orientados a profundizar en el conocimiento geoquímico y geológico de los yacimientos lateríticos no han sido pocos; por lo que en esta investigación se hace un desglose de las principales investigaciones que se han desarrollado hasta la actualidad.

Trabajos relacionados con las características geoquímicas y mineralógicas de los yacimientos lateríticos cubanos

Las primeras investigaciones de los minerales lateríticos de níquel en la región de Moa datan de los años 1952 al 1958, las que estuvieron dirigidas principalmente a la caracterización geoquímica y mineralógica de las cortezas lateríticas y al estudio de las diferentes fases minerales portadoras de Ni, Fe y Co.

Uno de los primeros trabajos realizados sobre las lateritas niquelíferas cubanas fue el desarrollado por (Vletter, 1955), en el que expone ideas sobre la génesis de las menas niquelíferas, este explica que la descomposición de la serpentina por meteorización, conlleva a la lixiviación de la SiO_2 y el MgO y las consecuentes concentraciones residuales de los componentes metálicos; el proceso principal queda definido por la migración del

níquel de las capas superiores y su posterior precipitación en los horizontes inferiores (zona de serpentinita alterada o roca muy alterada), disminuyendo la incorporación del Ni en los minerales oxidados de los horizontes lateríticos.

En 1968 Sobol desarrolló la investigación en la que establece que las asbolanas son portadoras de cobalto, níquel y manganeso; así como reveló la presencia de la maghemita en las lateritas. Este trabajo fue de gran importancia para la evaluación del material laterítico presente en los yacimientos cubanos. (Sobol, 1968)

Las principales macrofases asociadas al Ni en el material laterítico fueron establecidas a través de métodos químicos analíticos; según (Cordeiro et al., 1977); (Cordeiro, 1981); y (Cordeiro & Cordiero, 1987). A partir de estas investigaciones son capaces de estudiar la forma de retención de los componentes de Mn y la íntima asociación de este metal con el Co, exponiendo una vía para el estudio, mediante las hoy llamadas técnicas de extracción selectivas para conocer la existencia y grado de retención del Co en sus fases portadoras como son los óxidos de Mn, estudiados por (Manceau et al., 1992), entre otros.

El control litológico-mineralógico de la mineralización de las cortezas de intemperismo sobre ultramafitas declara la influencia sobre el tipo de roca subyacente en la formación de un determinado perfil de alteración intempérica, estableciendo determinadas asociaciones de minerales para cada perfil (Lavaut_Copa, 1987).

Con la aplicación de técnicas modernas de investigación mineralógica, (Almaguer_Furnaguera, 1989) caracteriza los diferentes horizontes de los perfiles de alteración intempérica, describiendo la evolución geoquímica de la corteza. Esta investigación constituyó un aporte importante al conocimiento de la mineralogía y la geoquímica de las cortezas de intemperismo en la región de Moa, y corroboró lo anteriormente planteado por Lavaut en 1987.

Para 1995 Almaguer realiza un estudio de la mineralogía de los ocreos donde determina que las fases principales son goethita (60 % - 85 %), los minerales arcillosos (6,0 -13 %), las espínelas cromíferas no sobrepasan el 6 % y los minerales de manganeso alcanzan (1,0 - 2,0 %). Plantea que la fracción magnética es la más enriquecida en cobalto (Almaguer_Furnaguera, 1995b). También (Almaguer_Furnaguera, 1995a) en su investigación sobre la composición química de la pulpa limonítica durante un periodo de

crisis de sedimentación de la planta de Moa Níquel S.A, mediante análisis granulométrico desde 0,83 mm hasta 20 μm con métodos analíticos cuantitativos y cualitativos observa que para todos los grupos de la pulpa, el componente amorfo es mayoritario en los minerales de manganeso y que la misma se encuentra muy enriquecida en cobalto y se localiza en la clases intermedias hacia las finas.

En los perfiles de meteorización laterítica todos los materiales negros ricos en Mn, Co y Ni, mayoritariamente amorfos o de muy baja cristalinidad han sido denominadas “asbolanas”. Sin embargo (Labrador, Manuel et al., 2006) identificaron en la parte de Moa, Cuba Oriental a la litioforita (fase de Mn-Ni-Co-Al) como un mineral característico de los perfiles lateríticos tipo óxido. Evaluaciones mineralógicas parecidas efectuaron (Proenza, Joaquín et al., 2007); (Proenza, Joaquín et al., 2010); y (Rojas_ Purón et al., 2012); el primero en los depósitos lateríticos de Ni tipo óxido (Moa en Cuba Oriental) y de silicato hidratado (Falcondo República Dominicana) y el segundo en el yacimiento Punta Gorda. Además llegaron a la conclusión de que las mineralizaciones de Co están sistemáticamente asociadas a óxido e hidróxidos de Mn que suelen estar íntimamente intercrecidos con los óxidos de Fe.

En el yacimiento Punta Gorda se han desarrollado un conjunto de investigaciones ligadas al estudio de los óxidos de manganeso en las cuales es expuesta por varios investigadores que los mismos constituyen fases minerales portadoras de cobalto y níquel (Sobol, 1968); (Manceau et al., 2002); (Labrador, Manuel et al., 2006); (Cuenca_Reyes, 2009); (Proenza, Joaquín et al., 2010); (Agyei et al., 2010); (Simon_Haingura, 2011); y (Rojas_ Purón et al., 2012); debido a la interacción que existe entre estos dos metales y los óxidos de manganeso en la superficie terrestre como resultado de la oxidación del Co^{2+} a Co^{3+} para formar especies menos solubles, con la consecuente reducción de los iones Mn^{+3} o Mn^{+4} a Mn^{+2} de especies más solubles.

Trabajos desarrollados en el área de estudio

El yacimiento Yagrumaje Sur, ha sido estudiado en varias campañas de perforación así como de muestreo para ensayos químicos y otros, realizados todos por la Empresa

Geominera Oriente. A continuación se hace un desglose de las investigaciones geológicas realizadas en el yacimiento:

Uno de los primeros trabajos que se realizaron en el área de estudio se remonta a los años 1964 - 1965 donde fue desarrollado una exploración geológica en los yacimientos Atlantic, Playa la Vaca, Punta Gorda (área de búsqueda Yagrumaje Norte, Sur y Oeste), empleando la red de perforación 400 x 400 m. A partir de este trabajo se pudo evaluar las reservas de los minerales de níquel en estas áreas. (Ogarkov & Paz_Segundo, 1967)

En los años del 1973 – 76 se desarrollaron un conjunto de investigaciones de exploración geológica detallada y orientativa, cuyo objetivo estaba centrado en la realización del cálculo de las reservas de las menas en los sectores Yagrumaje y Punta Gorda. A partir de este informe se obtuvieron datos que permitieron establecer regularidades en la formación del yacimiento y se determinó además que la secuencia metalífera está representada por tres grupos genéticos de rocas de edades diferentes. (Aleojin et al., 1977)

En 1975 se desarrolló un informe donde se destaca el empleo de los métodos morfométricos para el estudio de la corteza de intemperismo ferroniquelífera tanto en la etapa de exploración como en la de búsqueda así como los criterios para la confección de los mapas de pendientes absolutas y medias en grados. Siendo este el primer informe de aplicación de estos métodos, lo cual representó un adelanto en el conocimiento integral de estas zonas (González_ Clemente, 1975).

En los años 1988 - 89 se desarrolla el estudio de los estadios de la Exploración Orientativa y Detallada para el níquel en el yacimiento Yagrumaje Sur y Oeste, realizándose además el cálculo de reservas según su estado al 01/06/1993. (Castillo et al., 1989)

En 1998 se desarrolla el Informe geológico detallado del yacimiento Yagrumaje Sur, parte norte a partir del cual se eleva el grado de conocimiento geológico de las reservas del mineral laterítico-sepentinítico. (Cadete_La O et al., 1998). Desde 2001 hasta la actualidad las investigaciones han estado dirigidas a la actualización, ajuste y validación de todas estas informaciones geológicas.

Antecedentes de los “Sistema de Información Geográfica en Cuba y el mundo”

En los años 1960 y 1970 emergieron nuevas tendencias en la forma de utilizar los mapas para la valoración de recursos y planificación. Dándose cuenta de que las diferentes coberturas sobre la superficie de la tierra no eran independientes entre sí, sino que guardaban algún tipo de relación, se hizo latente la necesidad de evaluarlos de una forma integrada y multidisciplinaria. Una manera sencilla de hacerlo era superponiendo copias transparentes de mapas de coberturas sobre mesas iluminadas y encontrar puntos de coincidencia en los distintos mapas de los diferentes datos descriptivos. En la actualidad este proceso se realiza a través de los Sistemas de Información Geográfica a partir de los que de una forma sencilla utilizando distintas capas de información, dan la posibilidad de eliminar aquellas zonas que son relevantes durante la explotación.

En la década de los 90 se comenzaron a observar las primeras aplicaciones de los SIG en Cuba cuando se desarrolló por el Instituto de Geografía Tropical del CITMA el SIG del nuevo Atlas Nacional.

A partir de ese momento se fueron adquiriendo los primeros conocimientos y metodologías que permitieron acercarse al uso de esta moderna tecnología por un grupo de instituciones relacionadas con la geociencias y la explotación de los recursos naturales. Sin embargo no es hasta el año 1996 cuando se produce en nuestro país el “boom” inicial de la utilización de las herramientas de los SIG con la proliferación de varios paquetes de *software* extranjeros asociados a esta temática (Inerarity_Striker & Delagado_Fernández, 1998).

La temática de los SIG en Cuba y el mundo ha estado dirigida principalmente a las investigaciones de evaluación de riesgo y vulnerabilidad donde (Corominas, 1987); (Almaguer_Carmenate & Guardado_Lacaba, 2007); (Batista, 2009); (Viltres_Milán et al., 2011); (Acosta_Aguila et al., 2013); (Reyes_Chaves & Fernández_Arce, 2014); (Reyes_Chaves et al., 2014); (Ojo et al., 2015); y otros investigadores han empleado esta herramienta para la elaboración de mapas de vulnerabilidad por la ocurrencia de deslizamientos obteniendo como resultado la división de las áreas en baja, moderada y alta vulnerabilidad.

De igual forma los SIG se han utilizado para la exploración de depósitos minerales como es el caso de la investigación realizada por (Ott et al., 2015) donde a partir de la combinación de técnicas de procesamiento de imágenes de sensores remotos fueron capaz de establecer al norte de Chile áreas favorables para la acumulación de cobre. Una investigación equivalente a esta fue la desarrollada en Finlandia pero para la exploración de oro por (Nykänen et al., 2007).

Los SIG también han sido empleados en el estudio de los impacto medio ambientales (Hmaidi et al., 2015); (Primelles_Fariñas, 2002); estudios geomorfológicos a través del procesamiento de imágenes satelitales (Bishop & Shroder, 2000), en estudios geográficos, de recursos hidráulicos e incluso hasta en la esfera de la salud.

En todas estas áreas han sido empleados y no se ha visto la importancia que adquiere esta herramienta durante los trabajos no solo de exploración sino también de explotación geológica en los yacimientos lateríticos. Es por ello que en esta investigación se propone el uso de los SIG para el establecimiento de las áreas perspectivas para la extracción minera en uno de los yacimientos presentes en esta región.

Rasgos geológicos regionales

Geológicamente el área se encuentra ubicada en el bloque oriental cubano caracterizado por una gran complejidad geólogo-tectónica que se pone de manifiesto a través de la actividad sísmica.

En la constitución geológica del archipiélago cubano se destacan dos elementos estructurales principales: el cinturón plegado y el neoa autóctono, (Iturralde-Vinent, 1996a). ver Figura 2.

El cinturón plegado, 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, representando las unidades geológicas que integran grandes entidades paleogeográficas que marcaron la evolución del Caribe noroccidental.

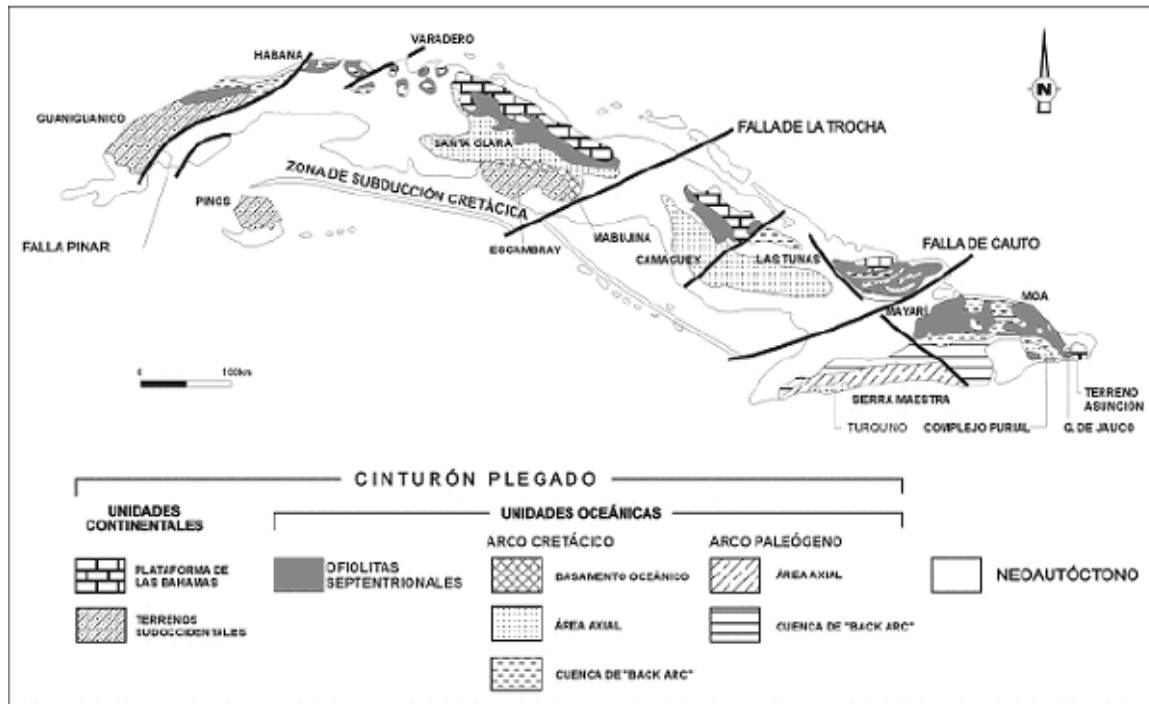


Figura 2. Mapa geológico esquemático de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoautóctono (Iturralde-Vinent, 1996a).

El área de estudio está enmarcada dentro de los límites del macizo ofiolítico Mayarí-Sagua-Baracoa, en el cual las unidades continentales del cinturón plegado no están representadas; y las unidades oceánicas están constituidas por las ofiolitas septentrionales, las rocas del arco de islas volcánico del Cretácico, o 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 neoautóctono está constituido por materiales terrígenos y carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario, que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado (ver Tabla 1)

Unidades oceánicas

Ofiolitas septentrionales: el complejo de rocas ultramáficas aflora en toda la porción central y meridional del área y está constituido predominantemente por ultramafitas, piroxenitas serpentinizadas: dunitas, harzburgitas, wherlitas, lherzolitas y piroxenitas, como parte de

las litologías mantélicas (Andó et al., 1989); (Fonseca et al., 1985); (Proenza, Joaquín et al., 1999b); (Ríos & Cobiella, 1984) y (Torres, 1987). (Ver Anexo No. 1)

El complejo máfico está representado por gabros que mantienen una estructura de grandes bloques, la mayoría de los cuales se disponen en las zonas periféricas del complejo ultramáfico. Regionalmente este complejo está representado por gabros olivínicos, gabro-noritas, anortositas y gabros normales. Además con el complejo máfico se asocia una fase filoniana tardía representada por grandes diques de gabros pegmatitas (Muñoz & Campos, 1994).

El contacto entre el complejo ultramáfico y máfico es mayoritariamente tectónico, aunque (Andó et al, 1989) describieron sectores donde el contacto es transicional.

El complejo vulcano-sedimentario contacta tectónicamente con los demás complejos del corte ofiolítico (Proenza, Joaquín 1997); (Proenza, Joaquín et al., 1999a), (Proenza, Joaquín et al., 2000). Está representado por la Fm. Quiviján (Iturralde-Vinent, 1996a); (Iturralde-Vinent, 1998) la cual incluye basaltos amigdaloides y porfíricos (algunas veces con estructura de almohadilla), con intercalaciones de hialoclastitas, tobas, capas de cherts y calizas (Quintas, 1989).

Arco de isla volcánico del Cretácico: las rocas de esta unidad están representadas en la región por la formación Santo Domingo. (Iturralde-Vinent, 1976) y (Proenza, Joaquín & Carralero, 1994)

Formación Santo Domingo: (Cretácico Aptiano-Turoniano): 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.

Cuencas de *piggy back* del Campaniense Tardío-Daniense: A mediados del Campaniense, culminó la actividad volcánica y comenzaron los procesos de cabalgamiento de las secuencias volcánicas generadas y de las ofiolitas del mar marginal (obducción) sobre el borde meridional de la Plataforma de Las Bahamas. En estas condiciones de inestabilidad tectónica se desarrollaron una serie de cuencas, que se comportaron como cuencas de "*piggy back*" (también denominadas "cuencas superpuestas de primera

generación";(Quintas, 1989)). De este estadio son representativas las formaciones sedimentarias La Picota y Mícaro.

Por encima de estas formaciones típicas de los períodos de inestabilidad tectónica aparecen secuencias terrígenas-carbonatadas de la etapa platafórmica, que presentan un carácter molásico y flyschoides, caracterizadas por presentar una estructura simple. La formación Capiro es la única representante de esta asociación dentro del área de estudio. (Rodríguez_Infante, 1998a)

Tabla 1. Rocas pertenecientes a la región según (Quintas, 1989) e (Iturralde-Vinent, 1996a). (Tomado de Rodríguez, 1998) y modificado por la autora

Tipos de Rocas/Fm	Asociaciones Estructuro Formacionales F Quintas, 1989	Elementos Estructurales Iturralde-Vinent, 1996		
Rocas Ultrabásicas serpentizadas y Complejo básico	AEF de la antigua corteza oceánica	Ofiolitas septentrionales	Unidades oceánicas	CINTURÓN PLEGADO
Fm. Quibiján	AEF del arco volcánico del Cretácico	Arco volcánico del Cretácico		
Fm. Santo Domingo				
Fm. La Picota	AEF cuencas superpuestas al arco volcánico del Cretácico	Cuencas piggy-back 1 ^{ra} generación		
Fm. Mícaro				
Fm. Sabaneta	Arco volcánico del Paleógeno	Arco volcánico del Paléogeno		
Fm. Capiro	Cuenca superpuestas de la etapa platafórmica	Cuencas piggy-back 2 ^{da} generación		
Fm. Majimiana Fm. Júcaro Depósitos Cuaternarios	Secuencias terrígeno –carbonatadas de la etapa de desarrollo platafórmico	NEO AUTOCTÓNO		

En consecuencia, estas formaciones constituyen un registro temporal del proceso de emplazamiento tectónico (obducción) de las ofiolitas, el cual estuvo enmarcado en el tiempo de desarrollo de estas cuencas.

Arco volcánico del Paleógeno: durante el Paleoceno-Thanetiense y el Eoceno Medio Inferior se desarrolló otro régimen geodinámico de arco de islas volcánicas en Cuba. Esta actividad volcánica estuvo restringida fundamentalmente a la parte oriental de la isla, y en nuestra zona se considera como materiales distales del vulcanismo paleogénico.(Iturralde-Vinent, 1995); (Proenza, Joaquín & Carralero, 1994) y (Quintas & Proenza, 1995).

Con esta secuencia viene asociada la formación Sabaneta la cual se caracteriza por presentar rocas vulcanógenas sedimentarias de granos finos las cuales usualmente están zeolitizadas o montmorillonitizadas, con intercalaciones de calizas, silicitas, tobas cloritizadas y rara vez de basaltos.

Cuencas de *piggy back* del Eoceno Medio-Oligoceno: En el Eoceno Medio Inferior concluyó la actividad volcánica paleógena. A partir de este momento y hasta el Oligoceno se desarrolló un segundo estadio de cuencas de *piggy back* (Quintas & Blanco_Moreno, 1993) en las cuales se depositaron espesores considerables de materiales terrígenos y carbonatados. Esta secuencia está representada por la formación Capiro.

La Formación Capiro del Eoceno Superior está compuesta por areniscas, aleuolitas y margas bien estratificadas con intercalaciones de conglomerados finos compuestos por cantos de serpentinitas, calizas y cristaloclastos de piroxeno y cuarzo.

El Neoautóctono (materiales post-Eoceno)

El neoautóctono está constituido por formaciones sedimentarias depositadas en régimen de plataforma continental que yacen discordantemente sobre las unidades del cinturón plegado. Las rocas del neoautóctono constituyen una secuencia terrígeno-carbonatada poco deformada que aflora en las cercanías de las costas formando una franja que cubre discordantemente los complejos más antiguos y que estructuralmente se caracterizan por su yacencia monoclinal suave u horizontal (Quintas, 1989); (Iturralde-Vinent, 1994); (Iturralde-Vinent, 1996b); (Crespo, 1996); (Rodríguez_Infante, 1998a, 1998b). Son representativas de esta secuencia las formaciones Majimiana y Júcaro.

Depósitos del Cuaternario: Constituyen una cobertura prácticamente continua de génesis continental y marina sobre todas las secuencias de rocas más antiguas, presentando pocos cambios diagenéticos y pequeño espesor. Estos depósitos están constituidos por calizas organodetríticas con gran contenido de fauna, predominando los moluscos contemporáneos. Aparecen también aleuolitas calcáreas, arenas margosas y arcillas. Los depósitos ubicados en las desembocaduras, cauces y márgenes fluviales están constituidos por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, aleuolitas y arcillas derivadas de la erosión fluvial.

Rasgos geológicos del yacimiento

Las rocas que componen el yacimiento, están representadas por ultrabasitas serpentinizadas de la asociación ofiolítica, que en su conjunto está compuesta por rocas del complejo ultramáfico, máfico y vulcano - sedimentario, mientras que el complejo de diques de diabasas está muy mal representado o ausente.

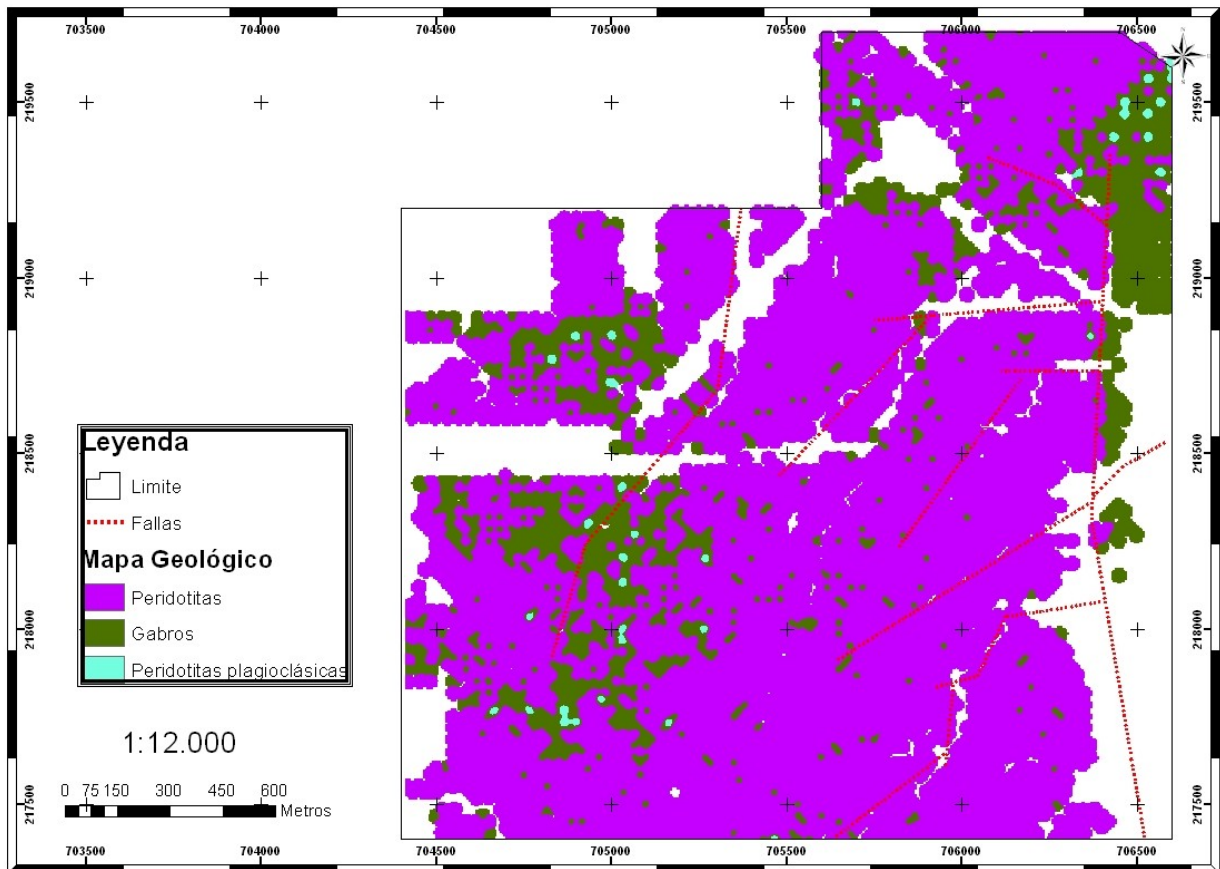


Figura 3. Mapa geológico del basamento del yacimiento Yagrumaje Sur (Barrientos, K 2007).

Las secuencias pertenecientes a la asociación ofiolítica están representadas por los complejos siguientes, (Proenza, Joaquín et al., 2003):

1. Una zona de harzburgitas con texturas de tectonitas.
2. Una zona de harzburgitas que contienen principalmente cuerpos de dunita, peridotitas impregnadas (con plagioclasas y clinopiroxenos), sills de gabros, diques de gabros y pegmatoides gabroicos; así como cuerpos de cromitas (esta zona correspondería a la denominada Moho Transition Zone).

3. Una zona de gabros, los cuales presentan en la base un gran desarrollo de gabros bandeados (gabros olivínicos, gabronoritas).
4. El complejo vulcano-sedimentario.

Las rocas del complejo ultramáfico abarcan prácticamente todo el centro del yacimiento y están representadas por peridotitas normales y piroxenitas a las que están asociados los cuerpos mineralizados; las mismas alcanzan el 77,2 % y las peridotitas impregnadas el 13,4 %. Las mismas se caracterizan por presentar un color verde oscuro o gris verdoso, un grado de serpentización variable y por un alto agrietamiento, a causa de procesos dinamo-metamórficos durante la elevación y emplazamiento de las grandes masas peridotíticas a la superficie en presencia de agua. Sobre estas rocas se forman relieves muy variados en dependencia del nivel hipsométrico que ocupan, condicionando el desarrollo de la corteza de meteorización. (Lavaut_Copa et al., 2007)

Mientras que las rocas máficas están diseminadas en afloramientos por todo el yacimiento dando lugar a la existencia de ventanas no mineralizadas y principalmente en el borde del yacimiento a excepción del flanco sur que están representadas por: peridotitas plagioclásicas, gabroides alcanzando un 9,22 % de rocas máficas (ver Figura 3). Los mismos presentan color oscuro, algo verdoso, con textura masiva a fluidal, aflorando siempre asociados a las serpentinitas.

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.

En el área que abarca esta concesión aparece en el basamento un tipo de roca que fue declarado como rocas recrystalizadas de composición considerablemente antigorítica. Estas rocas adquieren gran importancia en el estudio del comportamiento de los yacimientos, ya que se pudo observar que en el área donde ellas se encuentran las cortezas se caracterizan por su pobre desarrollo y los bajos contenidos de níquel. (Aleojin et al., 1977)

Geomorfológicamente el área se caracteriza por presentar una zona de sedimentación pre-montañosa con una inclinación general hacia el norte de unos 6 - 7°, constituyendo

una superficie ondulante, sobre todo lateralmente (dirección sureste - noroeste), motivado por la existencia de una sucesión de parte-aguas aplanados y cañadas con pendientes, que terminan en arroyos con aguas intermitentes y corrientes, alargados en las direcciones noreste y noroeste siguiendo los dos sistemas de fallas tectónicas principales que cortan al yacimiento. En dirección al oeste - noroeste, el terreno es sumamente ondulado, ya que las principales cañadas y arroyos, que tributan sus aguas a los ríos Punta Gorda y Cayo Guam, corren en dirección noroeste y noreste respectivamente.

Tectónica del yacimiento

La región de estudio desde el punto de vista tectónico pertenece a la gran elevación contemporánea formada por las hiperbasitas del macizo Mayarí-Baracoa.

En el área que abarca este yacimiento existen dos sistemas de fallas tectónicas principales que cortan al yacimiento en dos direcciones noreste y noroeste. (ver Figura 3). La porción más septentrional del yacimiento tiende a separarse del resto por una falla de dirección noroeste, formando un pequeño domo semi-redondeado, observándose un ensanchamiento de las áreas más planas (con pendientes hasta 10^0) hacia el noreste y siguiendo la dirección de los parte aguas. Estas superficies aplanadas juegan un papel controlador de las mayores potencias (>10 m) de corteza friable y de las menas de significación industrial (menas LB+SB).

La combinación y manifestación de las dislocaciones de diferente dirección llevaron a la distribución de toda la superficie del yacimiento en algunos pequeños bloques de configuración compleja. La amplitud de las dislocaciones a juzgar por los materiales existentes no son más de 10 a 15 m. Los ángulos de buzamientos de fallas son principalmente abruptos y constituyen de $40^0 - 60^0$ a veces de 20^0 a 30^0 .

La manifestación de la tectónica de bloques jugó su papel en la formación y conservación de las cortezas de intemperismo en las ultrabasitas. Los desplazamientos tectónicos preliminares prepararon el substrato para la circulación intensiva de las aguas e intemperización de las serpentinitas tanto por la superficie como por algunas fracturas que van hacia la profundidad. Las dislocaciones de periodos tardíos contribuyeron a la descomposición de la corteza de intemperismo en los bloques elevados y a la dislocación y redeposición de su material. (Aleojin et al., 1977). En los bloques tectónicos hundidos la

potencia de la corteza “*in situ*” es mayor y se conserva mejor. Los movimientos contemporáneos de los bloques determinan la renovación del relieve y provocan la actividad intensa de la erosión. Como resultado tiene lugar el derrubio de las formaciones niquelíferas friables, su arrastre hacia abajo por las pendientes y el aplanamiento de terrazas entre algunos bloques.

Corteza de intemperismo del yacimiento

Sobre las rocas del complejo ofiolítico del este de Cuba se forman extensas áreas de corteza de intemperismo hasta su desarrollo laterítico, las cuales contienen cuantiosas reservas de níquel, cobalto y otros elementos útiles que constituyen la base del desarrollo industrial niquelífero. (Almaguer_Furnaguera, 1995b)

La corteza se caracteriza por estar compuesta por rocas ocrosas, deleznales, granulometría variable, de color pardo rojizo en los horizontes superiores, los cuales van aclarando su tonalidad con la profundidad hasta pardo amarillento o pardo verdosas, en dependencia de las estructuras de la roca original y donde se distinguen relictos de piroxenos alterados y otros minerales. La corteza fundamentalmente es el producto del intemperismo de los cúmulos ultramáficos principalmente los harzburgíticos que conforman el basamento apareciendo de forma casual intercalaciones de corteza producto de la alteración de rocas de composición básica (gabros) y ácidas (plagiogranitos y trondhjemitas) que crean aislada y pequeñas zonas de empobrecimiento en el corte ferroniquelífero cobáltico, pero que no tiene en este yacimiento una significación considerable.

La corteza de intemperismo en Yagrumaje Sur se caracteriza por ser madura, con mayor desarrollo en los ocreos estructurales y por tanto con mayor mineralización en todos los horizontes litológicos, predomina el perfil completo en la corteza. En este yacimiento afloran áreas sin cortezas debido a la presencia de rocas gabroides.

Hacia la parte este del yacimiento existe un desarrollo de la corteza de origen básico (gabro) la cual es típicamente bauxítica, lo cual se corrobora en la Figura No. 3.

Tabla 2. Parámetros fundamentales de la corteza. Ley de corte 1,0 % Ni.

Parámetro	Potencia promedio (m)
Coraza ferruginosa (Esc)	3.35
Laterita de balance	4.77
Serpentinita de balance	2.38
Relación Esc/min (LB+SB)	0.58
Relación LB+SB	3.56
Relación Fe/Ni (LB+SB)	32.69
Relación Ni/Co (LB+SB)	11.01

La potencia de la corteza de intemperismo en este yacimiento oscila desde 1 a 40 m, siendo la media de 8 m. Las mayores potencias se observan en la parte central y oriental, ambas siguiendo la dirección norte - sur mientras en el Sector Oeste la potencia promedio es de 6,9 m, oscilando desde 1 hasta 32 m; como se observa en la Tabla 2.

Tabla 3. Correlación entre los distintos términos empleados

Litológico	Correlación
(Según Lavaut, 2007)	con horizonte industrial
1 Ocre inestructurales con perdigones	FF FB
2 Ocre inestructural	LF
3 Ocre estructural final	LB
4 Ocre estructural inicial	SB
5 Serpentinita desintegrada o lixiviada	SD SF
6 Roca madre	RE

En la zona de estudio está bien desarrollada la corteza de intemperismo, que solo es interrumpida por la presencia de afloramientos de rocas o la presencia de pendientes, cañadas u arroyos. Desde el punto de vista litológico de la corteza ya meteorizada,

tenemos en el área 6 horizontes según nomenclatura de (Lavaut_Copa et al., 2007); las que se muestran a continuación de arriba hacia abajo (ver Tabla 3):

- Ocre inestructurales con perdigones (OICP)

Este horizonte alcanza el más alto grado de oxidación de la corteza, representando los productos finales de intemperismo en forma de óxidos e hidróxidos. Aparece como una masa porosa, muy deleznable de color rojo oscuro con una alta concentración de concreciones ferruginosas (perdigones) de color negro brillante redondeadas que desaparecen de forma gradual con la profundidad. Su composición mineralógica fundamentalmente está representada por goethita, gibbsita, minerales arcillosos, cromita, magnetita, y en menor cantidad minerales del grupo de la serpentina como relictos. Este horizonte está muy relacionado con las menas ferruginosas no industriales (FF, FB y LF). En algunos casos se observan contenidos de Ni altos, esto puede estar dado por mezclas con otras litologías lo cual puede ocurrir de manera natural al estar imbricados pequeños horizontes con altos contenidos de Ni dentro de su masa.

- Ocre inestructural (OI)

Es la zona más representativa del yacimiento, apareciendo como un manto continuo de color rojo oscuro de alta porosidad, la que permite el arrastre de los componentes de mayor movilidad, de aquí que en ella exista un empobrecimiento de níquel respecto al horizonte de ocre estructural final, su composición mineralógica fundamental está representada por goethita, gibbsita, minerales arcillosos, minerales del grupo de la serpentina, cromita y en cantidades menores cuarzo y minerales de manganeso. Este horizonte es el de más alta difusión en el yacimiento a él se vinculan fundamentalmente las menas limoníticas niquelíferas (LB); siendo con el horizonte anterior los de mayor importancia para su uso industrial.

- Ocre estructural final (OEF)

Está representada por ocre deleznable muy porosos de color amarillo – pardo – rojo con tonalidades diversas en los que se observan relictos muy pequeños e intemperizados de la roca madre, así como vetillas finas de manganeso.

Su composición mineralógica se distingue del horizonte precedente por un predominio de minerales ferruginosos y un aumento gradual de lateritas níquelíferas, la mineralización está representada fundamentalmente por goethita, gibbsita, minerales arcillosos, minerales del grupo de la serpentina, cromita, y en mucho menor proporción, minerales de manganeso y magnetita.

Este horizonte presenta una alta representatividad en el perfil litológico del yacimiento a él se vinculan fundamentalmente las menas SB (Serpentinita de Balance) y LB, de aquí que junto a los ocres inestructurales constituyen las zonas de más alta mineralización del yacimiento.

- Ocre estructural inicial (OEI)

Su coloración va desde pardo oscura en algunos casos hasta pardo-amarillento verdoso, friables muy arcillosos y ocretizada, en la que se distinguen pequeños fragmentos de hiperbasitas intemperizadas, aparecen piroxenos muy alterados, su mineralización se caracteriza por la presencia de minerales del grupo de la serpentina, minerales arcillosos, goethita, gibbsita, magnetita, minerales de manganeso, etc. Este horizonte está poco representado en el área de estudio.

- Serpentinita desintegradas o lixiviada (RML)

Se caracteriza por ser una zona transicional de rocas compactas y friables, en ocasiones ocretizadas y arcillosas. Las serpentinitas duras aparecen muy desintegradas con un alto desarrollo de vetillas entrecruzadas, de carbonatos, hidróxidos de hierro y minerales arcillosos, las rocas del friable aparecen parcialmente arcillosas con mayor o menor grado de ocretización y en las que se distinguen piroxenos bastitizados, carbonatos, menas metálicas, procesos de nontronización, etc.

En esta zona se desarrolla la mena SD (Serpentinita Dura) caracterizada por su bajo contenido de hierro y altos contenidos de níquel, aunque en el yacimiento en general esta mena es poco frecuente.

- Roca Madre Agrietada (RMF).

Las rocas en este horizonte están representadas por harzburgitas y sus serpentinitas fundamentalmente, muy agrietadas de color verde claro con vetillas entrecruzadas de

silicatos de níquel, carbonatos, en su masa aparecen piroxenos bastitizados, en planos de fracturas aparecen ligeros indicios de ocretización, generalmente son rocas estériles pero en ella se desarrolla de forma discontinua la mena SD (serpentinitas duras).

- Corteza por gabros (CG)

Este horizonte está constituido por pequeños y aislados cuerpos de rocas básicas (gabros) y ácidas (plagiogranitos o trondhjemitas) las que se encuentran muy intemperizadas y generan una corteza muy pobre en Fe, Ni y Co con contenidos de Al_2O_3 que llegan hasta el 25 %, no obstante su reducida potencia, pequeña extensión y baja distribución hacen que no sean nociva al resto de la corteza.

Generalidades geoquímicas y mineralógicas del yacimiento Yagrumaje Sur

La mineralogía de las menas lateríticas responde a la migración geoquímica de los elementos, es por ello que su composición mineralógica es sumamente compleja. En este epígrafe se hará una descripción breve de las características geoquímicas y mineralógicas de las menas lateríticas industriales (LB, SB y SD) y no industriales (FF, FB y LF) que componen este yacimiento. Para ello se realizó un perfil idealizado donde quedaron expuestas por mena su composición química y mineralógica.

Como bien se observa en la Figura 4 la composición química en este yacimiento presenta un marcado incremento de las concentraciones de Fe_2O_3 y Al_2O_3 y una disminución de la SiO_2 y el MgO hacia las partes superiores del perfil lo cual es típico de este tipo de corteza laterítica. El aumento de la SiO_2 y el MgO hacia los horizontes inferiores se debe en gran medida a la presencia de serpentinita alterada compuesta por minerales serpentiniticos, olivinos, etc; estos hacia las zonas superiores tienden a disminuir debido a las condiciones oxidantes que existen en estas áreas trayendo consigo las mayores concentraciones de aluminio, hierro y cromo.

Los contenidos de CoO y MnO tienden a concentrarse plenamente hacia la parte superior del perfil, en los horizontes donde contactan las menas de LF y LB, disminuyendo casi linealmente hacia los horizontes inferiores, lo que ha sido expuesto por otros

investigadores (Llorca & Monchoux, 1991); (Llorca, 1993); (Labrador, M et al., 2007) y (Roque_Rosell et al., 2010).

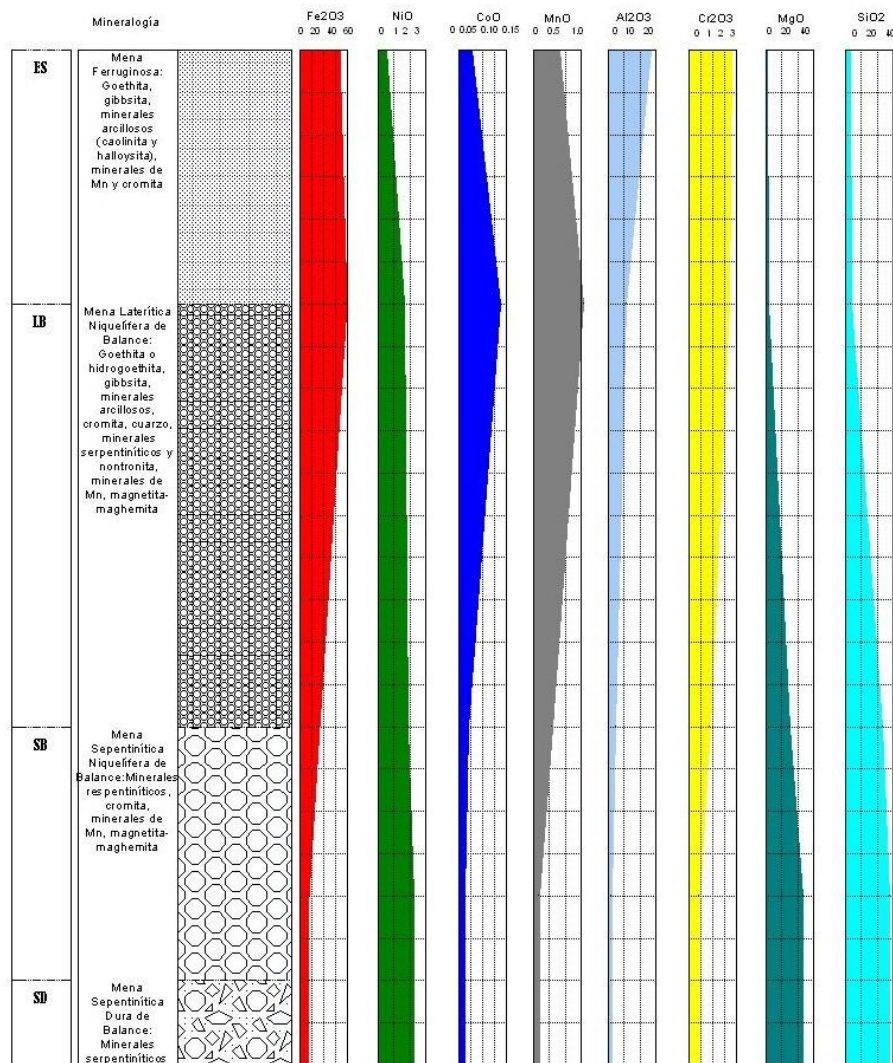


Figura 4. Perfil esquemático del yacimiento Yagrumaje Sur. *ES: Menas ferruginosas (FF, FB y LF)

Las concentraciones de Ni son altas y tienden a aumentar considerablemente hacia la zona de serpentina alterada lo que es común en este tipo de yacimiento.

El yacimiento Yagrumaje Sur revela distribuciones desiguales de las principales fases minerales en las diferentes menas del perfil laterítico, distinguiéndose un predominio de la goethita, y a su vez se pueden observar altas concentraciones de gibbsita sobre todo en la parte superior del perfil. Es importante destacar la existencia de minerales de manganeso

en la zona donde contactan las menas de LF y LB que a pesar de no tener gran representatividad contienen un por ciento considerable.

Por otra parte, los minerales portadores de sílice y magnesio, entre los que se encuentran las serpentinas, cloritas, nepouita y enstatita, se localizan en las zonas bajas del perfil, o sea, en los horizontes de serpentinitas alteradas y serpentinita dura.

Conclusiones

No existe un procedimiento que permita definir las áreas perspectivas de los depósitos lateríticos mediante SIG.

Las rocas del complejo ultramáfico ocupan las mayores áreas del yacimiento, mientras que las rocas máficas aparecen diseminadas en afloramientos dando lugar a la existencia de ventanas no mineralizadas.

Según perfil idealizado de la corteza laterítica del yacimiento Yagrumaje Sur las mayores concentraciones de Co se localizan en el contacto existente entre las menas de LF y LB el que disminuye gradualmente hacia los horizontes inferiores, esto concuerda con lo antes expuesto por (Llorca & Monchoux, 1991); (Llorca, 1993); (Labrador, M et al., 2007) y (Roque_Rosell et al., 2010).

Capítulo II

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS DURANTE LA INVESTIGACIÓN

Introducción

Metodología de la investigación

Procedimiento para el establecimiento de áreas perspectivas mediante el uso de SIG

Muestreo comprobatorio

Conclusiones

Introducción

En el presente capítulo se aborda la metodología empleada durante la investigación, la misma consta de tres etapas fundamentales. Una primera etapa donde se analizó el estado del tema a desarrollar. En la segunda etapa se seleccionaron los materiales y procedimientos a emplear para obtener mediante el SIG las áreas perspectivas y en la etapa final se analizaron e interpretaron los resultados obtenidos.

Metodología de la investigación

La metodología seguida para dar respuesta a los objetivos propuestos en la investigación se detalla de forma resumida y por etapas en el gráfico que se expone en la Figura 6.

Etapas preliminar

Durante la primera etapa se realizó la revisión bibliográfica, se consultaron disímiles fuentes como la Revista de Geología y Minería, Sociedad Española de Mineralogía, la Tecnológica, además de otras revistas en idioma inglés como Geosphere, GRC Transaction, Geography and Geology entre otras fuentes. Se analizó la búsqueda referativa de los informes de la ONRM realizada en el año 2003 y los CD de las convenciones de Ciencias de la Tierra desarrollados hasta el 2015. También fueron examinadas las tesis de riesgo y vulnerabilidad que a pesar de no tener relación con la investigación, las metodologías que se implementan en ellas sirvieron de base para el desarrollo de este trabajo. Del mismo modo se consultaron los métodos que han sido empleados hasta la actualidad para la selección de las áreas perspectivas en las

empresas del níquel, se constató que no existe un procedimiento óptimo que permita una adecuada sectorización de los yacimientos lateríticos. Teniendo en cuenta lo antes planteado y en consonancia con las metodologías propuestas en los trabajos consultados se propone implementar un procedimiento para la selección de áreas perspectivas en yacimientos lateríticos basado en los Sistemas de Información Geográfica.

Toda la bibliografía utilizada durante la investigación fue archivada en el gestor bibliográfico EndNote x7, bajo la norma APA 6th, con transformaciones introducidas por la autora. Una vez concluido el estudio del tema a desarrollar se seleccionó como caso de estudio el yacimiento Yagrumaje Sur perteneciente a la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Etapas experimentales

En esta etapa se realizó una encuesta (ver Anexo 5) a un grupo de expertos pertenecientes a las empresas de la Unión del Níquel y el ISMMM para definir el conjunto de variables a emplear en el procedimiento a desarrollar. Como resultado se obtuvieron las variables con mayor peso, las que se observan en la Tabla 4.

Tabla 4. Variables que componen cada parámetro

Parámetros	Variables
Geomorfológicos	Pendiente
Hidrogeológicos	Red fluvial
Geólogo-Estructurales	Rocas y fallas
Mineros	Potencia de los horizontes meníferos y Pot (Esc/LB+SB)
Geoquímicos	Contenido de los elementos útiles y nocivos

La información a emplear para la creación de los mapas temáticos según las variables definidas fue tomada de la base de datos de las perforaciones ordinarias del yacimiento la cual consta de un total de 61 312 registros de pozos pertenecientes a la red de 33,33 x 33,33 m y 23,5 x 23,5 m. Mediante la herramienta Access (Gestor de Base de Datos) se procesaron las longitudes de los horizontes meníferos para obtener la variable potencia y se promediaron los contenidos de los elementos para cada horizonte.

La confección del procedimiento para la obtención de las áreas perspectivas se explica en detalle en el acápite “Procedimiento para el establecimiento de áreas perspectivas mediante el uso de SIG” del presente capítulo.

Etapas finales

En esta última etapa se procedió a la interpretación y caracterización de los mapas temáticos obtenidos en la etapa anterior. Además se caracterizaron las áreas perspectivas para la exploración y explotación minera y se conformó la memoria escrita de la investigación.

Procedimiento para el establecimiento de áreas perspectivas mediante el uso de SIG

El establecimiento de áreas perspectivas para la exploración y explotación minera en el yacimiento Yagrumaje Sur se realizó mediante el software ArcGIS versión 10.0. Para ello se generaron los diferentes mapas temáticos a partir de las variables establecidas por los expertos consultados. El procedimiento creado consta de tres pasos como se muestra en la Figura 8.

Antes de la creación de los mapas temáticos fue necesario establecer las áreas de influencia de los pozos que cortan los horizontes meníferos.

Paso 1: creación de los mapas temáticos

Mapa de pendiente: este mapa se obtuvo a partir del MDT realizado al parque Alejandro de Humbolt el que abarca nuestra área de estudio. Dicho MDT tiene un tamaño de celda de 15 x 15 m y fue corregido en el área del yacimiento con la z de amarre de los pozos perforado. Una vez obtenido el MDT mejorado se generó el mapa de pendiente con la herramienta Pendiente.

Mapa de red fluvial: el mapa de red fluvial se digitalizó en el ArcGIS a partir del MDT del terreno teniendo en cuenta todos los tipos de escurrimientos superficiales, ríos permanentes, temporales, arroyos y cañadas.

Mapa geológico: se obtuvo a partir del confeccionado por Geominera Oriente, para su uso fue necesario transformar los nombres de las rocas en códigos numéricos y convertirlo a formato raster (ver Tabla 5).

Tabla 5. Códigos numéricos empleados en el mapa geológico

Nombre de la roca	Código numérico
Peridotita	1
Gabros	2
Peridotita plagioclásica	3

Mapa de potencia de los horizontes meníferos: el mapa de potencia se obtuvo a partir de la interpolación de los valores de longitud promediada para cada horizonte. El interpolador empleado fue el inverso de la distancia con un elipsoide de búsqueda de 33 m para el elipsoide mayor y menor (ver Figura 5).

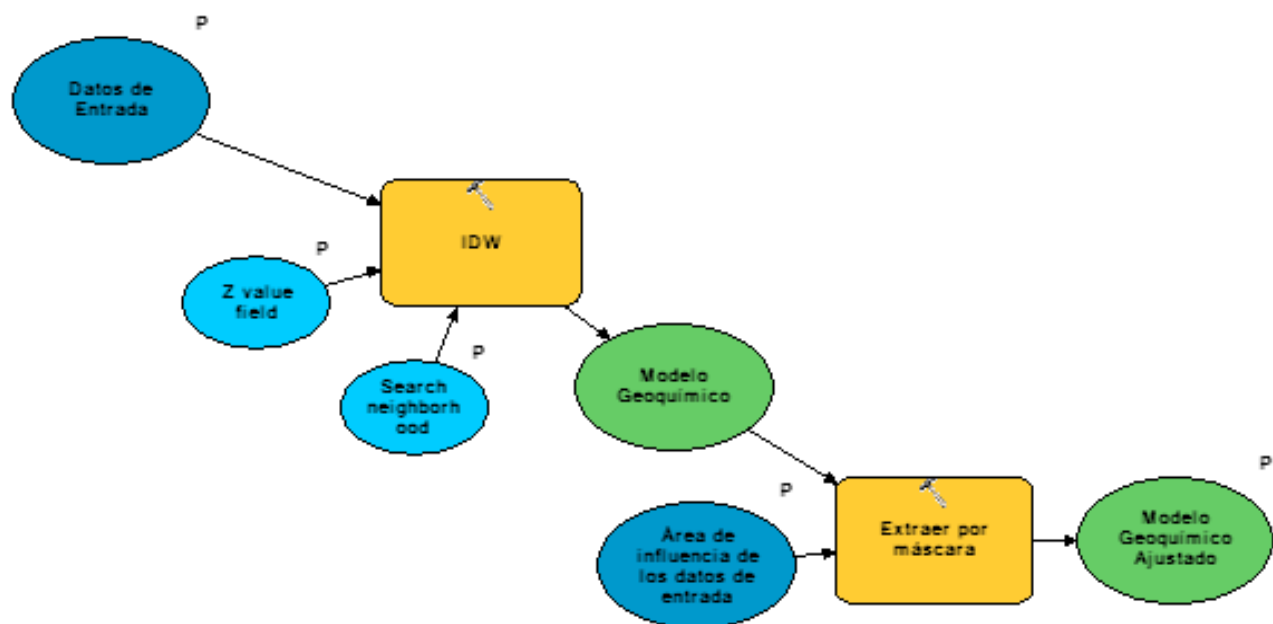


Figura 5. Flujo de procesamiento de los mapas de potencia y contenido.

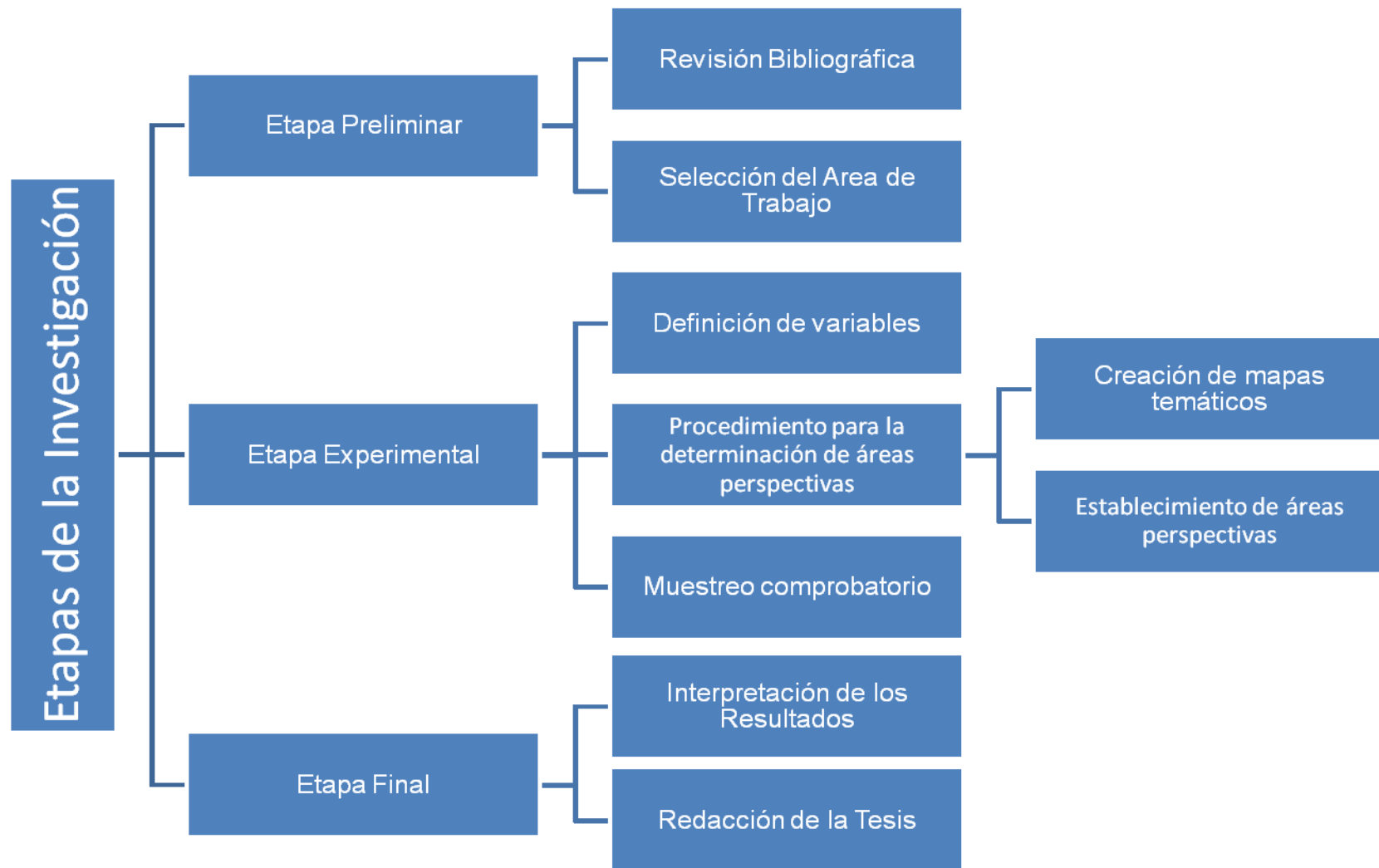


Figura 6. Etapas metodológicas seguidas en la investigación

Mapa de relación potencia de Esc/LB+SB: este mapa fue confeccionado con la herramienta calculadora dividiendo los valores de la potencia del horizonte escombro entre la potencia del horizonte de LB+SB.

Mapas de contenido de elementos útiles y nocivos: refleja la distribución de los contenidos de Fe, Ni, Co, Si, Mg y Al en los horizontes meníferos de la corteza laterítica. Para realizar dichos mapas se creó un flujo de procesamiento mediante la herramienta *model builder* del *software* ArcGIS como se observa en la Figura 5. El flujo de procesamiento consta de tres etapas: selección de los datos, herramienta de interpolación y ajuste por área de influencia.

La herramienta de interpolación empleada fue el inverso de la distancia, para la cual fue necesario establecer el valor a interpolar (variable de contenido) y los elipsoides de búsqueda. Una vez obtenidos los mapas de contenido fueron ajustados mediante el área de influencia de los valores empleados en la interpolación.

Paso 2: reclasificación de los mapas temáticos

En esta etapa del procedimiento se realizó la reclasificación de los mapas temáticos ya obtenidos mediante la herramienta reclasificar; como se observa en el flujo de procesamiento de la Figura 7.

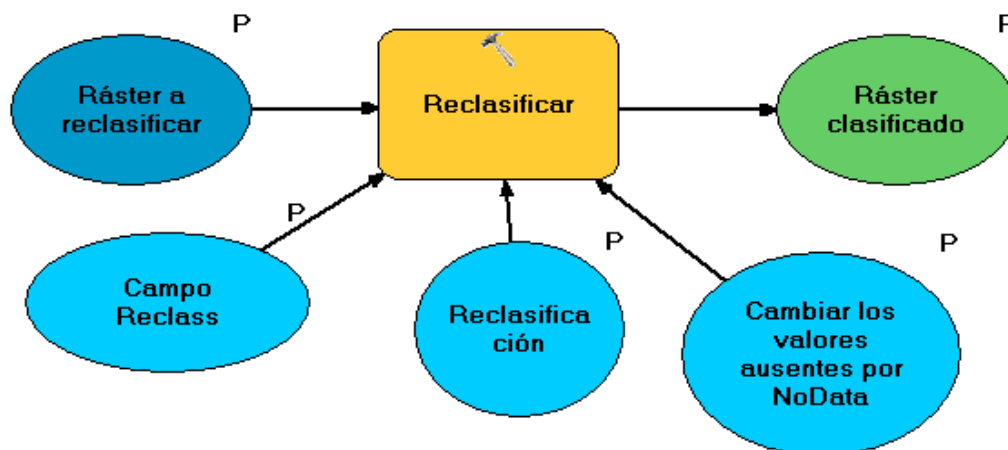


Figura 7. Flujo de procesamiento para la clasificación de los mapas temáticos.

Para realizar la reclasificación se establecieron rangos prospectivos para cada uno de los mapas temáticos; teniendo en cuenta las particularidades tecnológicas de la empresa que explotará el depósito mineral que en este caso de estudio es la empresa Comandante Ernesto Che Guevara que trabaja con contenidos de $\text{Ni} \geq 0,9 \%$, $\text{Fe} \geq 12 \%$, $\text{Co} \geq 0,08 \%$, $\text{SiO}_2 \leq 10 \%$ y $\text{MgO} \leq 4 \%$, con una potencia mínima industrial de 1 m y una relación Pot Esc/LB+SB de 0-2 m. En la Tabla 6 se muestran los rangos de reclasificación empleados.

Tabla 6. Rangos de reclasificación de las variables empleadas en el procedimiento

Variables	Poco	Medianamente	Muy
Geol	2-2,9	3-3,9	1-1,9
Pend	15-33,52	0-5	5-15
Pot	0,43-3	3-5	5-32,56
Pot Esc/LBSB	8-20	2-8	0-2
Fe	12,44-20	20-35	35-56,2
Ni	0,9-1,00	1-1,12	1,2-2,5
Co	0,013-0,08	0,08-0,100	0,1-0,79
Al	15-22,83	10-15	2,3-10
Si	12-41,3	10-12	1,73-10
Mg	10-26,82	4-10	0,47-4

Todos los mapas temáticos fueron reclasificados en tres valores que expresan el grado de prospectividad, como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7. Código de reclasificación

Perspectiva	Código de reclasificación
Poco	1
Medianamente	2
Muy	3

Paso 3: establecimiento de áreas prospectivas

Una vez reclasificados los mapas y mediante el uso de la herramienta Superposición Difusa se establecieron las áreas que son prospectivas para la exploración y explotación minera.

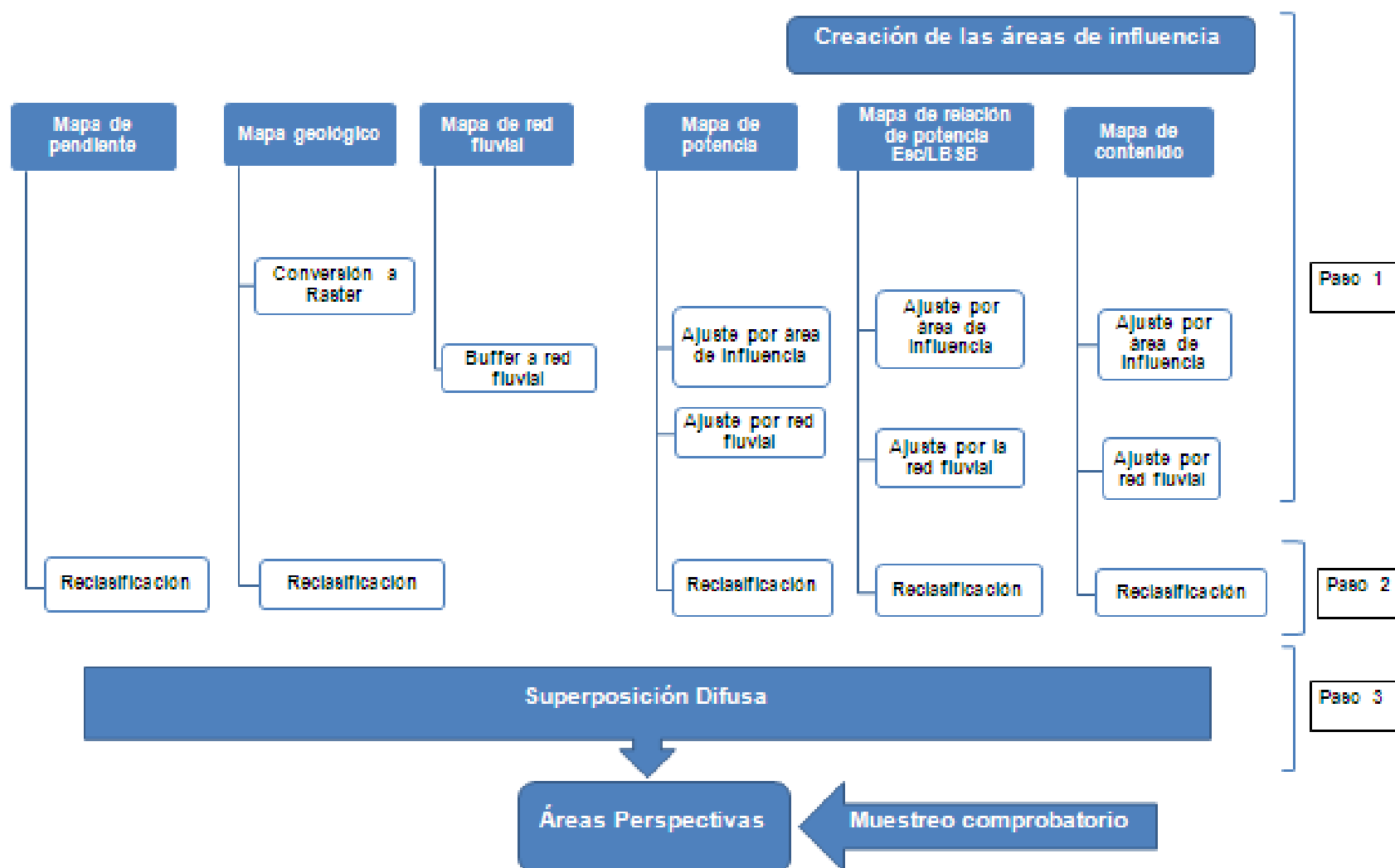


Figura 8. Flujograma del procedimiento para el establecimiento de las áreas perspectivas

Muestreo comprobatorio

Una vez obtenido el mapa de áreas perspectivas para la exploración y explotación minera se ejecutó el muestreo para corroborar los resultados obtenidos en el mapa de áreas perspectivas. Este proceso se realizó de forma puntual en diferentes partes del yacimiento como se observa en el Anexo 2.

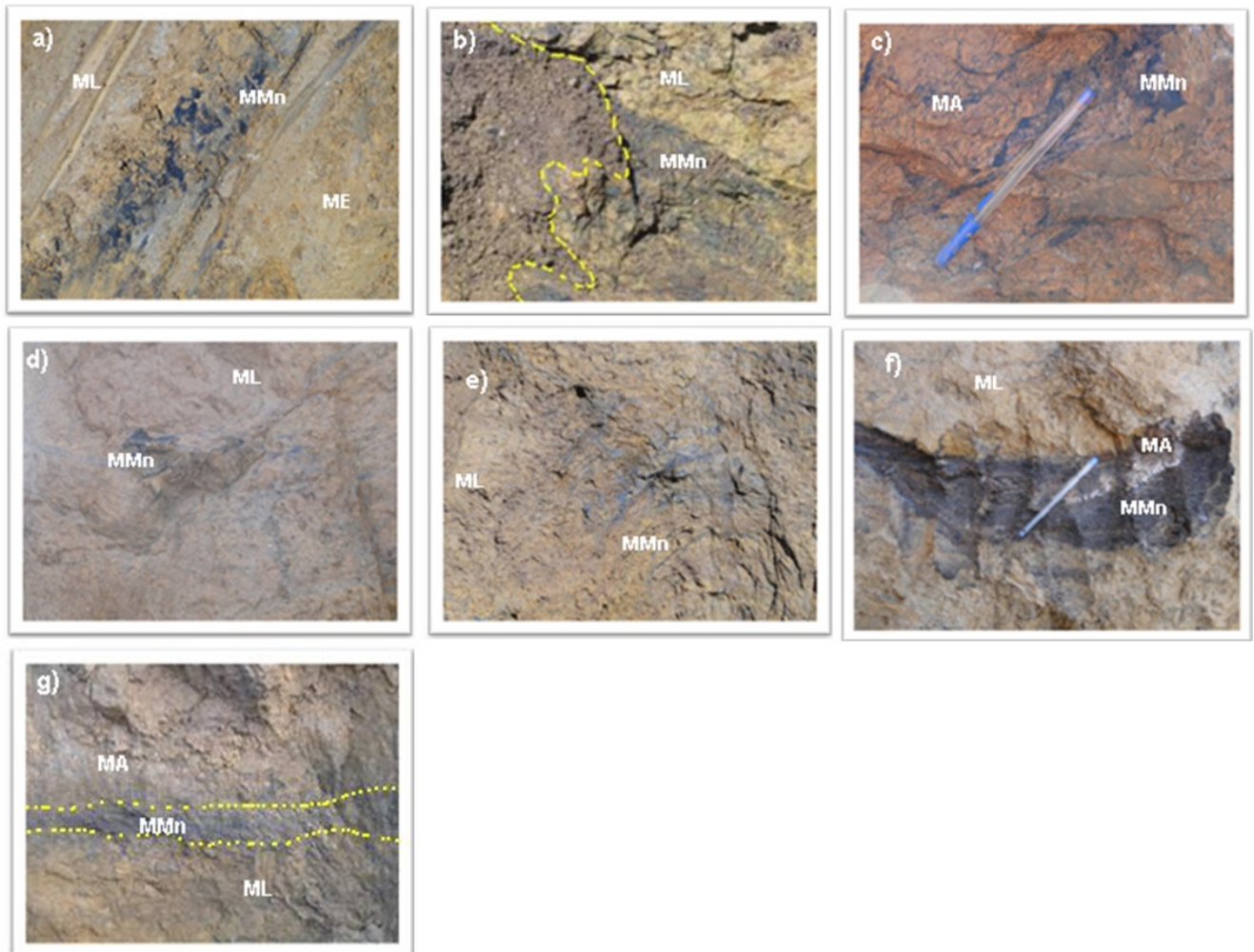


Figura 9. Horizonte de la corteza laterítica muestreados

a) muestra YS1: Afloramiento de manchas de minerales de Mn (MMn), intercalado con material laterítico (ML) y un material escamoso (ME) de color amarillo claro, sedoso al tacto. b) muestra YS2: Afloramiento de vetillas de minerales de Mn que se encuentran intercaladas con un material laterítico de color crema y marrón rojizo en algunas zonas. c) muestra YS3: Afloramiento de manchas de minerales de Mn intercalado con un material arcilloso (MA) de coloración rojiza. d) muestra YS4: Afloramiento de manchas de Mn intercalado con material laterítico. e) muestra YS5: Afloramiento de vetillas de minerales de Mn intercalado con material laterítico de coloración crema. f) muestra YS6: Afloramiento de nódulo de Mn intercalado con

material laterítico de coloración crema y un material blanco arcilloso. g) muestra YS7: Afloramiento de vetillas de minerales de Mn intercalado con material laterítico de coloración crema.

Se muestrearon un total de siete puntos, el peso de cada muestra tomada fue de 1 Kg y esta fue debidamente etiquetada con la sigla YS. En las áreas muestreadas afloraba un material de color negro con tonalidades azuladas predominantemente hacia la parte superior del horizonte limonítico que son las denominadas mineralización de óxido e hidróxido de Mn ricos en Co (ver Figura 9).

Técnica para el análisis químico. (Espectrometría de Absorción Atómica)

Las muestras fueron analizadas mediante el método de Espectrometría de Absorción Atómica (EAA) en el Centro de Investigación del Níquel (CEDINIQ); el equipo utilizado fue un Espectrómetro de Absorción Atómica con lámpara de cátodo hueco marca ATI-Unicam.

Esta técnica permite el análisis cuantitativo de casi todos los elementos de la tabla periódica, aunque es importante destacar que en dependencia del elemento a obtener así será la mezcla a preparar. En el caso de la determinación de los contenidos de (Ni, Fe, Co, Mg y Mn) la porción de ensayo es tratada con una mezcla de ácidos clorhídrico y nítrico concentrados (agua regia); luego las sales que se forman son disueltas con ácido clorhídrico diluido 1:1. La medición espectrofotométrica del Ni se realizó a una longitud de onda de 341,5 nm y para el resto de los elementos (Fe, Co, Mg y Mn) la longitud de onda fundamental recomendada por la literatura, utilizando lámparas de cátodo hueco para la excitación y como fuente de atomización la llama de aire acetileno.

Para la obtención de los contenidos de Si, Cr y Mn la muestra se descompuso mediante la fusión con la mezcla fundente (Bórax y Carbonato de sodio en proporción 2:1). Luego se le realizó la medición empleando lámparas de cátodo hueco y la longitud de onda fundamental de cada elemento y como fuente de atomización la llama de óxido nitroso - acetileno.

Conclusiones

Según los criterios de expertos las variables a tener en cuenta durante el establecimiento de un procedimiento para definir las áreas perspectivas en un yacimiento son: pendiente, red fluvial, rocas y fallas, potencia de los horizontes meníferos, relación potencia Esc/LB+SB y los contenidos de elementos útiles y nocivos.

Capítulo III

CAPÍTULO III: IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS PERSPECTIVAS PARA LA EXPLOTACIÓN Y EXPLOTACIÓN MINERA EN EL YACIMIENTO YAGRUMAJE SUR.

Introducción

Análisis del comportamiento de las variables

Caracterización de las áreas perspectivas en el yacimiento Yagrumaje Sur

Caracterización geoquímica de las áreas comprobadas

Conclusiones

Introducción

En este capítulo se hace una caracterización del comportamiento de las variables utilizadas en el establecimiento de las áreas perspectivas; haciendo énfasis en los horizontes meníferos de laterita y saprolita de balance por la importancia que tienen para la industria Comandante Ernesto Che Guevara.

Análisis del comportamiento de las variables

A continuación se hace un análisis del comportamiento de las variables utilizadas en el establecimiento de las áreas perspectivas.

Pendiente: en el área de estudio se encuentran tres rangos de pendientes, el primero de 0° a 5° se localiza predominantemente hacia la parte central del yacimiento; estas bajas pendientes traen consigo el predominio de la infiltración de las aguas y el bajo desarrollo de las potencias de la corteza. Los valores del segundo rango oscilan entre 10° a 15° y ocupan una menor extensión en el yacimiento, sin embargo diversos investigadores como (Rodríguez_Infante, 1998c) y (Proenza, J, 2015) lo han identificado como el óptimo para el desarrollo de los suelos lateríticos. El rango de pendientes mayores de 15° se localiza en los límites del yacimiento coincidiendo con los barrancos de los afluentes principales, lo que trae como consecuencia el incremento de la erosión y el poco desarrollo de corteza. (Ver Anexo 3 y 4).

Red fluvial: en el área la red fluvial está representada por los arroyos y tributarios de los ríos Cayo Guam, Yagrumaje y Punta Gorda estos se desarrollaron aprovechando las

líneas tectónicas que afectan al yacimiento. A su vez la red fluvial secciona la corteza de intemperismo provocando bajos espesores en su área de influencia.

Rocas y Fallas: el basamento del yacimiento Yagrumaje Sur está constituido principalmente por peridotitas, en menor cuantía gabros y de forma muy puntual peridotitas plagioclásicas como se muestra en la Figura 3. Estas rocas son cortadas por fallas en dirección noreste-suroeste que limitan las áreas perspectivas en que se divide el yacimiento.

Comportamiento de la potencia

Las mayores potencias en el horizonte de escombros se localizan en el noreste del yacimiento donde alcanzan valores de hasta 24 m, esto se debe en gran medida a la presencia de estructuras que afectan en dirección noreste y noroeste los espesores de la corteza. Hacia el sur se ubican las menores potencias con valores de 0,25 hasta 2,4 m. (ver Figura 10).

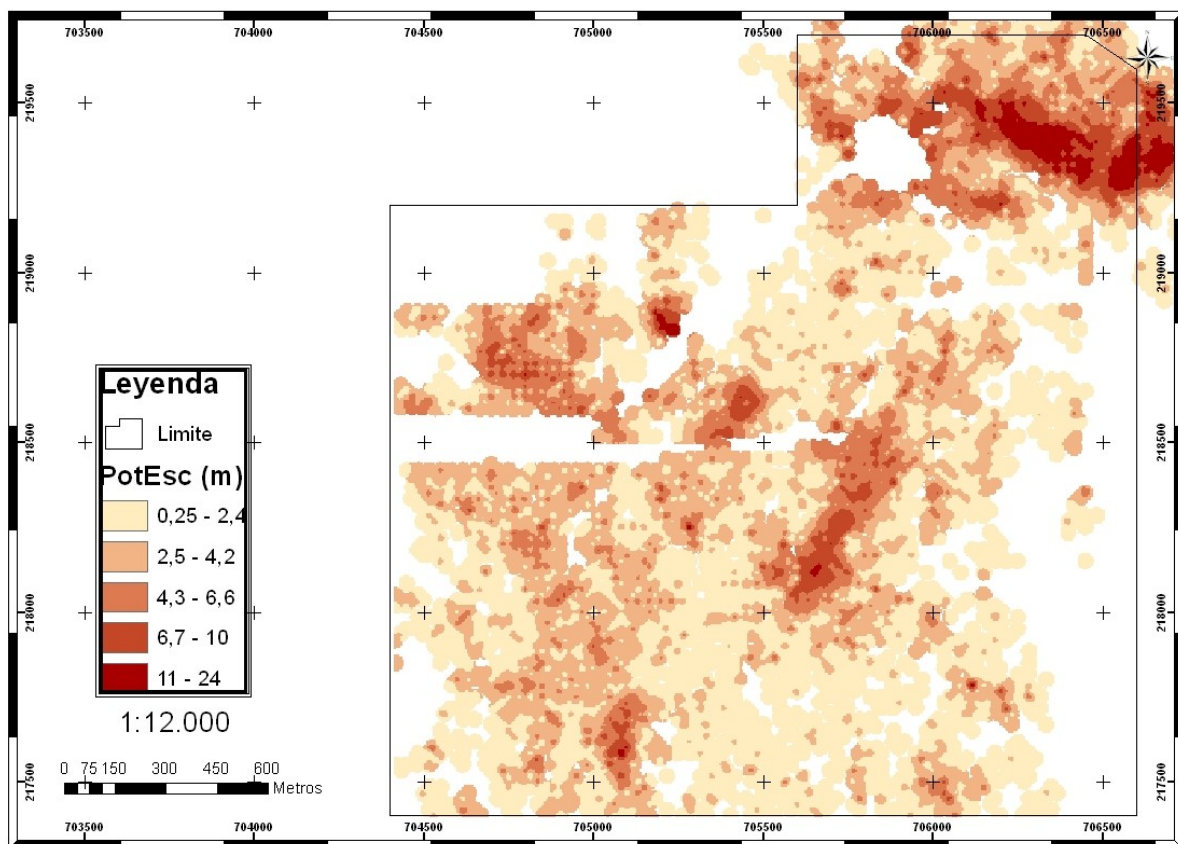


Figura 10. Mapa de potencia en el horizonte de escombros

Sin embargo en el horizonte de laterita y saprolita de balance las potencias oscilan en el rango de 0,44 a 33 m; en la parte norte, centro y suroeste del yacimiento se observan los mayores espesores, con valores de hasta 33 m. Estas altas potencias presentes en la parte central están asociadas a la presencia de fallas que afectan la corteza en dirección noreste-suroeste y a la redeposición de la misma.

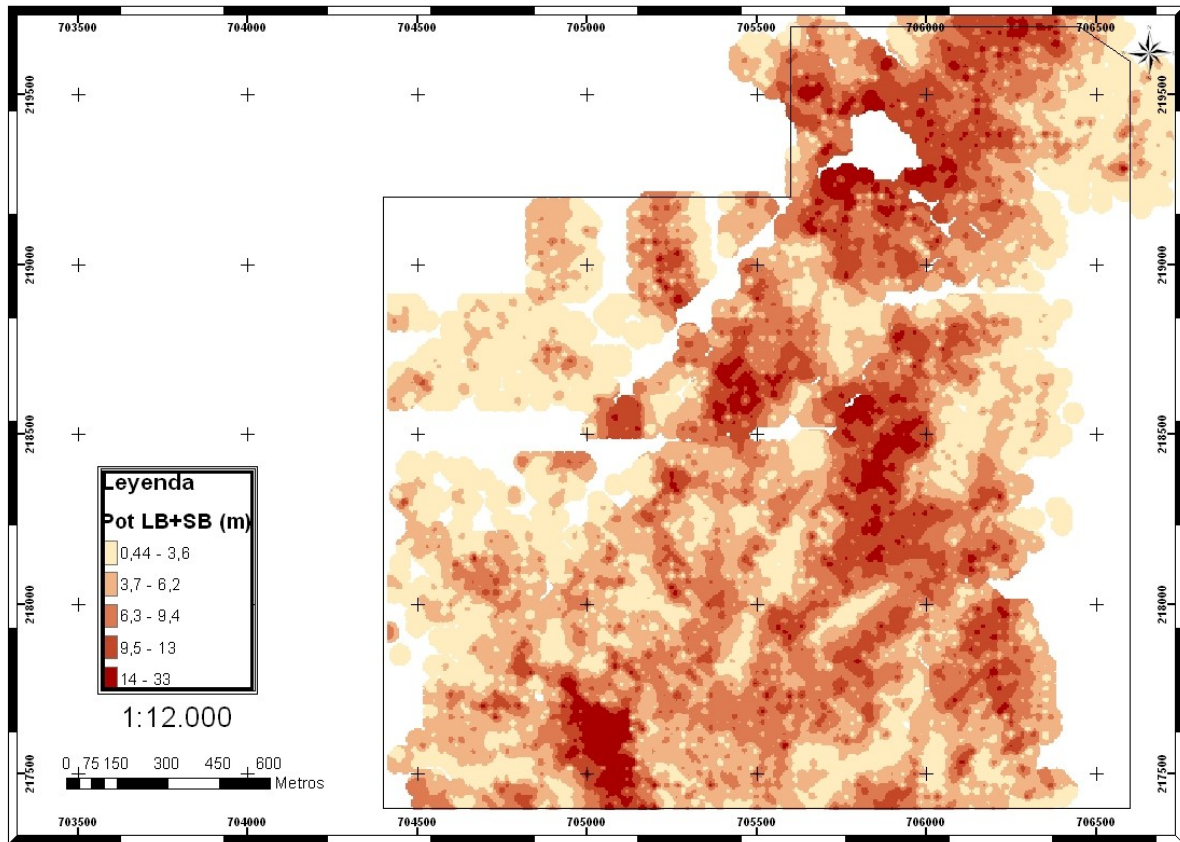


Figura 11. Mapa de potencia del horizonte de LB+SB

Las menores potencias como bien se observa en la Figura 11 se localizan en la parte oriental y occidental del yacimiento con valores que oscilan entre 0,44 m a 3,6 m. Estas bajas potencias en la corteza están asociadas a zonas de altas pendientes.

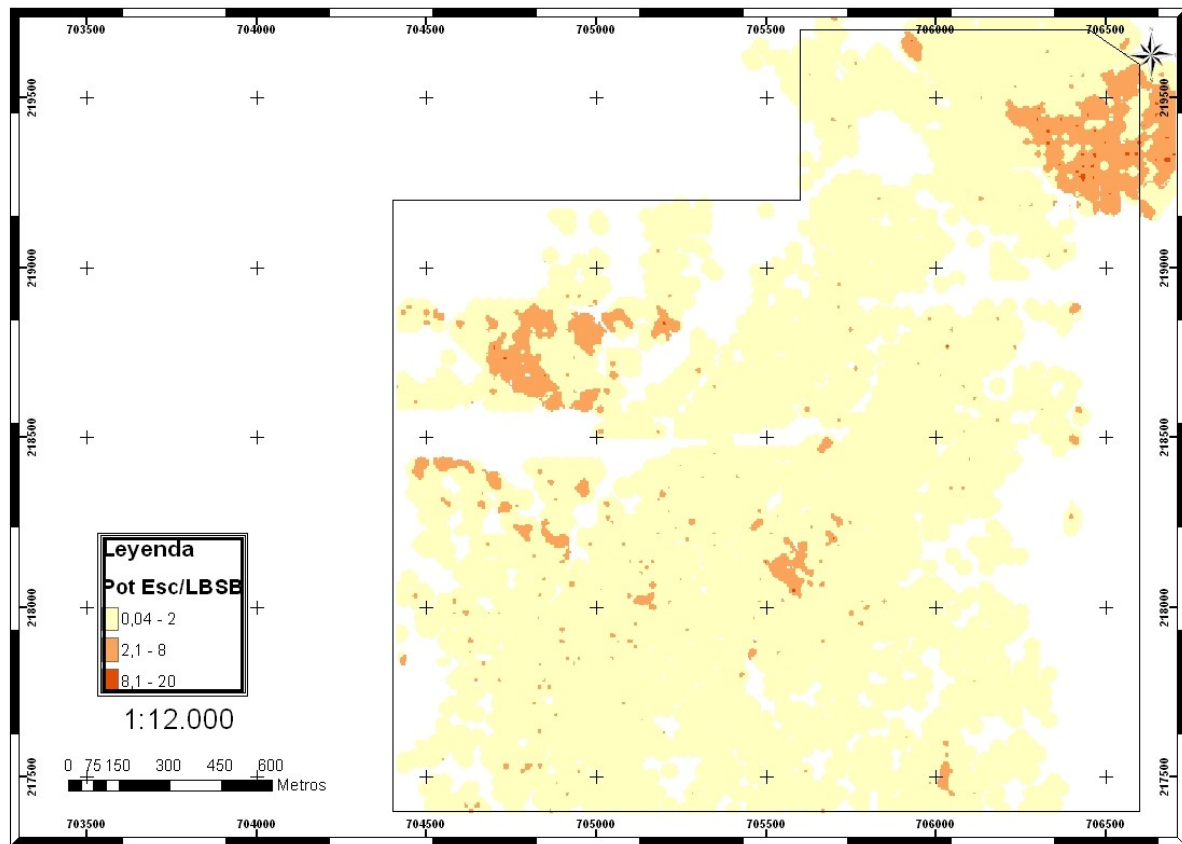


Figura 12. Mapa de relación de potencia Esc/LB+SB

En el proceso fabril para que se realice una extracción factible es necesario que se cumpla con la relación 2:1 de la potencia escombros con respecto a la potencia menífera (LB+SB). El mapa obtenido de dicha relación en el yacimiento mostró un predominio de zonas con bajas potencias de escombros con respecto al horizonte a minar; sin embargo hacia los sectores con menor posición hipsométrica como el área noreste de la concesión y oeste la relación se incrementa cuatro veces y más (ver Figura 12).

Comportamiento de los elementos útiles (Ni, Fe y Co)

Níquel

En el horizonte de escombros los contenidos de níquel van desde el orden de 0,015 % a 0,89 %. Las concentraciones predominantes varían entre 0,6 % y 0,76 %. Las mayores concentraciones se localizan hacia la parte sureste del yacimiento que coincide a la vez con las estructuras tectónicas que afectan a la zona en dirección noreste y suroeste. Hacia

el flanco norte del yacimiento los contenidos de Ni disminuyen bruscamente esto se debe a la presencia de rocas del complejo máfico al igual que en la zona oeste (ver Figura 13). En el caso del horizonte de laterita y saprolita de balance el contenido de Ni tienden a ser mayor con respecto al horizonte de escombros, este varía desde 0,9 % a 2,6 %. Hay un predominio de los valores 1,20 % a 1,40 % principalmente en la parte noreste, central y suroeste que coincide con las zonas de mayores potencias del yacimiento. De forma muy puntual se encuentran las mayores concentraciones de Ni con valores de hasta 2,6 % y se localizan principalmente hacia la zona norte del yacimiento (ver Figura 14).

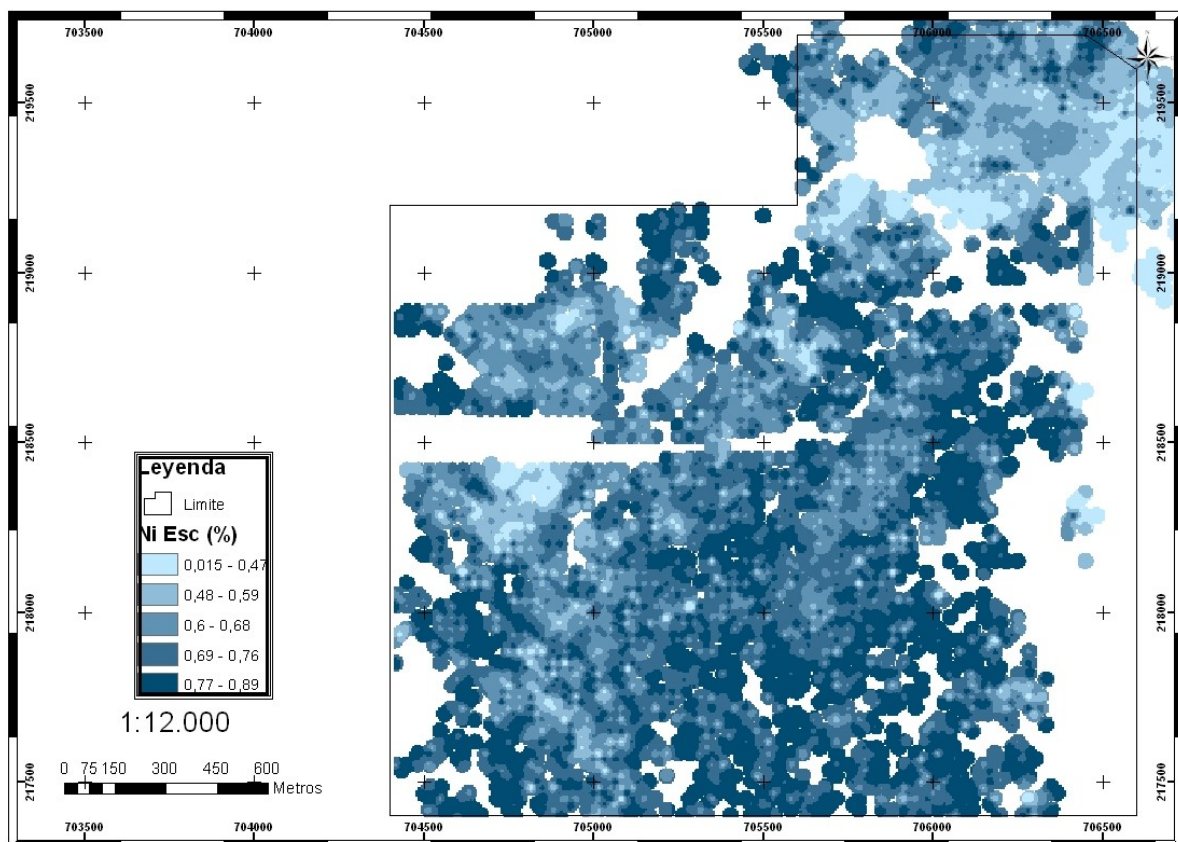


Figura 13. Mapa de isocontenido de Ni en el horizonte de escombros

Las altas concentraciones de este elemento en dicho horizonte está asociado principalmente a la presencia de goethita y en menor medida a óxidos e hidróxidos de Mn (Gleeson et al., 2003) que son las fases minerales portadoras.

Hacia la parte oeste y central se localizan las menores concentraciones de Ni las que están asociadas con los cuerpos gabroides que afloran en esa zona, lo que ocurre

también en el horizonte de escombro. Se aprecia además una alineación en la parte norte que delimita los altos contenidos de Ni de los bajos.

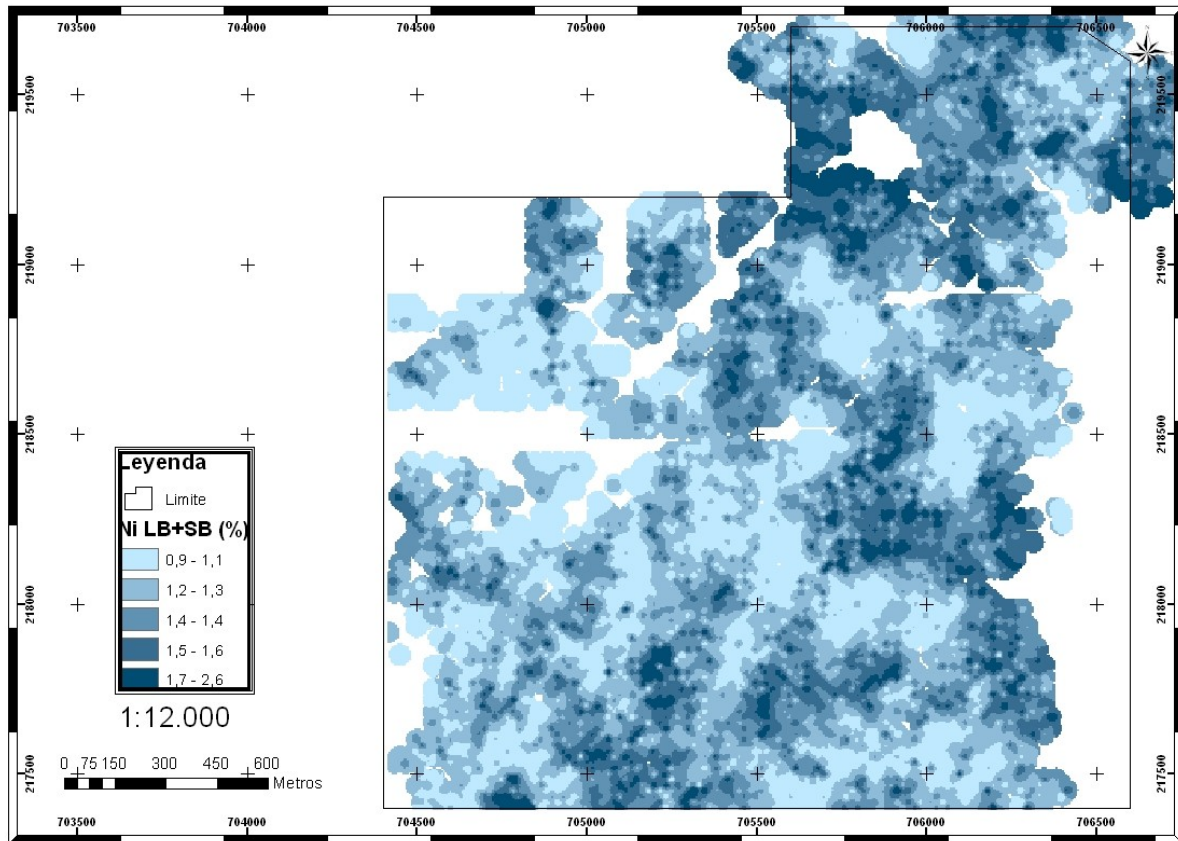


Figura 14. Mapa de isocontenido de Ni en el horizonte de LB+SB

Hierro

Los contenidos de hierro en el horizonte de escombro tienden a ser elevados, su promedio en el yacimiento oscila dentro de los límites de 43 – 47 % principalmente hacia la parte central y sureste; aunque de forma muy puntual se localizan concentraciones que llegan hasta un 53 %.

En la Figura 15 se puede observar que hacia la parte oriental y occidental existe un contacto lineal brusco entre las altas y bajas concentraciones; esto se debe principalmente al contacto litológico entre rocas mantélicas y de la corteza oceánica. Similar comportamiento se puede observar en el mapa de contenido de Ni donde las concentraciones del elemento disminuyen de igual forma.

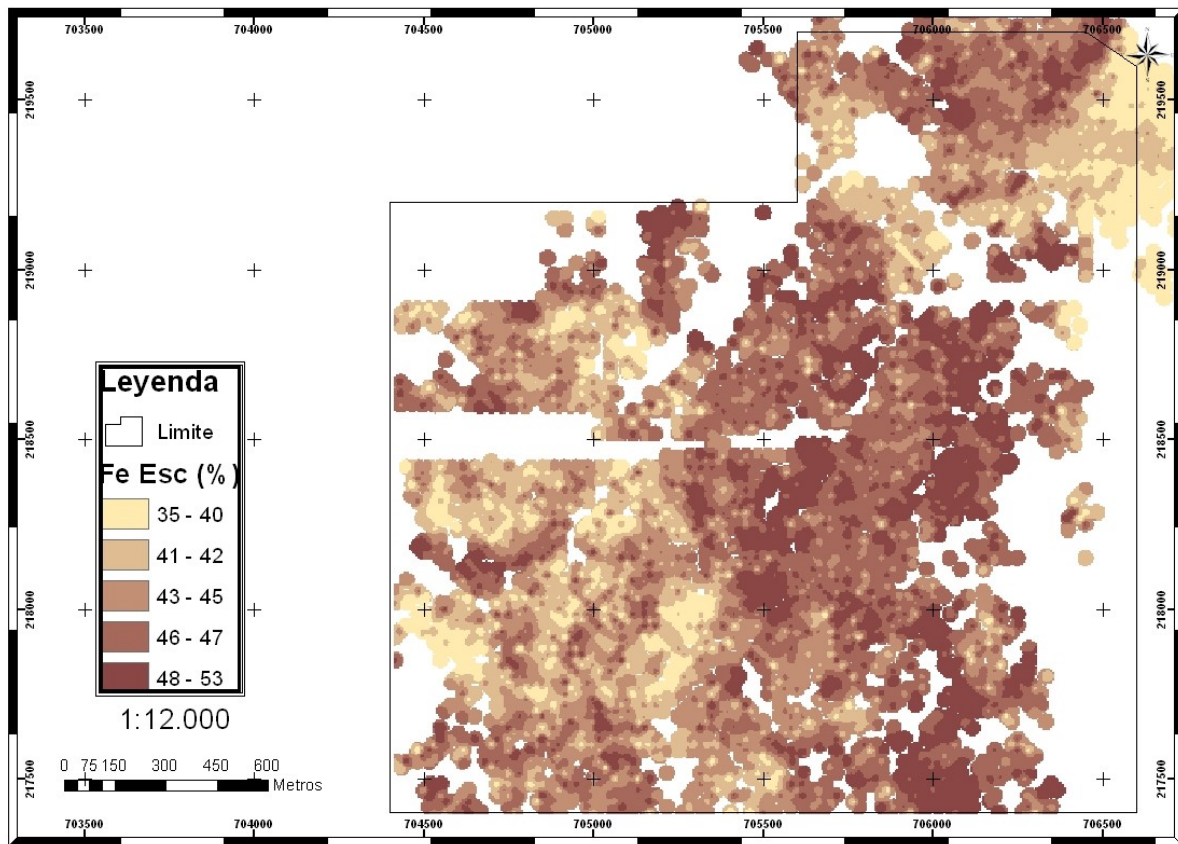


Figura 15. Mapa de isocontenido de Fe en el horizonte de escombros

En el caso del horizonte de laterita y saprolita de balance los contenidos de hierro tienden a ser altos, estos varían entre 12 - 56 %. Los valores predominantes son de 37 % a 45 % y están diseminados en la porción central, sureste y noreste del yacimiento; aunque en algunas zonas llega a alcanzar valores de hasta 56 % (ver Figura 16).

Las altas concentraciones de hierro en este horizonte se deben en gran medida a la presencia de minerales de óxido e hidróxido de hierro.

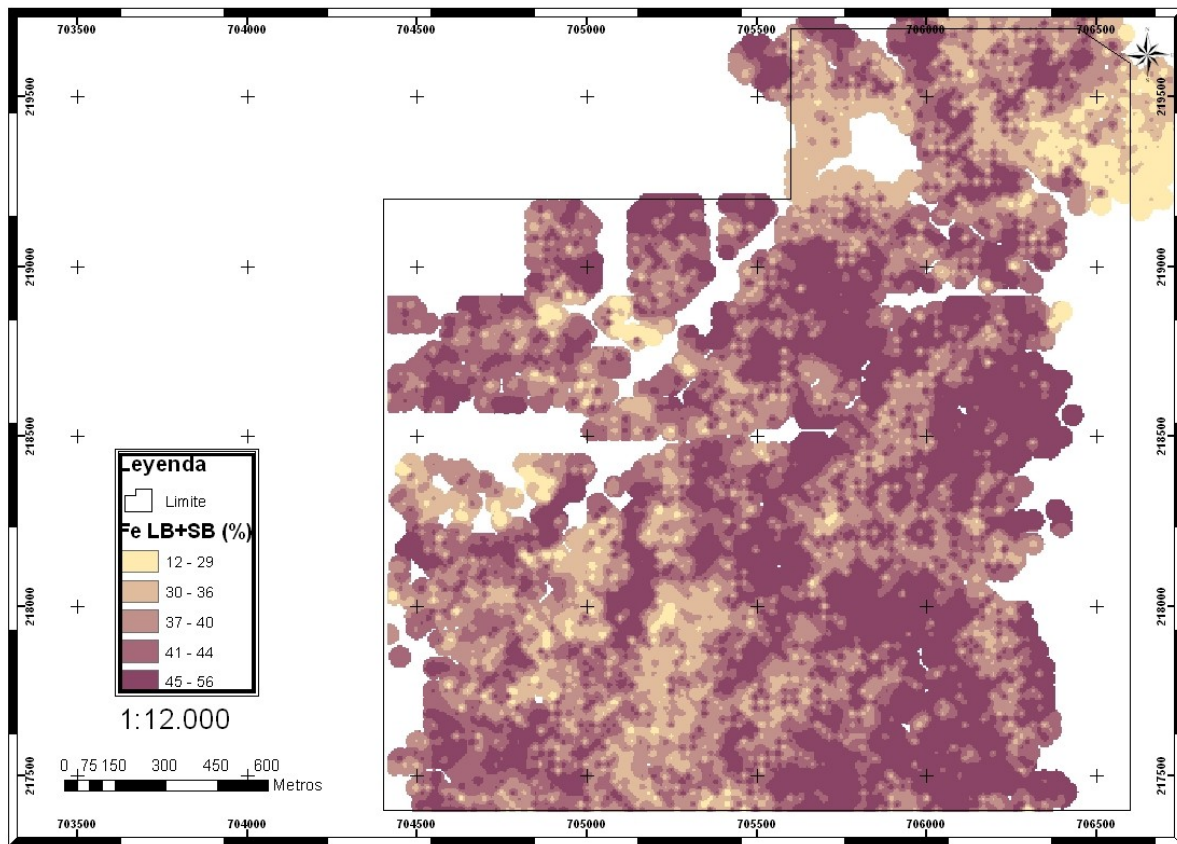


Figura 16. Mapa de isocontenido de Fe en el horizonte de LB+SB

Existe una correspondencia directa entre las menores concentraciones de Fe de la corteza por gabroides con respecto a las desarrolladas sobre rocas peridotíticas, estas se localizan hacia el sector noreste del yacimiento con valores que fluctúan entre 12 - 29 %.

Cobalto

En el horizonte de escombro existe un predominio de los contenidos de cobaltos bajos con valores de 0,008-0,073 %, el cual aparece en toda la porción central y suroeste del yacimiento. Sin embargo las mayores concentraciones se van a encontrar bordeando toda la periferia de las zonas de concentraciones bajas alcanzando valores de hasta 0,51 % (ver Figura 17).

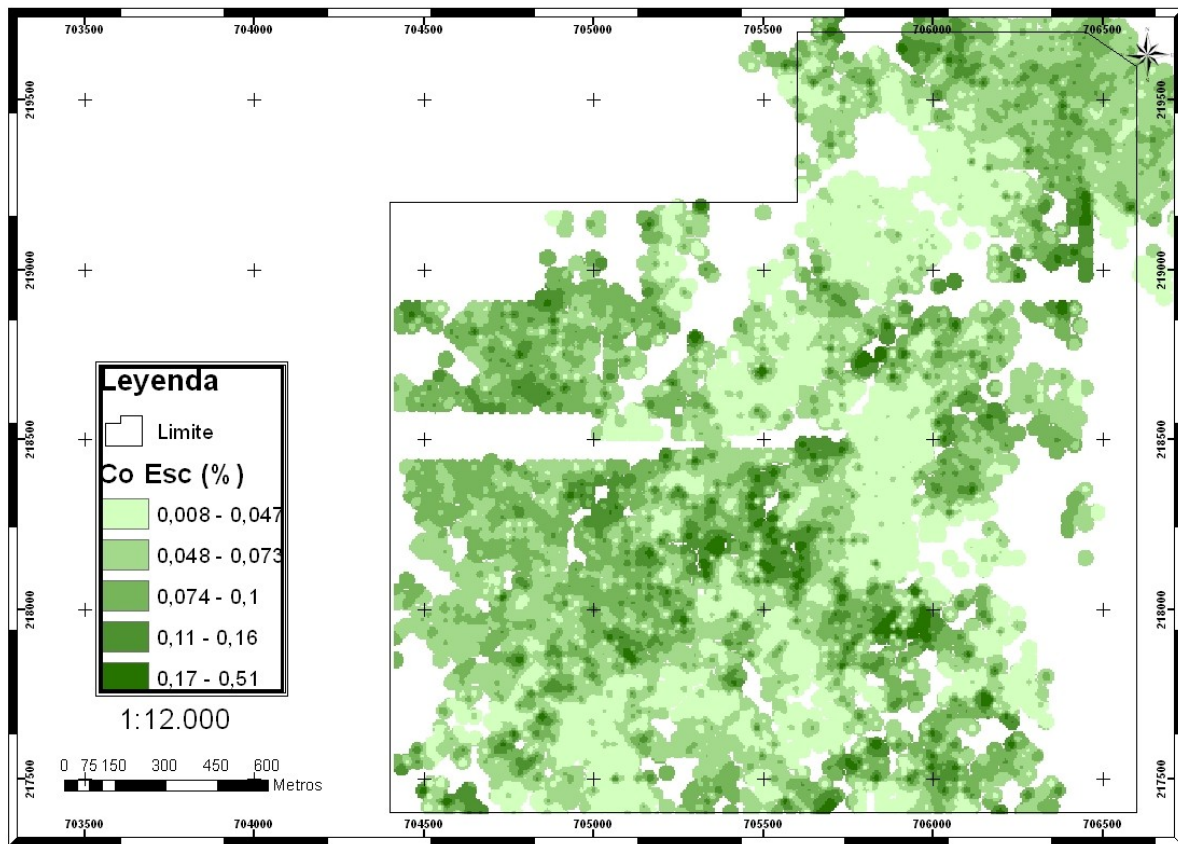


Figura 17. Mapa de isocontenido de Co en el horizonte de escombro

Sin embargo en el horizonte de laterita y saprolita de balance los contenidos de Co predominantes van desde el orden de 0,11 – 0,18 % (ver Figura 18).

Las mayores concentraciones de Co se encuentran diseminadas en la parte norte del yacimiento con valores de hasta 0,79 %; dichas concentraciones se encuentran alineadas producto al contacto entre las litologías mantélicas y oceánicas que también se observan hacia la porción central y sureste.

En la porción noroeste y suroeste se pueden observar los contenidos de cobalto más bajos que oscilan entre 0,014 % y 0,13 % los que están asociados a la presencia de rocas gabroides.

Es de destacar la altas concentraciones de este elemento en estos horizontes lo que confirma lo antes expuesto por los investigadores (Llorca & Monchoux, 1991); (Llorca, 1993); (Labrador, M et al., 2007) y (Roque_Rosell et al., 2010).

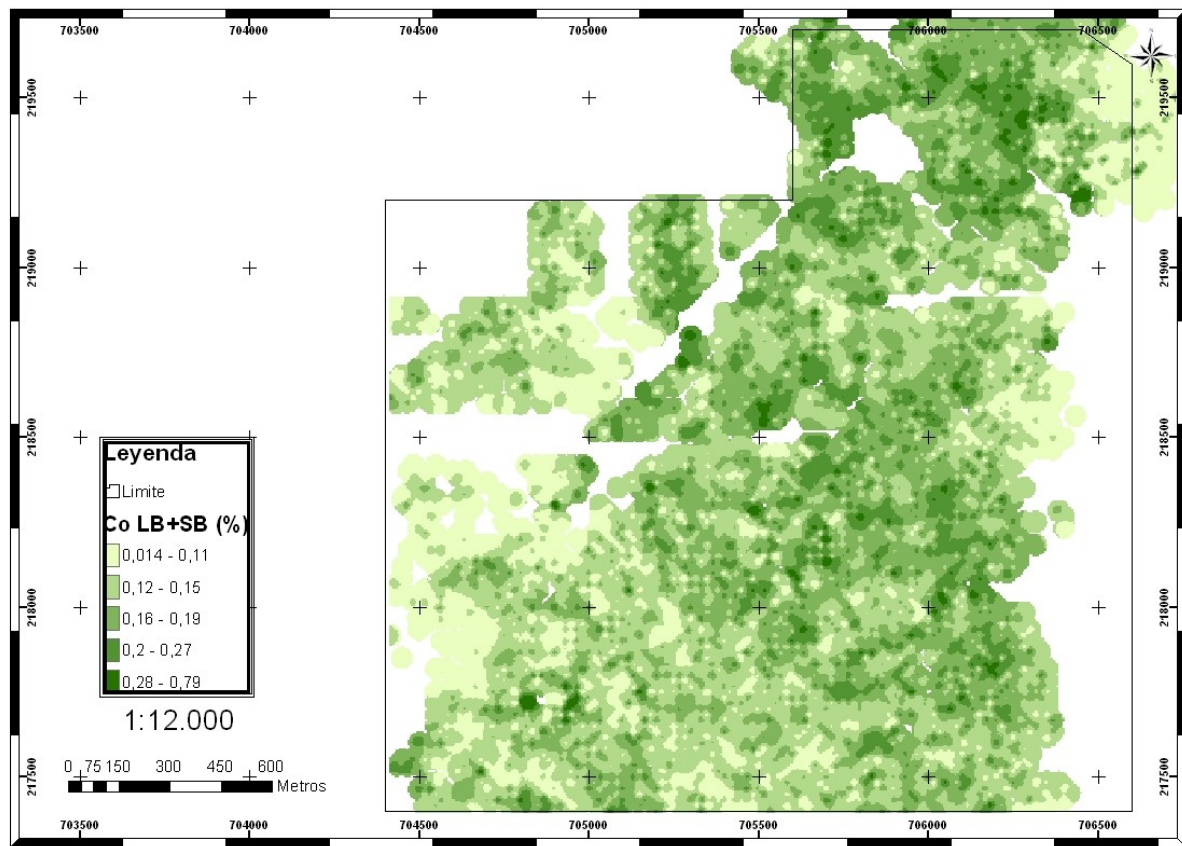


Figura 18. Mapa de isocontenido de Co en el horizonte de LB+SB

Comportamiento de los elementos nocivos (Si, Mg y Al)

Sílice

La sílice en el horizonte de escombros va desde el orden de 1,1 % a 27 %, predominando los contenidos menores de 3,7 % principalmente hacia la parte central, sureste y noreste del yacimiento. Los mayores valores tienden a localizarse hacia la porción oriental y occidental alcanzando en zonas muy puntuales valores de hasta un 27 %; siendo estos contenidos altamente nocivos para el proceso de beneficio menífero empleado por la empresa Comandante. Ernesto Che Guevara (ver Figura 19).

En el caso del horizonte de laterita y saprolita de balance la sílice presenta un comportamiento similar al del escombros pues en la parte central, noreste y sureste se van a localizar las menores concentraciones y hacia el flanco oriental y occidental se pueden % hasta 41 %. Los valores predominantes se mueven en el rango de 1,7 % a 11 %.

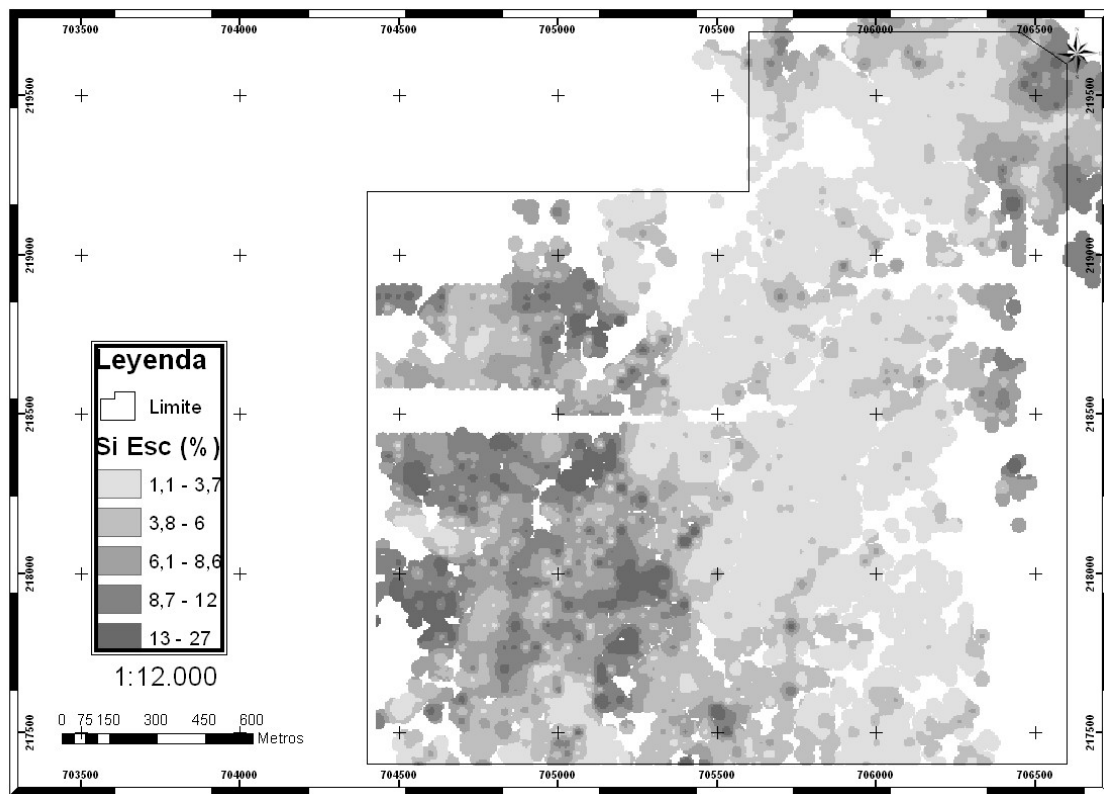


Figura 19. Mapa de isocontenido de Si en el horizonte de escombro

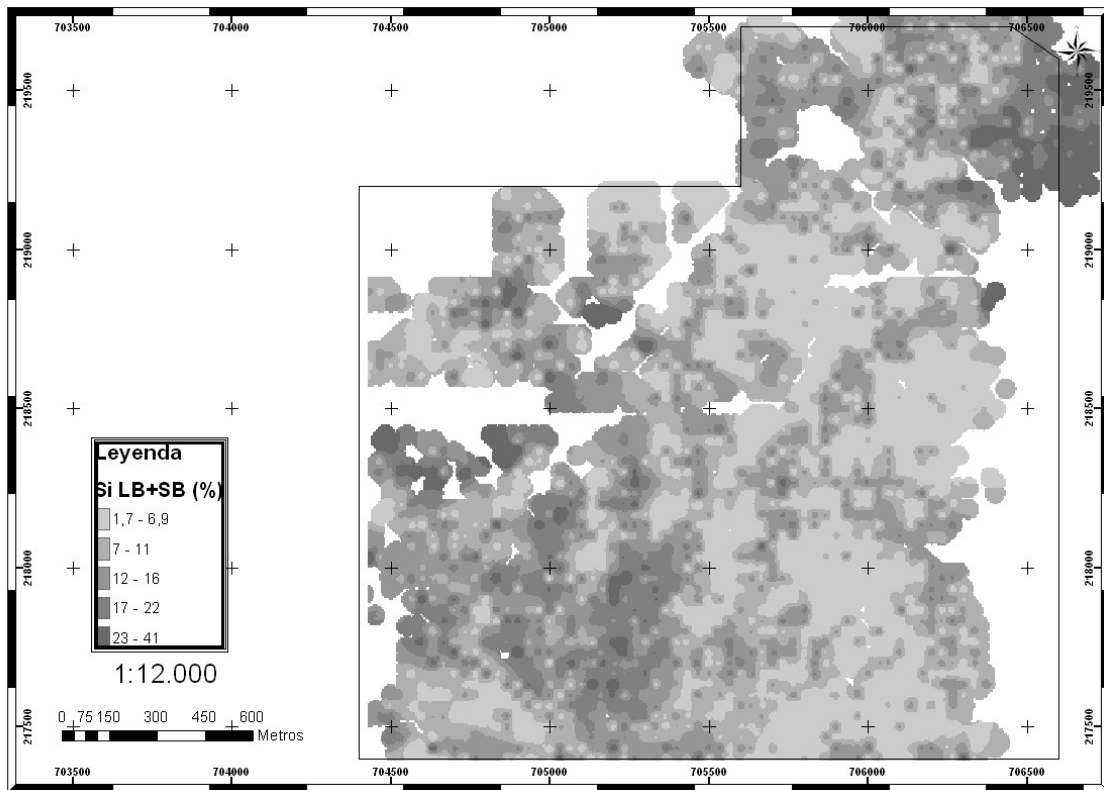


Figura 20. Mapa de isocontenido de Si en el horizonte de LB+SB

Las menores concentraciones se localizan hacia la zona central y sureste del yacimiento (1,7 – 4,4 %) siendo esto los de mayores perspectivas para la explotación minera. Sin embargo los altos contenidos de sílice se manifiestan en la parte noreste y suroeste llegando a alcanzar valores de hasta 41 %; estas altas concentraciones están asociadas a las rocas gabroides que en esta zona se desarrollan.

Magnesio

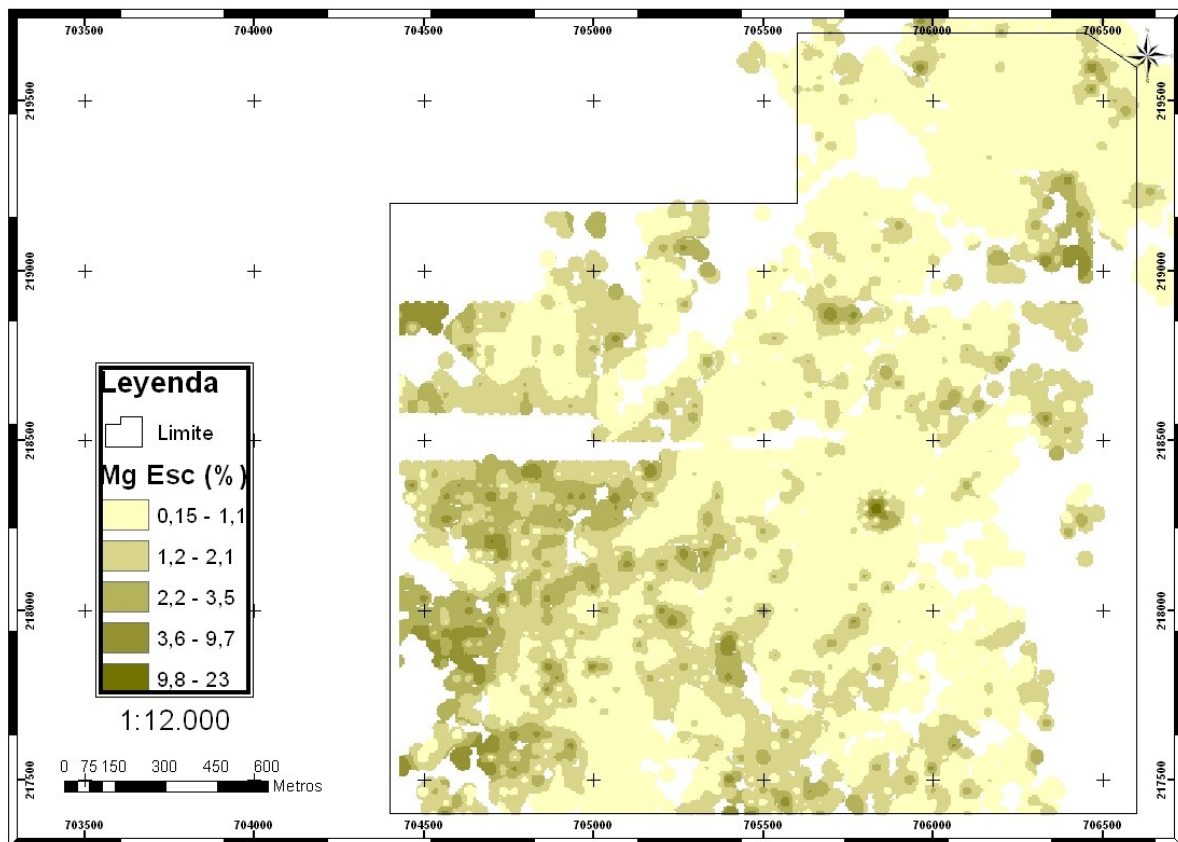


Figura 21. Mapa de isocontenido de Mg en el horizonte de escombro

En el escombro predominan los bajos valores de magnesio entre 0,15-1,1 %, sobre todo en la porción central y noreste. Las mayores concentraciones se pueden localizar hacia la parte oeste y suroeste donde alcanzan valores de hasta un 9,8 %; sin embargo de forma muy local se encuentran valores de hasta 23 % (ver Figura 21).

Para el horizonte de laterita y saprolita el comportamiento del magnesio se acentúa con altos valores hacia la porción norte y suroeste de la concesión. La presencia de minerales silicatados en el horizonte de SB justifica los altos contenidos de Mg que se muestran en la Figura 22. Los máximos valores alcanzados por este elemento oscilan entre 13 y 27 %, aunque la mayor extensión del yacimiento presenta contenidos de 0,48 % a 5,5 %.

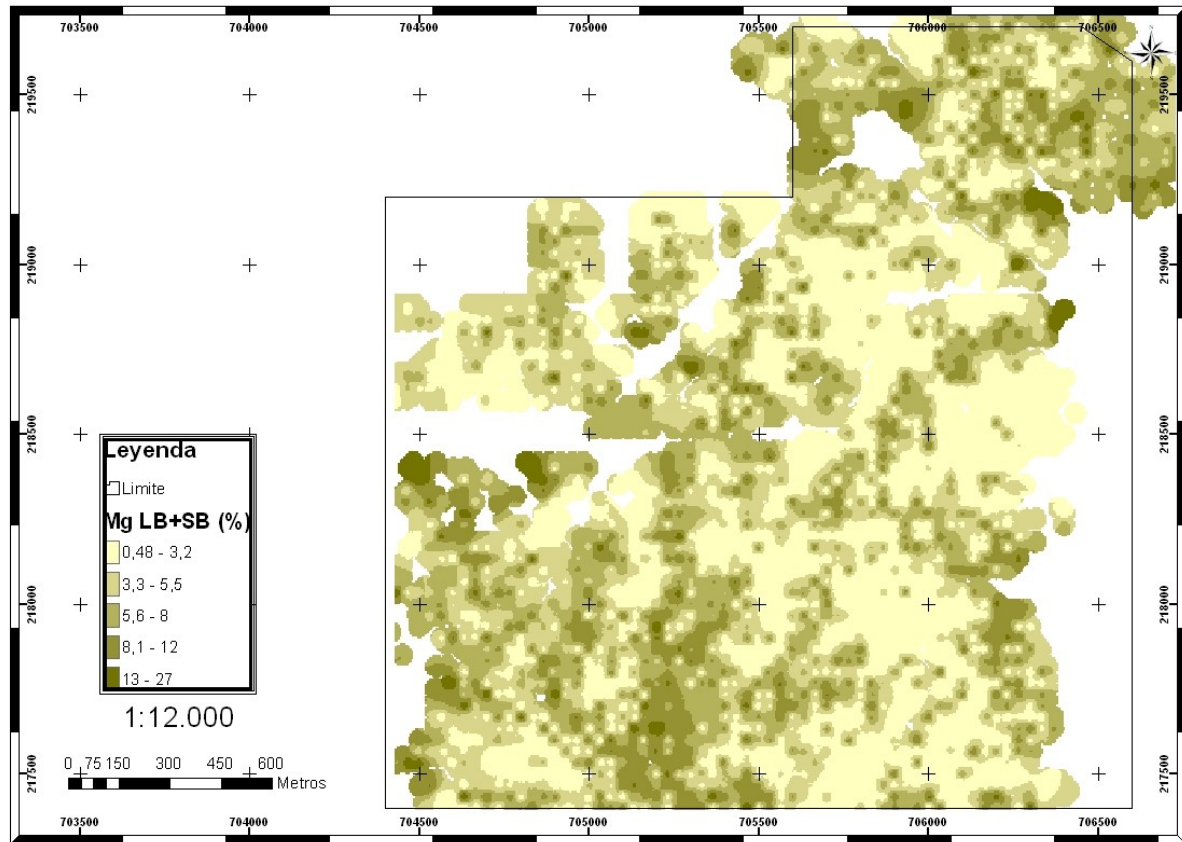


Figura 22. Mapa de isocontenido de Mg en el horizonte de LB+SB

Las mayores concentraciones de magnesio coinciden a su vez con los altos valores de níquel para el horizonte, lo que denota la afinidad geoquímica entre ambos elementos existe.

Aluminio

Los contenidos de aluminio en el horizonte de escombros presentan valores de 5,7 % a 28 %, cuyas mayores anomalías se localizan hacia el noreste con valores de hasta un 28 %, aunque la mayor extensión del yacimiento presenta contenidos de 5,7 % a 12,5 %.

y en correspondencia con las áreas de rocas gabroides existentes en el yacimiento (ver Figura 23).

Los menores valores de concentración de aluminio se ubican predominantemente hacia la región central del yacimiento. Sin embargo el comportamiento geoquímico del aluminio en los horizontes de LB y SB a pesar de presentar concentraciones inferiores a las del escombro tiene una distribución espacial similar; con los valores más anómalos ubicados hacia el sector norte del yacimiento cuyos contenidos alcanzan hasta un 23 % (ver Figura 24).

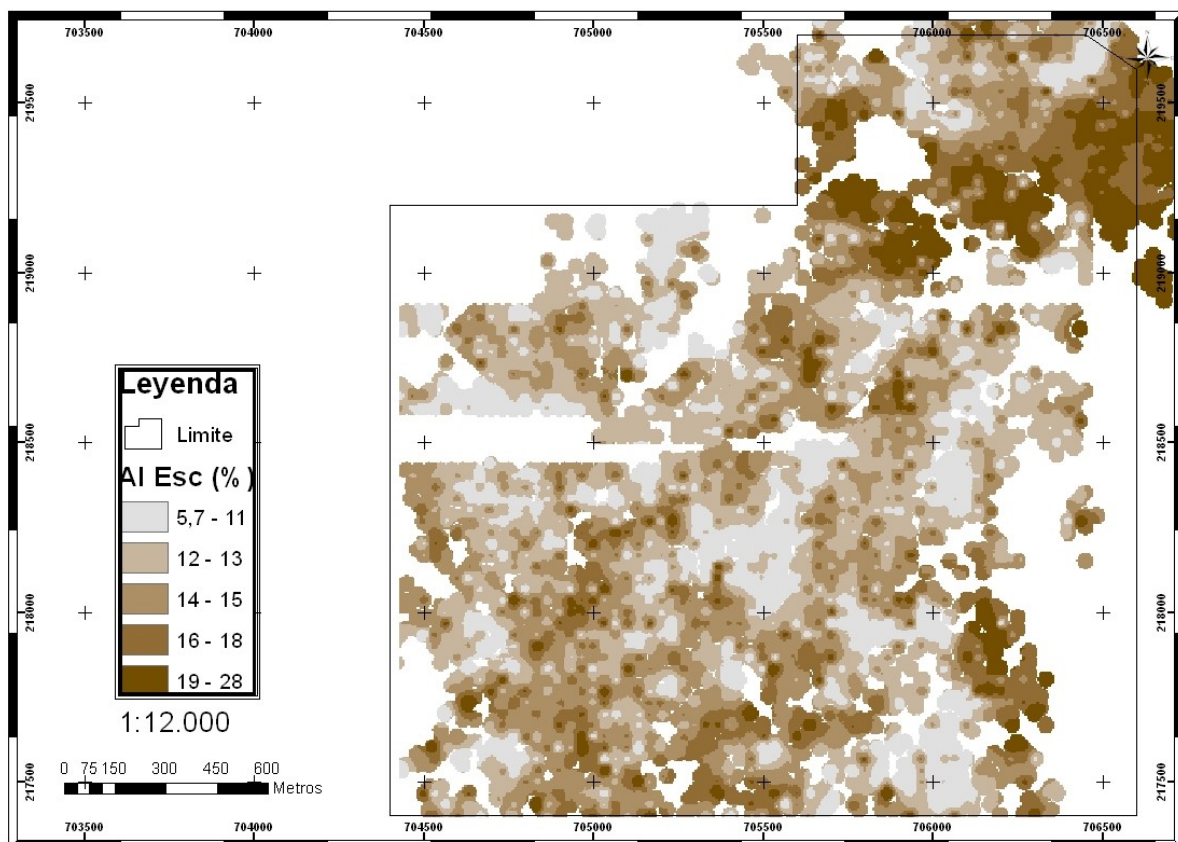


Figura 23. Mapa de isocontenido de Al en el horizonte de escombro

Los valores anómalos en los tres horizontes meníferos, escombro, laterita y saprolita de balance denotan el origen residual para la corteza que se desarrolla en el sector norte del yacimiento originada a expensa de la meteorización de las rocas gabroideas existentes.

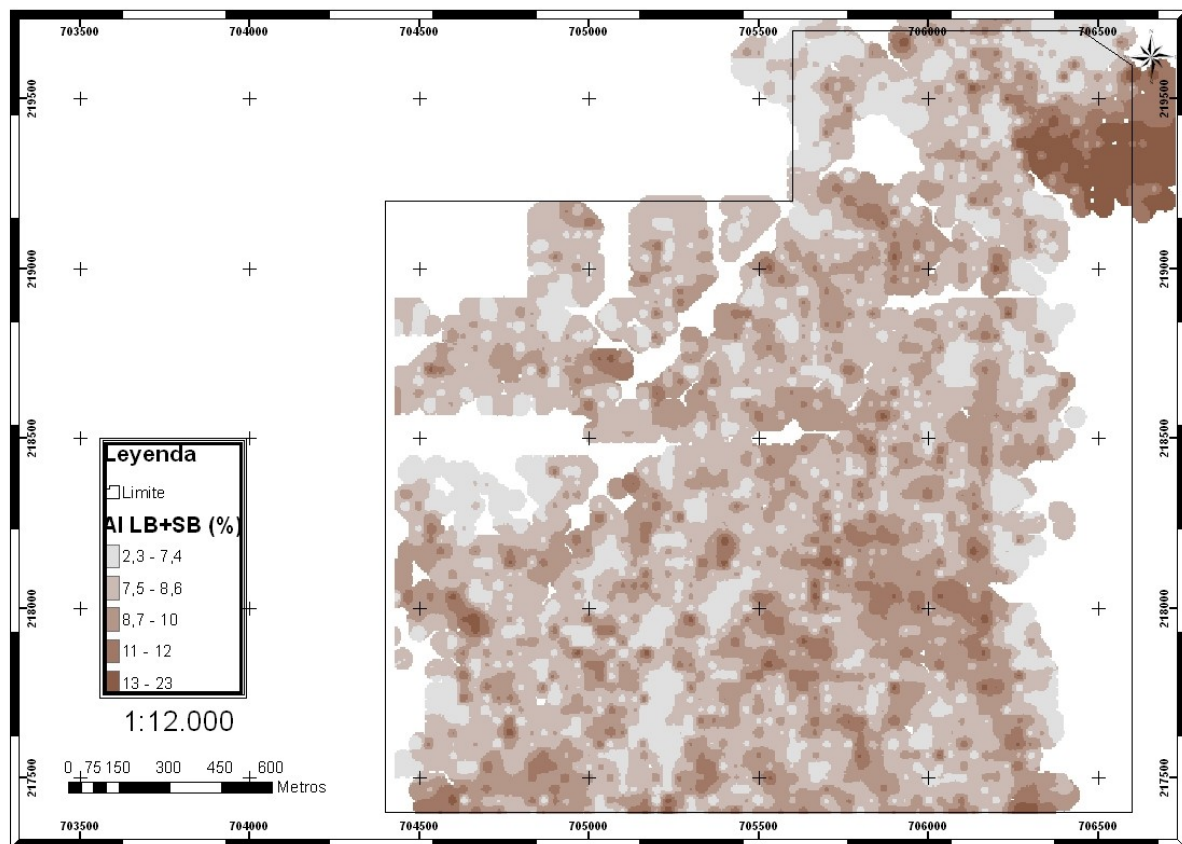


Figura 24. Mapa de isocontenido de Al en el horizonte de LB+SB

Análisis correlativo entre los componentes útiles y nocivos de los horizontes meníferos

Como se puede observar en la Tabla 8 el níquel presenta una alta correlación con el hierro y el cobalto en el horizonte de escombros no así con los componentes nocivos; esto se debe fundamentalmente a la presencia de minerales de óxido e hidróxido de hierro que son los principales portadores de Ni en este horizonte. Sin embargo los componentes nocivos muestran una gran correspondencia entre ellos.

Tabla 8. Matriz de correlación entre los componentes útiles y nocivos en el horizonte de escombros

	Fe	Ni	Co	Al	Mg	Si
Fe	1					
Ni	0,430	1				
Co	0,037	0,292	1			
Al	-0,177	-0,035	0,004	1		
Mg	-0,164	0,145	0,151	0,523	1	
Si	-0,322	0,041	0,130	0,645	0,711	1

Sin embargo en el horizonte de LB+SB los contenidos de Ni presentan una correlación lineal fuerte con el Co, el Mg y la Si; no así con los demás contenidos analizados. Esta fuerte correlación puede ser atribuida a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro que son los principales componentes en el horizonte de laterita y de silicatos hacia el horizonte de SB. También se pueden observar correlaciones altas entre la Si el Mg con el Al, lo que denota una posible sustitución de uno por el otro. Lo mismo puede ocurrir Si por Mg, que Si por Al. En el caso del Fe en este horizonte presenta una correlación fuerte negativa con todos los elementos como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Matriz de correlación entre los componentes útiles y nocivos en el horizonte de LB+SB

	Fe	Ni	Co	Al	Mg	Si
Fe	1,00					
Ni	-0,49	1,00				
Co	-0,05	0,22	1,00			
Al	0,08	-0,05	0,05	1,00		
Mg	-0,42	0,27	0,12	0,51	1,00	
Si	-0,41	0,22	0,05	0,63	0,92	1,00

Caracterización de las áreas perspectivas del yacimiento Yagrumaje Sur

En la exploración geológica de los yacimientos minerales sólidos la identificación de las áreas con mayores potencialidades meníferas constituye un aspecto clave para los prospectores. En la selección de dichas áreas en los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto se tiene en cuenta las variables anteriormente analizadas y los criterios empleados para la generación de las áreas perspectivas.

La aplicación del procedimiento establecido en el capítulo II de la presente investigación permitió en el yacimiento Yagrumaje Sur establecer tres áreas; poco, medianamente y muy perspectivas (ver Figura 25) las que son caracterizadas a continuación.

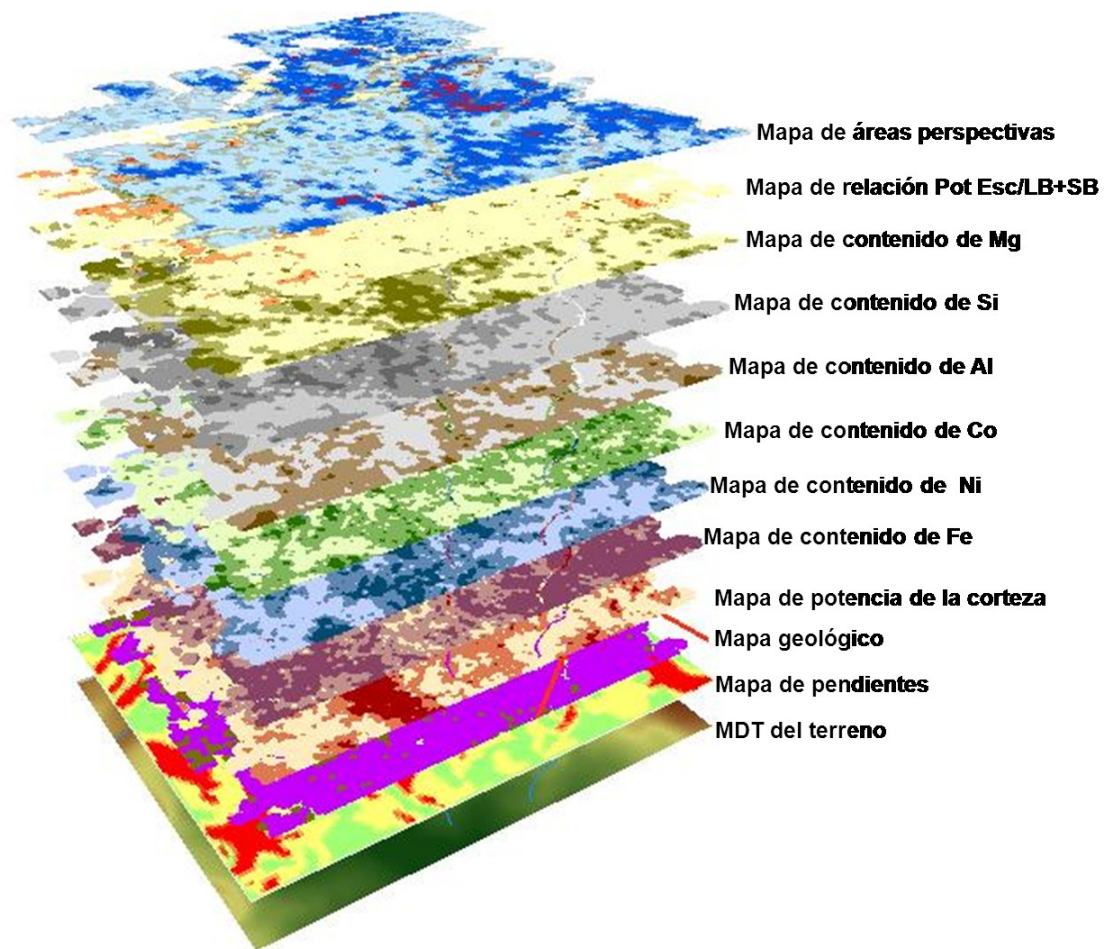


Figura 25. Vista en 3D de los mapas temáticos empleados en el establecimiento de las áreas perspectivas para el yacimiento Yagrumaje Sur.

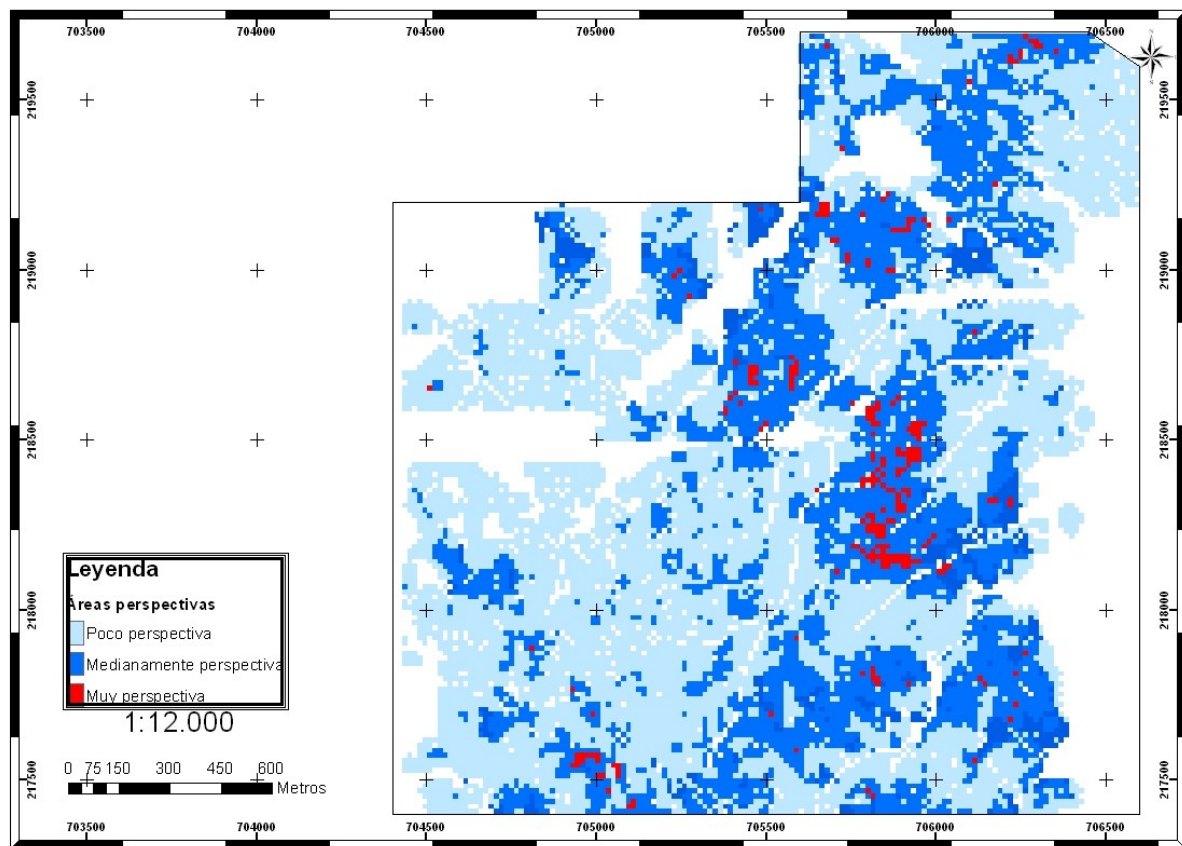


Figura 26. Mapa de áreas perspectivas para el yacimiento Yagrumaje Sur

Áreas poco perspectivas

El área definida como poco perspectiva para la concesión ocupa el 63,9 % del total de las área establecidas. Sus mayores extensiones se localizan hacia la parte suroeste y noreste del yacimiento (ver Figura 26). Desde el punto de vista hipsométrico una parte de ellas está ubicada en la porción más baja del yacimiento. Estas zonas se caracterizan por presentar las mayores pendientes y por ende las menores potencias de los horizontes meníferos. Las rocas predominantes son de tipo peridotítica aunque en gran medida gabroides.

Las concentraciones de los elementos útiles como el Ni a pesar de estar en el rango de 0,9 % a 1 % no pueden ser minados, debido a las concentraciones elevadas de Si y Mg que llegan a alcanzar valores de 41,3 % y 26,82 % respectivamente. Los contenidos de Co son inferiores a 0,013 % y la relación potencia de Esc/ LB+SB son las mayores para el

yacimiento lo que hace a esta área poco atractiva para la exploración y explotación minera (Tabla.8).

Áreas medianamente perspectivas

Esta área ocupa una extensión de 37,1 % su distribución es bastante centralizada sobre todo en la porción central, sureste y norte del yacimiento (ver Figura 26). Se encuentra enmarcada en las pendientes cuyos valores oscilan entre 0 a 5°.

Desde el punto de vista geólogo-tectónico estas áreas están limitadas por los sistemas de fallas existentes que presentan dirección noreste y noroeste, con predominio de rocas peridotíticas y en menor medida peridotitas plagioclásicas.

Las potencias de los horizontes meníferos son superiores a los 3 m y la relación Esc/LB+SB oscila entre 2 a 8 m. No obstante los contenidos de los elementos útiles y nocivos se encuentran dentro de los rangos permisibles para ser beneficiados por la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Áreas muy perspectivas

Constituyen el área de menor extensión del yacimiento, su prolongación representa solo el 1,6 % de las áreas establecidas. Se ubica dentro del yacimiento en los sectores centrales y de forma muy puntual hacia el sureste y noroeste.

Desde el punto de vista hipsométrico presentan diferentes alturas sin embargo las pendientes en las que se desarrollan estas áreas oscila entre 5 a 15°, variable reconocida por diversos autores (Rodríguez, 1998 y Proenza, 2015) como por ser controladoras del desarrollo de cortezas de intemperismo.

Las potencias de los horizontes meníferos en esta área son las mejores para el yacimiento con valores de 5 a 32 m y la relación Esc/LB+SB es de 0 a 2. Los contenidos de los elementos útiles para dicha área son los mejores, los valores de Fe, Ni y Co se encuentra en el rango de 35 – 56, 2 %, 1,2 – 2,5 % y 0,1 – 0,79 % respectivamente y los nocivos son inferiores a 2,3 – 10 %, 1,73 – 12 % y 0,47 – 5 % para la Al, Si y el Mg. A pesar de ser el área más perspectiva del yacimiento su pequeña extensión constituye una limitante.

Caracterización geoquímica de las áreas de comprobación

Los sectores muestreados se caracterizan químicamente por la presencia de Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 y Cr_2O_3 como elementos químicos mayoritarios; mientras que como componentes minoritarios, se encuentran el NiO , CoO , MgO y MnO . Este tipo de material es esencialmente ferroso con contenidos de Fe que llegan hasta 50,07 % y de Al hasta un 9,84 % (ver Tabla 10).

Las mayores concentraciones de CoO se localizan en la muestra YS1 esto tiene correspondencia con la información arrojada en los mapas de isocontenido de los horizontes de LB+SB donde las concentraciones de este elemento llegan hasta un 0,51 %; en este sector también fue establecido los valores más bajos de Mn.

La muestra YS2 tomada al noreste del yacimiento presenta altas concentraciones de Ni, Fe y Co esto confirma los resultados obtenidos en esa área a partir del mapa de áreas perspectivas; lo mismo ocurre con la muestra YS6.

Tabla 10: Composición química de los sectores muestreados

# Muestra	NiO	CoO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	MgO	MnO
YS1	1,070	0,220	46,34	6,66	5,83	1,68	3,75	1,00
YS2	1,255	0,186	49,71	2,54	7,09	1,64	1,92	1,12
YS3	1,074	0,145	45,52	1,70	9,84	2,13	0,99	1,26
YS4	1,515	0,127	42,45	13,62	2,31	4,88	0,97	1,52
YS5	1,583	0,093	50,07	4,30	0,91	4,86	0,77	2,62
YS6	1,053	0,127	47,89	5,44	2,12	5,05	1,01	1,61
YS7	0,755	0,044	46,88	2,59	1,10	10,30	1,68	2,11
Promedio	1,187	0,134	46,98	5,27	4,17	4,36	1,59	1,61

Son significativos los valores de Al_2O_3 que posee la muestra YS3 cuya concentración alcanza valores de hasta 9,84 %, dicho contenido evidencia la presencia de fases minerales portadoras de este elemento en esa zona.

La muestra YS4 a pesar de tener concentraciones de SiO_2 altas con valores de 13,62 % presenta contenidos de NiO elevados al igual que de CoO y Fe. En el caso de la muestra YS5 localizada hacia la parte central del yacimiento a pesar de contener las mayores

concentraciones de NiO, Fe₂O₃ e incluso de Mn se encuentra en el área poco perspectiva, esto se debe a que en esta zona las potencias del horizonte de LB+SB es dos veces menor que la de escombros lo que la hace poco perspectiva para la extracción minera.

Las menores concentraciones de NiO, Fe₂O₃ y CoO se encuentran en los resultados obtenidos de la muestra YS7 esta información corrobora lo estimado en el mapa de áreas perspectivas.

Conclusiones

Los contenidos de Co presentan una correlación lineal fuerte con el Ni en los horizontes tanto de escombros como de laterita y saprolita de balance, lo que denota una posible sustitución entre ambos elementos en la corteza.

En cuanto a la relación Esc/LB+SB existe un predominio en el yacimiento de zonas con bajas potencias de escombros lo que denota condiciones propicias para la minería.

Con la aplicación del procedimiento se establecieron tres áreas perspectivas en el yacimiento nombradas, poco, medianamente y muy perspectivas. La poco perspectiva abarca un área de 63,9 % de la superficie del yacimiento mientras que la medianamente perspectiva cubre un 37.1 % y el 1.6 % del resto pertenecen a las muy perspectivas.

El muestreo comprobatorio realizado confirmó la veracidad del procedimiento para la selección de las áreas perspectivas en el yacimiento Yagrumaje Sur.

CONCLUSIONES

Se determinaron 11 variables a emplear en el procedimiento según la encuesta realizada a los expertos de la Unión del Níquel y el ISMMM declarándose con mayor peso las variables de pendiente, red fluvial, rocas y fallas, potencia de los horizontes meníferos, relación entre la potencia del Esc/LB+SB y los contenidos de los elementos útiles y nocivos.

Al analizar el comportamiento de las variables se determinó que en los límites del yacimiento se localizan las mayores pendientes las que coinciden con los barrancos de los afluentes principales y las estructuras tectónicas que limitan las rocas que componen el basamento. Mientras que los mayores valores de relación Pot Esc/LB+SB concuerdan con las áreas de concentraciones más elevadas de elementos nocivos y más bajas de elementos útiles.

A partir del procedimiento propuesto en la presente investigación en el yacimiento Yagrumaje Sur quedaron establecidas tres áreas perspectivas nombradas: poco, medianamente y muy perspectivas. El área poco perspectiva ocupa un 63,9 % del total de la superficie del yacimiento mientras que el área medianamente perspectiva abarca una extensión de 37,1 % y el área muy perspectiva que a pesar de presentar las mejores características abarca solo el 1,6 %.

Quedó demostrado con el muestreo comprobatorio la precisión del procedimiento desarrollado para definir las áreas perspectivas establecidas en el yacimiento Yagrumaje Sur.

La aplicación del procedimiento propuesto agiliza la toma de decisiones durante la exploración y explotación de los yacimientos lateríticos, además del manejo de la información en función del comportamiento o relación de las variables establecidas.

RECOMENDACIONES

Aplicar el procedimiento propuesto en la presente investigación para las exploraciones realizadas en la red de 100 x 100 m y comparar los resultados obtenidos con una red de exploración geológica más detallada.

Emplear el procedimiento propuesto para la selección de las áreas a estimar dentro de un depósito laterítico.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta_Aguila, Fausto Lázaro; Campos_Dueña, Mario; Gutierrez_Pérez, Betty, Olivera_Acosta, Jorge. (2013). Estudio de riesgo geológico sobre plataforma SIG.m Análisis de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la provincia Artemisa, Cuba. 1-10.
- Agyei, George; Rojas_Purón, Arturo Luis, Hernández_Flores, Alberto. (2010). Distribución fraccional de metales y minerales en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 26(4), 36-52.
- Aleojin, V; Almenares_ Alarcón, Víctoriano; Guerra_Pérez, Berta; Ivanov, V; Kravtsova, T; Almaguer_Furnaguera, Aida; . . . Lavaut_ Copa, Waldo. *Informe sobre los resultados de los trabajos de Exploración Geológica Detallada y Orientativa realizados en el yac. Punta Gorda años 1973-76, con C. R. de menas ferroniquelíferas en los sectores Punta Gorda y Yagrumaje según su estado el 1/1/1977*. 1977
- Almaguer_Carmenate, Yuri, Guardado_Lacaba, Rafael. (2007). Evaluación de la Susceptibilidad por Deslizamientos en el Yacimiento PuntaGorda 35.
- Almaguer_Furnaguera, Aida. (1989). *Mineralogía y Geoquímica de las cortezas de intemperismo de las rocas ultramáficas de la prov. Holguín*. . (Doctor).
- Almaguer_Furnaguera, Aida. (1995a). Composición de las pulpas limoníticas de la planta Pedro Sotto Alba, parte II, Período de crisis de sedimentación. *Minería y Geología*, 2.
- Almaguer_Furnaguera, Aida. (1995b). Corteza de intemperismo. Algunas características de sus partículas finas. *Revista Geología y Minería*, 12(1), 9-19.
- Andó, J; Kozák, M, Ríos, Y I (1989). Caracterización general de la asociación ofiolítica de la zona Holguín-Moa y el papel de las ofiolitas en el desarrollo estructural de Cuba. . *Minería y Geología*, 7(1), 15-33.
- Batista, y. (2009). *Evaluación del riesgo por deslizamiento del municipio Bartolomé Masó. Provincia Granma*. (Maestría), ISMMM.

- Bishop, M,Shroder, J. (2000). Remote sensing and geomorphometric assessment of topographic complexity and erosion dynamics in the Nanga Parbat massif. *The Geological Society of London*, 181-120.
- Cadete_La O, Marcos; Pérez_Alfaro, Rafael; Quintana_Aldana, Alberto,Gari_Parada, Alberto. *Informe geológico Detallado del yacimiento Yagrumaje Sur, Parte Norte*. 1998
- Castillo, Ernesto; Gari_Parada, Alberto; Orozco, María Esther; Almaguer_Furnaguera, Aida,Palmero_Sosa, Marino. *Informe geológico de Exploración Orientativa y Detallada para níquel en el yacimiento Yagrumaje (sector Sur y Oeste) Moa, Provincia Holguín, ejecutado durante los años 1988-89, con cálculo de reservas según el estado 1/ 06/ 93*. 1989
- Cordeiro, C. (1981). *Análisis químico de fases en menas lateríticas oxidadas de la corteza de intemperismo de Cuba*. (Candidatura), Habana, Habana.
- Cordeiro, C; Collazo, J,Voskresenskaya, N. (1977). Solubilidad del níquel asociado con diferentes minerales. *Miería en Cuba*, 3 No1.
- Cordeiro, C,Cordiero, A. (1987). Determinación experimental de la distribución del Ni entre las macrofases del mineral laterítico cubano. *Geología y Minería*, 2, 57-64.
- Corominas, J. (1987). Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera. 193-201.
- Crespo, E. (1996). *Análisis estratigráfico del Oligoceno en Cuba oriental*. (Maestría), ISMM.
- Cruz_Oroza, Isrrael; Legrá_Lobaina, Arístides Alejandro,Vera_Sardiñas, Ortelio. (2006). Metodología para la determinación semiautomatizada de dominios geológicos en yacimientos lateríticos. *Minería y Geología*, 22(1), 1-12.
- Cuenca_Reyes, Leandro. (2009). *Presencia de óxidos de manganeso en el perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, Moa – Holguín*. ISMM.

- Estévez_Cruz, elmidio,Ramírez_Hernández, Robert. (2009). Pronóstico de áreas favorables para depósitos de grava y arena en la llanura sur occidental de Pinar del Rio, Cuba. *Minería y Geología*, 25(2), 1-27.
- Fonseca, E; Zelepugin, V N,Heredia, M. (1985). *Structure of the ophiolite association of Cuba*. (pp. 321-329).
- Gleeson, S ; Butt, C ,Elias, M. (2003). Nickel laterites: A Review. SEG Newsletter 11-18.
- González_ Clemente, Enio César. *Informe de los resultados en la utilización de los métodos morfométricos. Yacimiento Yagrumaje, Oriente*. 1975
- Hmaidí, El; Layadi, A; Boufala, M; Abbasi, El,Essahlaouia, A. (2015). Contribution of GIS in selecting the favorable site for the location of the station purifying wastewater of Azrou city *Larhyss*(21), 7-14.
- Inerarity_Striker, Rolando,Delagado_Fernández, Tatiana. (1998). Los sistemas de información geográfica en Cuba. *Geografía*, 13-17.
- Iturralde-Vinent, M.A. (1976). Estratigrafía de la zona Calabazas-Achotal, Mayarí Arriba. Oriente. *La minería en Cuba*, 5, 9-23.
- Iturralde-Vinent, M.A. *Geología de las ofiolitas. En Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*. . 1994
- Iturralde-Vinent, M.A. (1995). *El segmento cubano del arco volcánico paleoceno-eoceno medio del Caribe*. Paper presented at the Transaction of the 3rd Geological Conference of the Geological Society of T&T.
- Iturralde-Vinent, M.A. *Geología de las ofiolitas de Cuba. En: Iturralde-Vinent, M. (ed.). Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. IGCP project 364*. IGCP:1996a
- Iturralde-Vinent, M.A. (1996b) Introduction to Cuban Geology and Tectonics. Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. . (pp. 3-35). IGCP.
- Iturralde-Vinent, M.A. (1998). Sinopsis de la constitución geológica de Cuba. *Acta Geológica Hispana*Acta geológica hispana (Vol. 33 No. 1-4, pp. 9-56).

- Labrador, M; Proenza, J; Galí, Salvador; Melgarejo, J C; Tauler, E; Rojas _Purón, Arturo; . . . Blanco_Moreno, Jesús A. (2007). Supergene Co-Ni-Mn mineralization in Ni-laterite deposits from northeast Cuba. *Economic Geology*(2), 1397-1400.
- Labrador, Manuel; Proenza, Joaquín; Galí, Salvador; Melgarejo, J.C; Tauler, Esperanza; Rojas_Purón, Arturo Luis; . . . Rodríguez_Vega, Antonio. (2006). Minerales de Mn-Co-Ni en las lateritas de Cuba Oriental: resultados preliminares. *Macfa*, 9, 281-284.
- Lavaut_Copa, Waldo. (1987). Control litológico-mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramafitas del campo mineral yacimientos Punta Gorda, Camariocas y Piloto.
- Lavaut_Copa, Waldo; Llorente_Lora, Máximo; Reborido_Fernández, José,Sosa_Rojas, Isabel *Proyecto para el desarrollo de una red de perforación de 23.57X23.57m en el yacimiento Yagrumaje Sur para fundamentar reservas minerales probadas*. 2007
- Llorca, S. (1993). Metallogeny of supergene cobalt mineralization, New Caledonia. *Aust. Earth Scientific*(40), 377-385.
- Llorca, S, Monchoux, P. (1991). Supergene cobalt minerals from New Caledonia. . *Mineral*(29), 149-161.
- Manceau, A; Gorshkov, A. I, Drits, V. A. (1992). Structural chemistry of Mn, Fe, Co and Ni in manganese hydrous oxides: Part I. Information from XANES spectroscopy. *Mineral*, 1144-1173.
- Manceau, A; Tamura, N; Marcus, M. A; MacDowell, A. A; Celestre, R. S; Sublett, R. E; . . . Padmore, H. A. (2002). Deciphering Ni sequestration in soil ferromanganese nodules by combining X-ray fluorescence, absorption, and diffraction at micrometer scales of resolution. *Am mineral*, 87, 1494-1499.
- Muñoz, J N, Campos, M. (1994). Las paragénesis minerales en las menas cromíferas del yacimiento "Potosí", Moa, Holguín, Cuba. *Minería y Geología*, 3, 3-13.
- Nykänen, V. M; Ojala, V. J; Sarapää, O; Hulkki, H, Sarala, P. (2007). Spatial Modelling Techniques and Data Integration Using GIS for Target Scale Gold Exploration in Finland. *Geological Survey of Finland*, 911-917.

- Ogarkov, Víctor,Paz_Segundo, Serdiuk L I. *Informe sobre los trabajos de Exploración geológica realizados en 1964-65 en el yacimiento de hierro y de níquel de Moa con cálculo de reservas según estado 01-01- 1967*. 1967
- Ojo, John; Olorunfemi , Matins; Akinluyi, Francis; Bayode, Sunday; Akintorinwa, Olaoluwa,Omosuyi , Gregory. (2015). Evaluating Soil Erosion Risk in the Basement Complex Terrain of Akure Metropolis, Southwestern Nigeria. *Geography and Geology*, 7(1), 56-64.
- Ott, Norbert; Kollersberger, Tanja,Tassara, Andrés. (2015). GIS analyses and favorability mapping of optimized satellite data in northern Chile to improve exploration for copper mineral deposits. *Geosphere*, 2(14), 236-251. doi: 10.1130
- Primelles_Fariñas, Josefa. (2002). SIG para asistir la estrategia de conservación de las Áreas Protegidas de la provincia de Camaguey, Cuba. *Agencia de Medio Ambiente*(3), 1-8.
- Proenza, J. (2015). Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en Y Y acimientos L L. *Sociedad española de mineralogía*(20), 2-9.
- Proenza, Joaquín (1997). *Mineralización de cromita en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). Ejemplo del yacimiento merceditas*. (Doctoral), ISMM, Moa.
- Proenza, Joaquín ; Roque_Rosell, Josep ; Labrador, Mael; Galí, Salvador; Tauler, Esperanza; Gallardo, Tamara; . . . Longo, Francisco (2010). Mineralizaciones de Co en los Depósitos Lateríticos de Ni Tipo Óxido y Silicato Hidratado. *Revista de la sociedad española de mineralogía, Macla No13*.
- Proenza, Joaquín,Carralero, Norge. (1994). Un nuevo enfoque sobre la geología de la parte sur de la cuenca de Sagua de Tánamo. *Minería y Geología*, 11, 3-10.
- Proenza, Joaquín; Gervilla, F; Diaz_ Martínez, Roberto; Rodríguez_Vega, Antonio; Lavaut_Copa, Waldo; Ruiz_Sánchez, R; . . . Marchesi, C. (2003). *La Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba Oriental): Un nuevo reconocimiento petrológico y estructural*. . Libro de resúmenes. V Congreso Cubano de Geología y Minería.

- Proenza, Joaquín; Gervilla, F, Melgarejo, J C (1999a). La Moho Transition Zone en el Macizo Ofiolítico Moa-Baracoa: un ejemplo de interacción magma/peridotita. . *Sociedad Geológica de España*, 12, 309-327.
- Proenza, Joaquín; Gervilla, F; Melgarejo, J C, Bodinier, J L (1999b). Al-and Cr-rich chromitites from the Mayarí-Baracoa ophiolitic belt (Eastern Cuba): Consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotites in suprasubduction mantle. *Economic Geology*, 547-566.
- Proenza, Joaquín; Melgarejo, J C, Gervilla, F. (2000). *La faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba oriental): una litosfera oceánica modificada en una zona de suprasubducción cretácica*. . Paper presented at the Tercera Conferencia Internacional sobre Geología de Cuba, el Golfo de México y el Caribe Noroccidental.
- Proenza, Joaquín; Salvador, Galí; Labrador, Manuel; Melgarejo, J C; Tauler, Esperanza; Rojas_Purón, Arturo Luis; . . . Lavaut_Copa, Waldo. (2007). *Nuevos datos sobre los minerales portadores de Ni y Co en los perfiles lateríticos de Cuba Oriental*. II Congreso de Mineía.
- Quintas, Felix. (1989). *Análisis estratigráfico y paleogeografía del Cretácico Superior y del Paleógeno de la provincia Guantánamo y áreas cercanas*. (Doctoral), ISMM.
- Quintas, Felix, Blanco_Moreno, Jesús Antonio. (1993). Paleogeografía de la cuenca San Luis y su importancia para la interpretación de la evolución geológica de Cuba Oriental. . *Minería y Geología*, 10, 3-14.
- Quintas, Felix, Proenza, Joaquín. (1995). Análisis tectono-sedimentario de la paleocuenca Sabaneta. *Minería y Geología*, 12, 3-8.
- Reyes_Chaves, Jonnathan, Fernández_Arce, Mario. (2014). Landslide Potential in Santo Domingo De Heredia, Costa Rica, Central America. *Geography and Geology*, 6 (4), 1-11.
- Reyes_Chaves, Jonnathan; Fernández_Arce, Mario; Grineski, Sara, Collins, Timothy. (2014). Spatial Analysis of Disaster Risk in Santo Domingo De Heredia, Costa Rica, Central America. *Geography and Geology*, 6 N.3, 123-132.

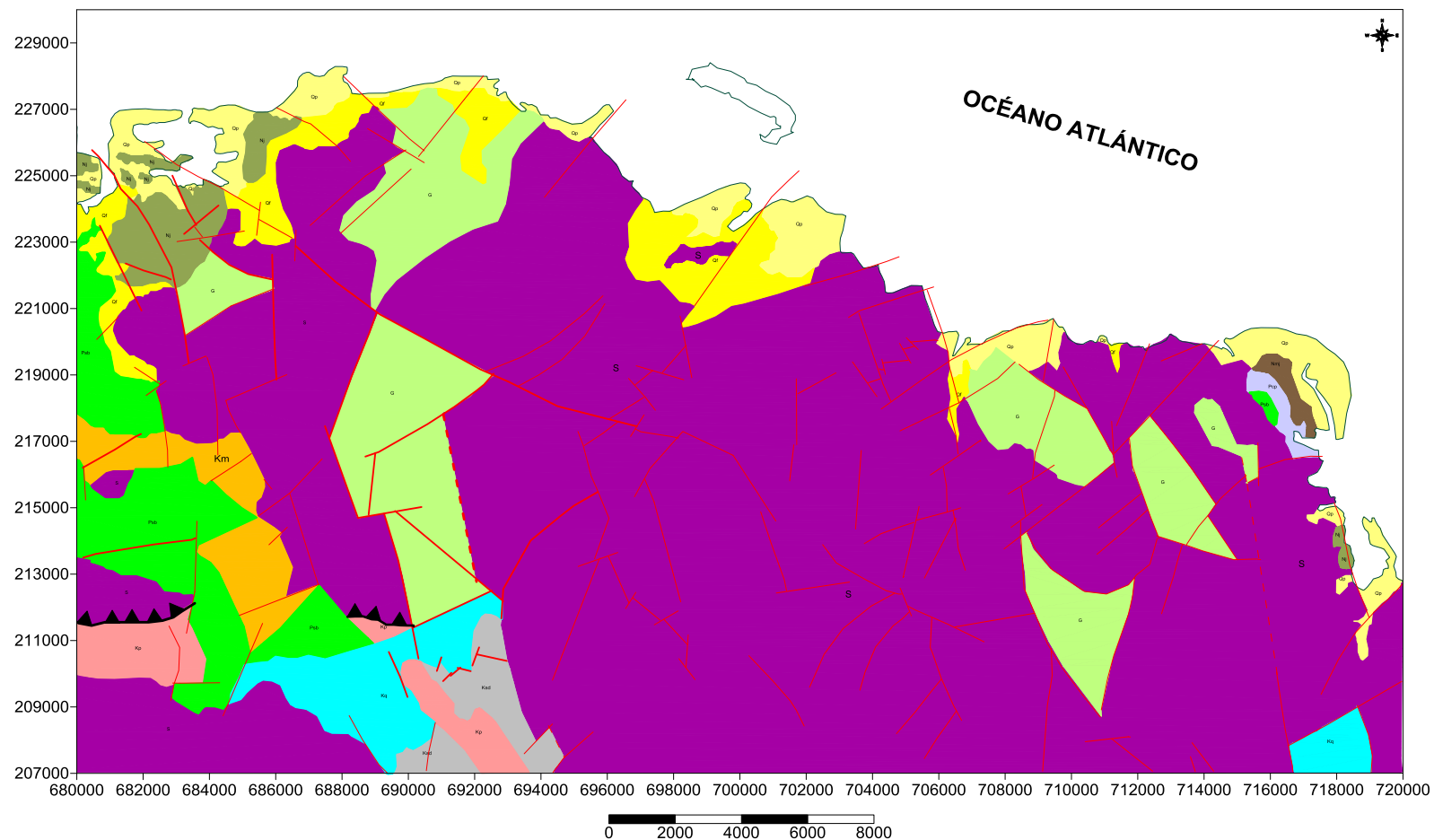
- Ríos, Y I, Cobiella, J L (1984). Estudio preliminar del macizo de gabroides Quesigua de las ofiolitas del este de la provincia de Holguín. *Minería y Geología*, 2, 109-132.
- Rodríguez_Infante, Alina. (1998a). Estilo tectónico y geodinámica de la región de Moa. *Minería y Geología*, 1.
- Rodríguez_Infante, Alina. (1998b). Estudio de la falla strike - slip Cananova. *Minería y Geología*, 1.
- Rodríguez_Infante, Alina. (1998c). *Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgo de génesis tectónica*. (Doctorado), ISMMM, Cuba.
- Rojas_ Purón, Arturo Luis; Rómulo_Simoes, Angélica, Orozco_Melgar, Gerardo. (2012). Identificación mineralógica de los óxidos de manganeso del yacimiento laterítico Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y geología*, 28 No 1, 1-26.
- Roque_Rosell, Josep; Mosselmans, F; Proenza, Joaquín; Labrador, M, Galí, Salvador. (2010). Sorption of Ni by "lithiophorite-asbolane" intermediates in Moa Bay lateritic deposits, eastern Cuba., 9-18.
- Simon_Haingura, Tobias. (2011). *Caracterización mineralógica de los óxidos de manganeso en perfiles lateríticos por Microscopía Electrónica*. ISMM.
- Sobol, S I. (1968). Composición de las lateritas de Moa y su influencia sobre los procesos de lixiviación de minerales por ácidos sulfúricos en autoclaves. *Revista Tecnológica*, 5, 17-23.
- Torres, M. (1987). *Característica de la asociación ofiolítica de la región norte de Moa-Baracoa y su relación con el arco volcánico Cretácico*. (Tesis en opción al grado de Ingeniero Geólogo), ISMMM.
- Vera_Sardiñas, Ortelio; Rodríguez_Vega, Antonio; Cordobés_Pedrianes, José Manuel, Legrá_Lobaina, Arístides Alejandro. (2001). Dominios geológicos del yacimiento laterítico de Punta Gorda, Moa: Delimitación y caracterización. *Minería y Geología*, 18, 55-66.

- Viltres_Milán, Yexenia; Pintón_Castro, Reinier, Guardado_Lacaba, Rafael. (2011). Evaluación de riesgo por deslizamiento en taludes y laderas del sector este del municipio Moa.
- Vletter, O.R. (1955). Cómo se formó el mineral de Ni cubano. Una lección sobre la génesis de las lateritas. . *Engineering and Mining Journal*.
- Xu, Y, Chueng, Q. (2001). A fractal filtering technique for processing regional geochemical maps for mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, I*, 147-156.

ANEXOS

Anexo 1. Mapa fotogeológico de la región de Moa. Escala original 1: 50 000. Realizado por Rodríguez I ,1998 y modificado por la autora.	69
Anexo 2. Mapas de puntos de muestreo	71
Anexo 3. Modelo digital del terreno del yacimiento Yagrumaje Sur.....	72
Anexo 4. Mapa de pendiente del yacimiento Yagrumaje Sur	73
Anexo 5. Encuesta aplicada al grupo de expertos.....	74

Anexo 1. Mapa fotogeológico de la región de Moa. Escala original 1: 50 000. Realizado por Rodríguez I ,1998 y modificado por la autora.



LEYENDA

Qf	Sedimentos fluviales del Cuaternario		Sobrecorrimientos
Qp	Sedimentos parálicos del Cuaternario		
Nmj	Fm Majimiana		
Nj	Fm Júcaro		
Pcp	Fm Capiro		
Psb	Fm Sabaneta		
Km	Fm Mícara		
Kp	Fm La Picota		
Ksd	Fm Santo Domingo		
Kq	Fm Quibicán		
G	Gabros		
S	Serpentinas		

Fallas

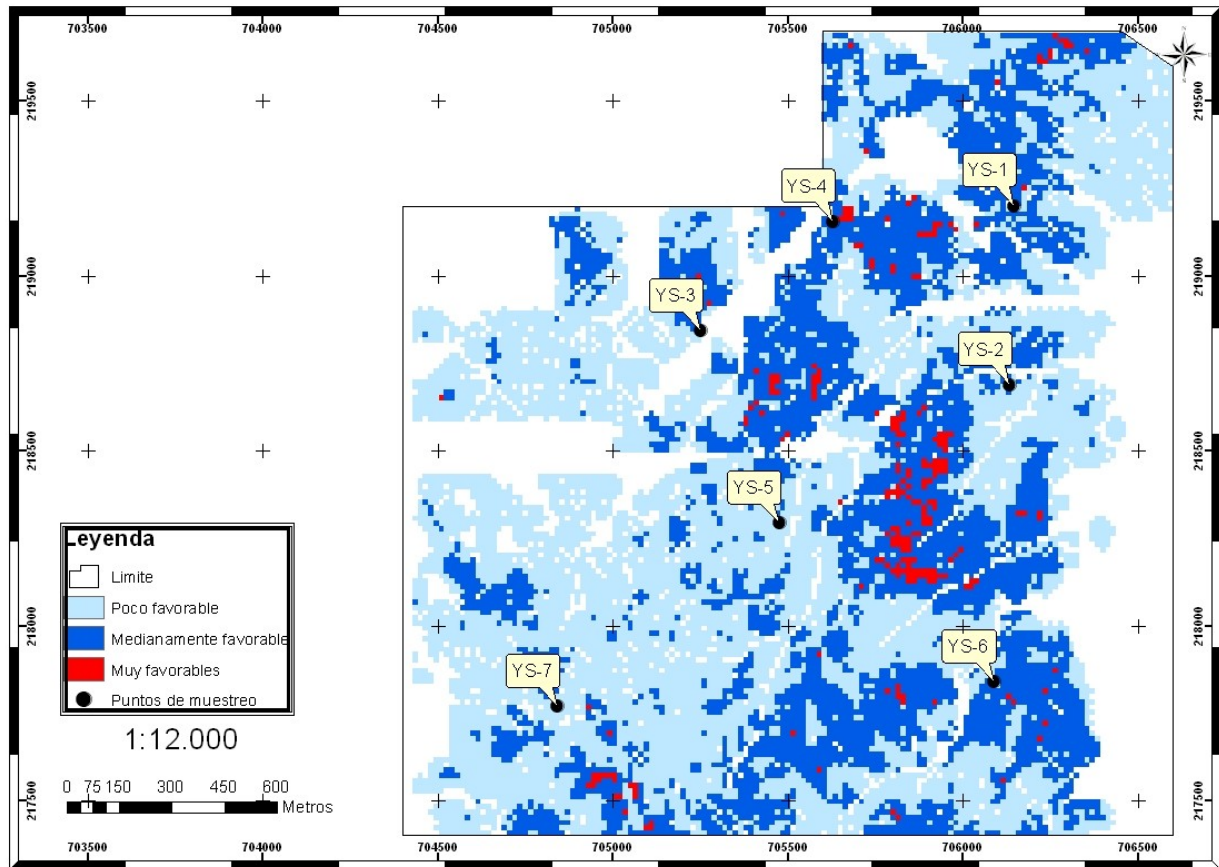


Fallas seguras

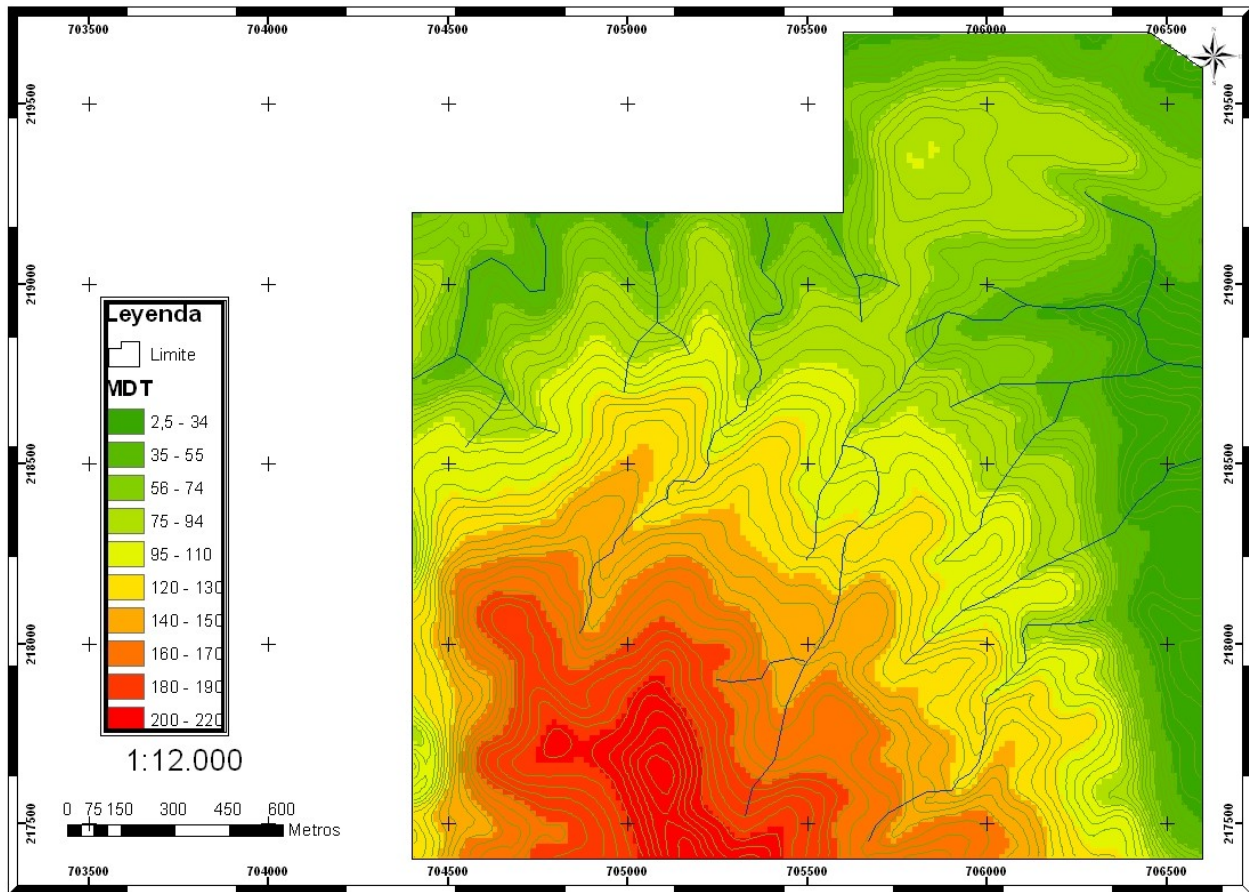


Fallas probables

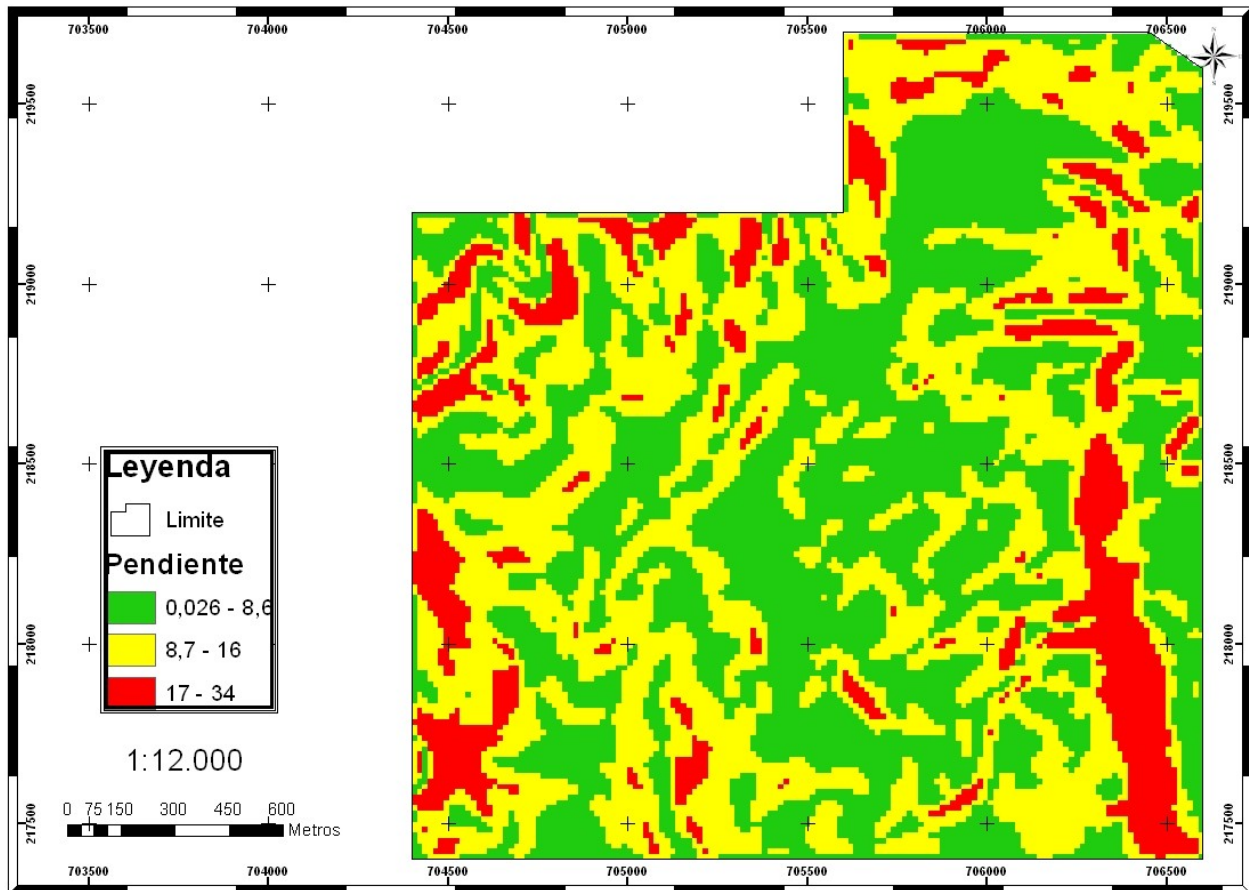
Anexo 2. Mapas de puntos de muestreo



Anexo 3. Modelo digital del terreno del yacimiento Yagrumaje Sur



Anexo 4. Mapa de pendiente del yacimiento Yagrumaje Sur



Anexo 5. Encuesta aplicada al grupo de expertos

ENCUESTA

La presente encuesta se realiza con el objetivo de obtener información básica que permita trabajar en el perfeccionamiento de los procedimientos existentes para la sectorización de depósitos lateríticos, aspecto de vital importancia en las concesiones mineras cubanas.

1. Conoce usted algún trabajo o alguna información referida a lo anteriormente expuesto? Mencione al menos tres.

2. De las siguientes variables cuál cree usted que sean las más adecuadas a emplear para sectorizar un depósito mineral?

☐ Rugosidad del relieve*	☐ Variables geoquímicas de contenido
☐ Pendiente	☐ Relación de potencia de los horizontes Esc/LB
☐ Red fluvial	☐ Intercalaciones
☐ Cuencas fluviales	☐ Cut off
☐ Tectónica	☐
☐ Litología	☐
☐ Vegetación	☐

3. Conoce usted otra variable que a su consideración pueda ser empleada en la sectorización de yacimiento o depósitos minerales? Cuál?

4. Enumere el orden de importancia que a su criterio tienen las variables del punto dos.

***Rugosidad del relieve (coeficiente de variación del relieve)**