



**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**MODELACIÓN 3D DE ELEMENTOS QUÍMICOS DE LA LIMONITA
EN LA PRESA DE RECHAZO NUEVA, EMPRESA PEDRO
SOTTO ALBA.**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en
Geología**

Maestría en Geología, Mención de Prospección y exploración de yacimientos minerales
sólidos, 9^{na} Edición.

Autor: Ing. Jorge Luis Urra Abaira

Tutores: Dr. C. Ramón G. Polanco Almanza

Dr. C. Arístides A. Legrá Lobaina

Dra. C. Alina Rodríguez Infante

Moa – 2015

AGRADECIMIENTOS

Es un placer para mi haber trabajado con los especialistas de la geociencias Alina Rodríguez Infante, Arístides Alejandro Legrá Lobaina, Ramón Polanco Morciego, José Nicolás Muñoz Gómez, León Ortelio Vera Sardiñas, Wilfredo de la Guardia Rodríguez, Iván Barea Pérez, Rafael Cirion Monté, Miguel Figueras Serrano, Caridad Terrero Abella y Yorgenis Maceo Rustán, a los que agradezco infinitamente su valiosa contribución al desarrollo de esta investigación y mi preparación.

A mi familia y amigos que han estado presentes en todos los momentos y han sido pacientes en la espera de la culminación de este trabajo.

A todas estas personas y otros colegas no menos importantes que aportaron con sus ideas y tiempo, les ofrezco mi más sincero agradecimiento y les exhorto a que puedan seguir aportando a otros investigadores sus valiosos conocimientos; y que no se olviden de mí.

A todos muchas gracias,

El autor

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS FISICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	4
Introducción	4
Yacimientos lateríticos en el mundo, tecnologías usadas en la extracción del níquel y cobalto	6
Ubicación geográfica.....	8
Orografía	9
Hidrografía.....	10
Clima	10
Sismicidad.....	11
Población, flora y fauna.....	11
Características geológicas regionales	12
Tectónica	16
Cortezas de meteorización ferroniquelíferas.....	16
Origen del material de rechazo	19
Introducción de las técnicas geoestadísticas en la modelación de recursos	21
Antecedentes de la estimación de recursos en los yacimientos lateríticos cubanos	23
Regulaciones internacionales y nacionales sobre la declaración de recursos y reservas minerales.....	27
Regulaciones internacionales sobre la declaración de recursos	27
Regulaciones nacionales sobre la declaración de recursos.....	29
CAPÍTULO II. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL LIMONITICO.....	31
Introducción	31
Métodos y técnicas empleados	32
Levantamiento topográfico y modelo digital del terreno	32
Perforación y muestreo	33
Técnicas analíticas empleadas.....	35
Métodos mineralógicos.....	35
Método Geofísico.....	36
Modelación de yacimientos minerales sólidos en 3D	37
Métodos de regularización de la base de datos	40
Método geoestadístico	41
CAPÍTULO III. MODELACION 3D DEL MATERIAL LIMONÍTICO EN LA PRN.....	44
Introducción	44

Generalidades del material de la PRN	44
Caracterización del material acumulado en la PRN	47
Características mineralógicas del material de rechazo de la PRN	52
Datos de la exploración	61
Regularización de la base de datos	63
Análisis exploratorio o estadístico de los datos	64
Análisis variográfico	68
Creación de superficies	71
Estimación de los recursos	72
Modelo de bloques 3D	74
Validación de los resultados	76
CONCLUSIONES.....	80
RECOMENDACIONES	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXOS	

Listado de Tablas

Tabla 1. Yacimientos lateríticos de níquel y cobalto del mundo, según Berger, et al., 2011	6
Tabla 2. Proyectos que usan la tecnología de lixiviación ácida a presión (HPAL) y CARON	7
Tabla 3. Límite de coordenadas Lambert, Cuba Sur de la presa de rechazo nueva	8
Tabla 4. Organizaciones mundiales relacionadas con la declaración de recursos y reservas	28
Tabla 5. Tipos de perfiles de corteza presentes en la PRN, aplicando la clasificación de Lavaut-Copa, 2003	48
Tabla 6. Promedio de la composición química por tipo de horizonte identificado en la PRN	48
Tabla 7. Elementos químicos (% en peso) por intervalos de profundidad de la PRN.....	51
Tabla 8. Resultado del análisis mineralógico semicuantativo de la PRN	54
Tabla 9. Resultado del análisis mineralógico semicuantativo, presa de rechazo vieja.....	54
Tabla 10. Resultados del análisis químico de las muestras mineralógicas, presa de rechazo nueva.....	57
Tabla 11. Resultados del análisis químico de las muestras mineralógicas, presa de rechazo vieja	57
Tabla 12. Estadística descriptiva de la longitud de muestreo de los pozos en la PRN.....	64
Tabla 13. Estadígrafos globales para los datos de exploración	68
Tabla 14. Parámetros utilizados en la confección de los semivariogramas direccionales.....	69
Tabla 15. Resultados del ajuste de los modelos variográficos de las diferentes variables	70
Tabla 16. Modelos tridimensionales ajustados.....	70
Tabla 17. Comparación de los parámetros estadísticos estimados vs registro de los pozos	74
Tabla 18. Parámetros del modelo de bloques.....	74
Tabla 19. Estimados de recursos por diferentes métodos, Cut-off % Ni ≥ 1 y % Fe ≥ 35	75
Tabla 20. Estadígrafos estandarizados resultantes de la validación cruzada.....	76
Tabla 21. Variables estimadas en columnas de bloques vs resultados de pozos	77

Listado de Figuras

Figura 1. Distribución de los pozos de exploración en la PRN	9
Figura 2. Esquema del área de la cuenca de la PRN.....	10
Figura 3. Esquema geológico regional, escala original 1:250 000	14
Figura 4. Modelo geológico teórico de formación de las cortezas lateríticas en el macizo ofiolítico Moa - Baracoa, según Muñoz-Gómez, et. al., 2007	15
Figura 5. Diagrama teórico del desarrollo de la investigación para obtener el modelo 3D.....	31
Figura 6. Esquema resumido de preparación de muestras utilizado en la PRN.....	35
Figura 7. Esquema de ubicación de los electrodos de corriente en relación a los de potencial, tipo Schlumberger, (Notación internacional de electrodos más empleada, Geoconsult).....	36
Figura 8. Esquema Ubicación de los yacimientos en relación a la PRN.....	45
Figura 9. Distribución de los contenidos de Fe, Ni y Co de la PRN vs yacimientos que aportaron el material	46
Figura 10. Distribución del contenido de Ni+Co en la profundidad vertical, horizontes cada 2 m	49
Figura 11. Diagrama ternario con la distribución de Fe-Cr-Al del rechazo	50
Figura 12. Diagrama ternario $\text{SiO}_2\text{-MgO}_2\text{-F}_2\text{O}_3$ del rechazo, izquierda: Presa Nueva, derecha: presa vieja.....	52
Figura 13. Distribución de los pozos mineralógicos en la PRN	53
Figura 14 Diagrama ternario $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ de las muestras de la exploración geológica	55
Figura 15. Ubicación de las líneas de sondeo eléctrico vertical (SEV-PI) en la PRN	60
Figura 16. Distribución de las líneas iniciales de exploración, paso de 50 m en la PRN	62
Figura 17 Esquema de unidad de selección minera en el modelo de bloque de la PRN	65
Figura 18. Ejemplo de la distribución de la fracción menor que 0,85 mm en los pozos de exploración	66
Figura 19. Ejemplo de niveles en el modelo de bloque 3D, material útil vs pozos de exploración.....	67
Figura 20. Superficie topográfica del basamento y volumen de rechazo en la PRN	71
Figura 21 Esquema del elipsoide de búsqueda utilizado	73
Figura 22. Distribución de las áreas de influencia de los pozos perforados en la PRN	75
Figura 23. Diagrama de dispersión e histograma de errores estandarizados de los residuos de ni	77
Figura 24. Perfil esquemático de la distribución de material útil en el modelo 3D de la PRN.....	79

Listado de Fotos

Foto 1. Ejemplo de perfil laterítico con fragmentos de rocas serpentinizadas	17
Foto 2. Vista de la planta de preparación de pulpa.....	20
Foto 3. Vista de la antigua zona de descarga del material de rechazo	21
Foto 4. Muestras de pulpa de material limonítico, fracción menor que 0,85 mm.....	34

INTRODUCCIÓN

Las regulaciones internacionales relacionadas con el aprovechamiento de los recursos minerales han aumentado los requerimientos relacionados con la explotación más eficiente de estos recursos. A su vez, las diferentes organizaciones que responden a la conservación del medio ambiente demandan que se garanticen producciones sin residuos y una mejor conservación ambiental de las áreas en explotación.

Los yacimientos minerales se están agotando de forma acelerada, provocando un mayor interés de reevaluar las diferentes escombreras y acumulaciones residuales existentes en las minas en explotación o abandonadas, con el objetivo de incrementar las reservas minerales.

El conocimiento geológico de estas acumulaciones residuales es bajo y no se tienen establecidos los métodos de exploración específicos, es por ello que se hace necesaria la aplicación de un conjunto de métodos que permitan demostrar la perspectiva de utilización de los elementos útiles y nocivos contenidos en las mismas.

Las operaciones de la planta de preparación de pulpa (PP) de la empresa Pedro Sotro Alba con altos niveles de procesamiento que en múltiples ocasiones ha sobrepasado su capacidad de diseño, ha provocado que unido a las fracciones mayores que 0,85 mm del rechazo (fracciones no consideradas como útiles en el proceso actual), se incorporen fracciones de menas limoníticas menores que 0,85 mm, las que pueden ser útiles para el proceso de lixiviación ácida a presión (HPAL).

En la denominada presa de rechazo nueva (PRN) se realizaron labores de exploración geológica para determinar el potencial de menas limoníticas que pudiera ser reprocesadas, pero aún persiste un deficiente conocimiento de la cantidad y distribución espacial de los recursos.

Problema científico:

Insuficiente conocimiento de los recursos geológicos contenidos en el material limonítico depositado en la presa de rechazo nueva de la Empresa Pedro Sotro Alba.

Objeto de estudio

El material limonítico depositado en la presa de rechazo nueva de la empresa Pedro Sotto Alba de Moa.

Objetivo general

Elaborar un modelo digital 3D del material limonítico en la presa de rechazo nueva que represente la distribución de los elementos químicos útiles y nocivos y sirva de base para la estimación de los recursos minerales en la presa de rechazo nueva de la empresa Pedro Sotto Alba de Moa.

Campo de acción

Distribución espacial y cuantitativa de los elementos químicos útiles y nocivos en el material limonítico.

Hipótesis

Si se utilizan técnicas geo-estadísticas para elaborar un modelo digital 3D de la distribución de los elementos químicos útiles y nocivos contenidos en el material limonítico depositado en la presa de rechazo nueva de la empresa Pedro Sotto Alba de Moa, entonces se pueden estimar adecuadamente los recursos minerales en este depósito.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la distribución espacial de los elementos químicos útiles y nocivos del material limonítico de la presa
2. Determinar la distribución de la fracciones limoníticas menores que 0,85 mm
3. Estimar el volumen de material de rechazo que se puede considerar recurso mineral útil.
4. Elaborar los planos geoquímicos para cada banco de explotación.

Novedad científica

Nuevo modelo digital 3D de la distribución de los elementos químicos útiles y nocivos contenidos en el material limonítico depositado en la presa de rechazo nueva de la empresa Pedro Sotto Alba de Moa que permitirá conocer, por primera vez dentro de un depósito artificial, la distribución de las fracciones limoníticas menores que 0,85 mm y el

conocimiento de la distribución de los elementos químicos útiles y nocivos, que intervienen en el proceso de lixiviación ácida a presión.

Significación práctica

El material limonítico identificado en la PRN contribuye con el incremento de las reservas geológicas. La incorporación al proceso de explotación de las menas con contenidos industriales de níquel y cobalto, permitirá incrementar la vida útil de la planta metalúrgica. El reprocesamiento de estas menas contribuye con la mitigación del impacto ambiental negativo producido por los sólidos en suspensión que se vierten al río Cabañas, procedentes de la PRN.

CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Introducción

Los yacimientos lateríticos de la región oriental de Cuba contienen importantes concentraciones de níquel y cobalto, los que se encuentran asociados a menas limoníticas y saprolíticas. Entre las fuentes de ingreso de la economía cubana se encuentra la producción del níquel y cobalto.

Los precios atractivos de níquel y cobalto en el mercado internacional han motivado la ampliación de la planta metalúrgica Pedro Sotro Alba, ubicada en el municipio de Moa de la provincia de Holguín-Cuba, con el objetivo de incrementar la producción de níquel y cobalto.

El incremento de las producciones intensifica el agotamiento de los yacimientos limoníticos de la región, provocando un inusual crecimiento de las distancias de transportación de las menas lateríticas hacia la planta de preparación de pulpa (PP) de la empresa Pedro Sotro Alba. Entre las alternativas de recursos limoníticos se ha evaluado el material acumulado de la PRN, para su posible re-procesamiento.

El material de rechazo de la PP proviene de las cortezas lateríticas de los diferentes yacimientos en explotación a cielo abierto; los cuales han sido depositados en dos zonas desde el año 1958 hasta el año 2000.

Las operaciones de la PP con altos niveles de procesamiento, que en múltiples ocasiones ha sobrepasado su capacidad de diseño, han provocado que unido a las fracciones mayores que 0,85 mm del rechazo (fracciones no consideradas como útiles en el proceso actual), se incorporen fracciones de menas limoníticas menores que 0,85 mm que pueden ser procesadas en la tecnología de lixiviación ácida a presión (HPAL).

Las características del material depositado no han sido estudiadas con precisión, por lo que en el año 2003 se procedió a realizar una exploración geológica en la PRN, donde se logró definir las perspectivas en relación al potencial de material limonítico acumulado. (Lavaut-Copa, et al., 2003)

En la investigación se pudo identificar que las menas limoníticas presentan contenidos de níquel y cobalto industriales asimilables por el proceso metalúrgico, pero se requiere del estudio de modelación de la distribución espacial de los contenidos útiles (Ni, Co) y nocivos (Al, SiO₂, Mg); así como precisar el tonelaje de recursos útiles con fracciones limoníticas menores que 0,85 mm.

El modelo científico es un instrumento de la investigación de carácter material o teórico, establecido para reproducir el objeto que se está estudiando, constituye una reproducción simplificada de la realidad que permite descubrir nuevas relaciones y cualidades del objeto de estudio. Es un instrumento que tiene por función básica la de ayudar a comprender las teorías y las leyes.

La aplicación del método de la modelación está íntimamente relacionada con la necesidad de encontrar un reflejo de la realidad objetiva. La modelación es justamente el método mediante el cual se crea abstracciones con vistas a explicar la realidad.

En el presente estudio se propone establecer un nuevo modelo de bloques 3D que permita caracterizar la distribución espacial y cuantitativa de los elementos químicos útiles y nocivos en el material limonítico de la PRN; así como precisar la cantidad de recursos existentes.

Es conocido que los yacimientos lateríticos presentan una distribución heterogénea de menas oxidadas y silicatadas (Muñoz-Gómez, 2004; Martínez-Vargas, 2006). Las menas presentan una composición química y mineralógica compleja, manifestado a su vez en una desigual distribución de los elementos portadores útiles y nocivos. Este último aspecto, conlleva la realización de un análisis preciso en el momento de estimar los recursos con el objetivo de evitar las mezclas de poblaciones estadísticas. El material depositado está compuesto por una mezcla de menas proveniente de los yacimientos Atlantic, Zona Sur, Zona Pronóstico, Zona A y en menor medida Moa Oriental, (Rodés-García, 1997).

El uso de nuevas técnicas computacionales ha permitido la implementación y control de la explotación utilizando el sistema de explotación por bancos múltiples, que tienen su fundamento en los modelos 3D, lo anteriormente expuesto, ha creado la necesidad de

adoptar un nuevo modelo para la PRN que muestre el comportamiento espacial de los contenidos principales y nocivos, empleando las técnicas de estimación apropiadas.

En el área de la PRN se realizaron 36 pozos de exploración para un total de 1 776 m, alcanzando un espesor promedio de 22,7 m.

La incorporación de los recursos limoníticos contenidos en la presa al proceso de explotación permitirá recuperar las menas con contenidos industriales de níquel y cobalto; además de mitigar el impacto ambiental negativo producido por los sólidos en suspensión que se vierten al río Cabañas.

Yacimientos lateríticos en el mundo, tecnologías usadas en la extracción del níquel y cobalto

Entre los países con mayor distribución de yacimientos lateríticos se encuentran Filipinas, Brasil, Australia, Indonesia y Nueva Caledonia, seguidos de Rusia y Cuba, (Tabla 1). En este último, los yacimientos se localizan hacia la parte norte identificados en tres zonas, Cajalbana provincia de Pinar del Río, San Felipe provincia de Camagüey, Pinares de Mayari – Moa en la provincia de Holguín,

Tabla 1. Yacimientos lateríticos de níquel y cobalto del mundo, según Berger, et al., 2011

País	Zonas	País	Zonas
Filipinas	17	Myanmar/ Burma	2
Brasil	15	Nueva Guinea	2
Australia	10	Puerto Rico	2
Indonesia	10	R. Dominicana	2
Nueva Caledonia	10	Albania	1
Rusia	8	Camerún	1
Cuba	7	Colombia	1
India	5	Etiopía	1
Burundi	3	Costa de Marfil	1
Grecia	3	Macedonia	1
Guatemala	3	Islas Salomón	1
kazajastán	3	Turquía	1
Madagascar	3	E.U.A.	1
Serbia	3	Venezuela	1
Kosovo	2		

Nota: publicado en <http://www.usgs.geopubs>, 2011

En el mundo se han desarrollado diferentes tecnologías para la extracción de los contenidos de níquel y cobalto presentes en estas cortezas lateríticas y rocas ricas en estos elementos químicos (Tabla 2). En Cuba se implementó en la región de Nicaro el proceso de lixiviación carbonato amoniacal (CARON) y el de lixiviación ácida a presión (HPAL) en la región de Moa, donde además se aplica el proceso CARON.

En proceso de construcción se encuentra una nueva planta que utilizará el proceso de fundido, para la obtención de ferro-níquel.

Tabla 2. Proyectos que usan la tecnología de lixiviación ácida a presión (HPAL) y CARON

HPAL			
Proyecto	Compañía	País	Comentario
Moa Nickel S.A.	Cuba - Sheritt	Cuba	Primera planta HPAL
Bulong	¿?	Australia	Cerrada
Cawse	Norilsk	Australia	-
Murrin-Murrin	Minara	Australia	-
Coral Bay	Sumitomo	Filipinas	-
Goro	Vale Inco	Nueva Caledonia	En construcción
Ramu River	¿?	PNG	En construcción
Ravensthorpe	BHP- Billiton	Australia	En construcción
Madagascar	Sheritt	Madagascar	En construcción
CARON			
Nicaró	Cuba	Cuba	Cerrada
Punta Gorda	Cuba	Cuba	-
Nonoc	Filipinas	Filipinas	Cerrada
QNI	BHP-Billiton		Importa la materia Prima
Tocantins	Níquel Toc.	Brasil	-

HPAL – lixiviación ácida a presión CARON - lixiviación carbonato amoniacal

Los proyectos de investigación geológica ejecutados en Pinares de Mayarí - Moa han permitido establecer y definir los recursos hasta la categoría de recursos medidos y reservas probadas en la mayoría de los yacimientos. En otras provincias del país existen pequeñas manifestaciones de corteza con contenidos de níquel y cobalto, pero no constituyen zonas con recursos de interés económico hasta el momento.

En la búsqueda bibliográfica realizada no se encontraron reportes sobre el estudio o explotación de presas de rechazo en los proyectos donde se aplica el proceso HPAL. En el 2014 se obtuvo una referencia que en Madagascar se estaban realizando muestreos para

determinar las perspectivas de su futura explotación, pero aún son insuficientes las bibliografías publicadas al respecto.

Ubicación geográfica del objeto de la investigación

La presa de rechazo nueva se ubica en la zona nororiental de Cuba, limitada al norte con el río Cabañas, al sur con el yacimiento Yamanigüey, al este limita con el río Moa y hacia el oeste con el yacimiento Zona Sur. El área que ocupa el depósito es de 28,6 ha, entre las coordenadas Lambert, sistema Cuba Sur, que se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 1.

Tabla 3. Límite de coordenadas Lambert, Cuba Sur de la presa de rechazo nueva

Vértice	Xn	Yn
	m	
1	218 474,75	695 165,13
2	218 288,81	695 231,62
3	218 155,52	695 202,30
4	218 070,36	695 184,47
5	218 070,36	694 789,42
6	217 969,87	694 789,42
7	217 969,87	694 648,27
8	218 113,74	694 648,27
9	218 113,74	694 606,20
10	218 206,03	694 606,20
11	218 206,03	694 549,20
12	218 314,87	694 549,20
13	218 314,87	694 635,63
14	218 406,12	694 635,63
15	218 406,12	694 731,70
16	218 612,80	694 731,70
17	218 612,80	694 831,26
18	218 474,75	695 165,13

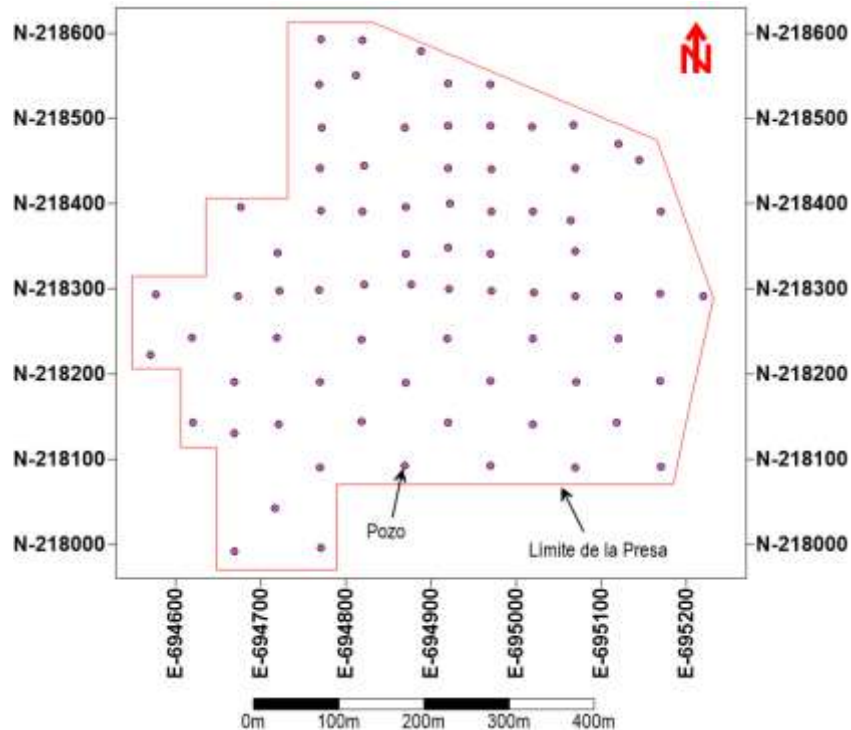


Figura 1. Distribución de los pozos de exploración en la PRN

La PRN fue ubicada a unos 100 m de la PP actual. El área de deposición forma parte de la cuenca donde se localizan los yacimientos Zona Sur, Yamanigüey y Zona B, el área total de la cuenca es de aproximadamente 290 ha. La PRN se encuentra enclavada dentro de la cuenca, limitada al norte por un dique artificial que sirve de cierre a la cuenca..

Orografía

El relieve del área de estudio se caracteriza por ser la parte baja de la cuenca, que se encuentra rodeada por un sistema montañoso que va de forma gradual desde montañas altas, desde el sur, hasta zonas llanas o de premontaña hacia la parte norte del área, ver Figura 2. Las cotas más altas están en el orden de los 250 m hasta el centro de la cuenca donde las cotas oscilan entre 80 y 100 m.

En el área es frecuente encontrar suelos redepositados, manifestado por la repetición de capas de perdigones intercaladas con material arcilloso, lo que evidencia su carácter deluvial.

El relieve es atravesado por numerosas fallas que limitan y cortan el área dentro de la cuenca, afectado por la acción de los procesos de meteorización y erosión desarrollados por las aguas superficiales.

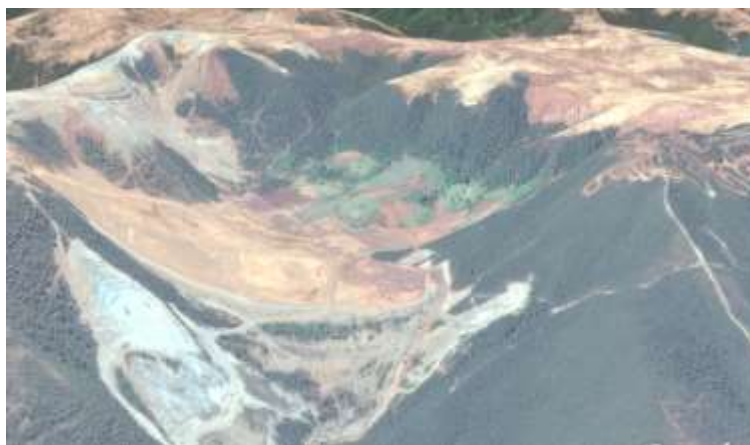


Figura 2. Esquema del área de la cuenca de la PRN

Hidrografía

La región se caracteriza por una red hidrográfica abundante, representada por numerosos ríos, entre ellos el río Moa que limita el área hacia el este y el río Cabañas que se localiza al norte del área de estudio.

La dinámica fluvial está condicionada por los ríos jóvenes que drenan sus aguas hacia el cauce del río Cabañas, como es el caso del arroyo La Vieja, que limita el área de la presa hacia el oeste.

La PRN fue situada en el valle de la cuenca natural, compuesta por diferentes elevaciones donde nacen diferentes arroyos que fluyen hacia el centro del área y descargan en un punto que tributa al río Cabañas. En la parte sur y oeste de la cuenca se localizan pequeños sembrados que utilizan la afluencia de las aguas superficiales y subterráneas.

Clima

El clima de la región es subtropical húmedo, con dos períodos de lluvia (mayo-junio) y (octubre-enero), y dos períodos de seca (febrero-abril) y (junio-septiembre). El total anual de las precipitaciones varía entre 700 y 3 500 mm.

La temperatura media anual oscila entre 22,3 y 30,5 °C, siendo los meses más calurosos julio, agosto y septiembre, y los más fríos enero y febrero; los meses más lluviosos noviembre y diciembre y los más secos, marzo, julio y agosto.

La región de Moa presenta un clima tropical húmedo, caracterizado por altas temperaturas, lo que provoca una alta evaporación. El clima está fuertemente influenciado por los vientos de alisios del nordeste de marzo a noviembre.

Sismicidad

La sismicidad en el área de Moa está asociada en mayor medida a los movimientos sísmicos que ocurren hacia el sureste, relacionados con el límite de la placa que se extiende entre Jamaica y el sur de Cuba. En la parte norte se han obtenido determinaciones sísmicas con una dirección sureste, a lo largo del grupo de islas de las Antillas. Los estudios se basaron en la información sismológica de Knight Piésold obtenida del Reino Unido, que recoge los eventos sísmicos desde el año 1900 en un radio de 300 km, tomando como centro la PRN, (Knight_Piésold_Consulting, 2000).

La mayor parte de la actividad sísmica registrada en la región de Moa ocurre hacia el sur, aunque en los últimos años ha existido un incremento de los movimientos sísmicos registrados en la parte norte.

La PRN se encuentra ubicada en un sistema complejo desde el punto de vista tectónico, los sistemas principales de fallas de la región interceptan el área por varios sectores. Es por ello que durante la construcción de la misma se realizaron diferentes pruebas para determinar la estabilidad sísmica generada de forma natural o mediante el uso del equipamiento minero. Los detalles de estas investigaciones sísmicas no estuvieron al alcance de la presente investigación, (Knight_Piésold_Consulting, 2000).

Población, flora y fauna

La población de Moa, según información aportada por la dirección municipal de estadística el 6 de septiembre del año 2013 es de 75 301 habitantes.

La información sobre la flora y fauna del área de Moa comprende el 33 % del endemismo cubano. En la zona se pueden encontrar pinares, pluvisilvas, charrascos y bosques tropicales predominando el *pinus cubensis* y plantas latifolias.

En el caso específico de la PRN, se encuentra alrededor de áreas desbastadas por la minería, total o parcialmente, solo en las zonas de arroyos y cañadas se desarrollan algunas especies de helechos y de epifitas de orquídeas y bromeliáceas, en las franjas de escurrimiento de las aguas superficiales.

Características geológicas regionales

El desarrollo de la era Mesozoica en Cuba se produjo según el modelo geotectónico que caracteriza a los sistemas de arcos insulares y cuencas marginales, que se desarrollaron en las periferias de los márgenes continentales como consecuencia de la convergencia, (Rodríguez-Infante, 1998).

A fines del Maestrichtiano se estima ocurre la extinción del arco volcánico cretácico cubano, iniciándose los procesos de compresión de sur a norte que originan, a través de un proceso de acreción, el emplazamiento del complejo ofiolítico según un sistema de escamas de sobre-corrimiento con mantos tectónicos altamente dislocados de espesor y composición variable.

Los movimientos de compresión hacia el norte culminaron con la probable colisión y obducción de las paleounidades tectónicas sobre el borde pasivo de la plataforma de Bahamas. A partir del Eoceno Medio y hasta el Mioceno Medio las fuerzas de compresión tangenciales se reducen, tomando importancia para la región los movimientos verticales que caracterizan y condicionan la morfotectónica regional, iniciándose a partir del Mioceno Medio el proceso de ascenso del actual territorio de la isla de Cuba.

Los movimientos verticales responsables de la formación del sistema de horts y grabens, van a caracterizar los movimientos tectónicos recientes, sin obviar la influencia que sobre Cuba Oriental tienen los desplazamientos horizontales que ocurren a través de la falla Oriente desde el Eoceno Medio-Superior, que limita la placa norteamericana con la placa del Caribe, generándose un campo de esfuerzos de empuje con componentes fundamentales en las direcciones norte y noreste, que a su vez provocan desplazamientos horizontales de reajuste en todo el Bloque Oriental Cubano, (Rodríguez-Infante, 1998).

La complejidad geológica en la que se encuentra la PRN, es el resultado de la evolución de diferentes eventos geológicos que experimentó el territorio en épocas pasadas dando lugar a

una amplia variedad de estilos tectono-estratigráficos, morfológicos y litológicos que influyen en la génesis, conservación y explotación de las cortezas lateríticas.

En el estudio publicado por (Iturralde-Vinent, 1997), sobre la constitución geológica de Cuba, reconoce que en el territorio cubano se pueden distinguir dos niveles estructurales principales, el substrato plegado constituido por diferentes unidades rocosas de origen continental y otro nivel de naturaleza oceánica; estos se encuentran mezclados con distintos grados de aloctonía.

El substrato plegado en el macizo ofiolítico Mayarí-Baracoa, sobre el cual se encuentran los depósitos ferroniquelíferos del nordeste holguinero, presenta unidades de naturaleza oceánica conformadas por las ofiolitas septentrionales, además de las rocas del arco volcánico del Cretácico, las secuencias de la cuenca 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. Las unidades de naturaleza continental están ausentes. El neautoctono está constituido por materiales terrígenos y carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario, que cubren las rocas del cinturón plegado discordantemente, ver Figura 3.

Es característico en la región la presencia de rocas de origen mantélico como dunitas, piroxenitas, lherzolitas, harzburgitas y en ocasiones wherlitas, parcial o totalmente serpentinizadas. En algunos sectores, dentro del complejo se ha evidenciado la presencia de peridotitas plagioclásicas y otras rocas de la zona de transición manto corteza oceánica.

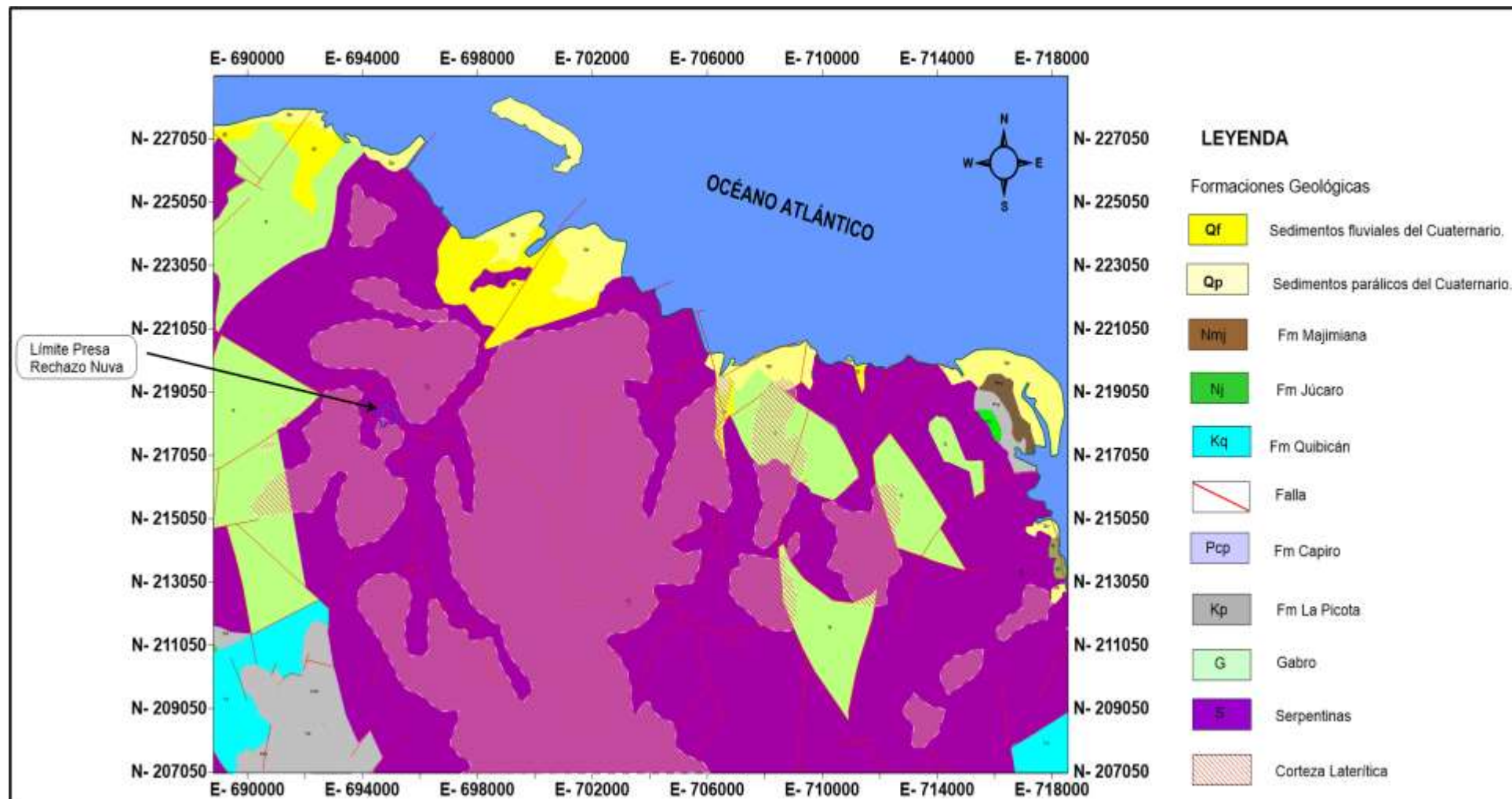


Figura 3. Esquema geológico regional, escala original 1:250 000

Dentro de las rocas que se localizan en el basamento de la corteza oceánica se encuentran los gabros normales, gabros olivínicos, noritas y troctolitas. Estas rocas se encuentran en mayor o menor grado serpentinizadas. Además de las rocas antes mencionadas se hallan rocas pertenecientes a la zona de transición entre las que se encuentran los diques de gabro-pegmatitas, cromititas y peridotitas plagioclásicas. En la Figura 4 se muestran dos perfiles ilustrativos del desarrollo de las cortezas sobre rocas del complejo mantélico (A) y del complejo cumulativo (B).

La presencia de estas rocas, pertenecientes a la zona de transición, genera contenidos anómalos de Al_2O_3 y SiO_2 en la corteza laterítica sobre ellas desarrolladas.

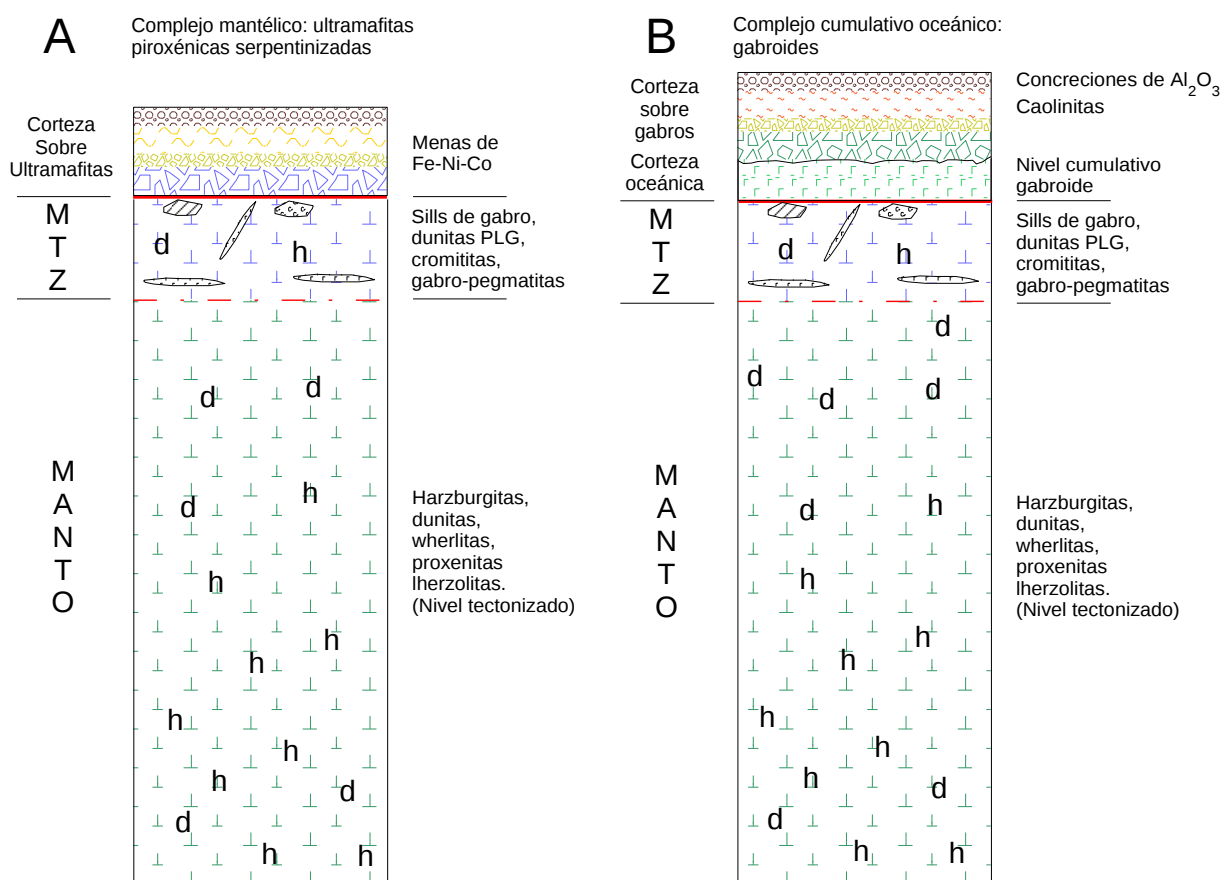


Figura 4. Modelo geológico teórico de formación de las cortezas lateríticas en el macizo ofiolítico Moa - Baracoa, según Muñoz-Gómez, et. al., 2007

El material de la PRN fue depositado sobre un basamento constituido por rocas serpentiniticas, que incluye las peridotitas serpentinizadas y las serpentinitas propiamente dichas.

Tectónica

Cortezas de meteorización ferroniquelíferas

Las condiciones tropicales y subtropicales de la región combinado con los factores petrológicos, estructurales y geomorfológicos han contribuido a la formación de cortezas de intemperismo. Los factores que controlan la formación de las lateritas también son mencionados y explicados por (Smirnov, 1982), quien también describe aspectos de particular importancia en su formación, como es la influencia del Eh y pH en la diferenciación vertical de estas cortezas.

La descomposición de las rocas primarias ha dado lugar a la formación de perfiles de alteración interpérica, caracterizados por una zonalidad vertical química y mineralógica.

Las zonas u horizontes presentan particulares propias en cuanto a su coloración, granulometría y densidad; estas características están en correspondencia con la intensidad del proceso de meteorización que ha tenido lugar en dicho punto de alteración interpérica.

Las menas lateríticas residuales se formaron durante el proceso de lateritización de las ultramafitas serpentinizadas, en estas menas existe un enriquecimiento de las concentraciones de algunos elementos químicos de importancia económica: Fe, Al, Ni, Co, Mn y Cr, entre otros.

Los cambios entre horizontes se establecen por la composición química de los metales principales (Fe, Ni, Co, Al, Si, Mg), y responden a la composición compleja de la mineralogía de las menas lateríticas; los contactos entre los diferentes horizontes no son fijos, es decir, no están separados mediante un contacto *sensu stricto* sino, más bien, constituyen una zona de transición entre los horizontes o capas, generalmente se trata de contactos sinuosos entre los horizontes. (Muñoz-Gómez, 2004).

En las cortezas de meteorización es frecuente encontrar fragmentos o bloques de rocas primarias, los que se localizan en los diferentes horizontes, aunque presenta una mayor distribución hacia la parte inferior del corte laterítico. (Foto 1)



Foto 1. Ejemplo de perfil laterítico con fragmentos de rocas serpentinizadas

La teoría más generalizada sobre la formación de los depósitos lateríticos, explica que los mismos son el producto de la intensa meteorización de las rocas, transformando la composición química y mineralógica de los minerales primarios, mediante la interacción dinámica del clima, factores geológicos, topográficos, tectónicos y composición petrológica de las rocas, entre otros.

En los depósitos lateríticos cubanos existe la teoría de la formación de estos depósitos bajo un régimen marino. Esta teoría está argumentada, entre otros aspectos, por la identificación de fósiles marinos en zonas del perfil laterítico a elevaciones sobre el nivel medio del mar de 700 m a 900 m. (López-Martínez, et al., 2008).

En la clasificación general de las lateritas propuesta por (Elias, 2002), se destacan tres grupos principales:

- ✓ **Lateritas oxidadas** (compuestas fundamentalmente por óxidos e hidróxidos de hierro en la parte superior del perfil sobreyaciendo las rocas mantélicas y alteradas)
- ✓ **Lateritas arcillosas** (compuestas fundamentalmente por arcillas esmectíticas en la parte superior del perfil)
- ✓ **Lateritas silicatadas** (compuesta fundamentalmente por silicatos de Mg-Ni en la parte más profunda del perfil, sobreyacidas por lateritas oxidadas)

En el nordeste de Cuba oriental las lateritas son principalmente oxidadas; donde los minerales primarios (olivino, serpentina y piroxenos) se desintegran de las celdas elementales por hidrólisis, liberando sus componentes como iones en disolución acuosa. El magnesio se lixivia casi completamente y en menor medida la sílice, el hierro bivalente es removido pero se oxida y precipita rápidamente como hidróxido férrico, que cristaliza progresivamente a goethita y otros óxidos e hidróxidos.

La transformación mineralógica explica las tendencias globales de algunos elementos como el magnesio, el hierro y la sílice. El comportamiento del níquel y el cobalto se diferencia de los elementos mayoritarios antes mencionados, a medida que los minerales primarios se alteran, estos elementos liberados, en forma de iones, tienden a asociarse por afinidad geoquímica con los nuevos óxidos e hidróxidos de hierro. Luego se incorporan a la estructura cristalina de la goethita a través una combinación de adsorción y reemplazo de Fe^{3+} . El níquel y el cobalto también se concentran en los óxidos de manganeso, donde precipitan por reacción de reducción-oxidación. El níquel y el cobalto se adhieren a la celda elemental de la goethita, neutralizando las cargas negativas; lo que facilita la extracción por la lixiviación ácida a presión.

La goethita se transforma progresivamente en hematita, esta transformación implica una pérdida de níquel, debido a que no se acomoda fácilmente en la estructura cristalina de este mineral. Esta transformación también implica un cambio de coloración de pardo amarillo a rojo ladrillo, así como, la formación de concreciones y corazas hematíticas.

Las lateritas arcillosas se forman en condiciones menos severas de meteorización (por ejemplo en climas más fríos o secos); la sílice no se elimina como en los climas húmedos tropicales, ésta se combina con el hierro y una pequeña cantidad de sílice formando esmectitas nontroníticas en lugar de óxidos de hierro. La nontronita juega el mismo papel que lo óxidos, fijando los iones de níquel en su estructura cristalina. La sílice excedente se redeposita formando ópalo y calcedonia.

Las lateritas silicatadas se forman donde existe un ascenso tectónico lento y continuo y el nivel freático se mantiene bajo en el perfil de la corteza. La meteorización durante un largo periodo de tiempo forma potentes horizontes saprolíticos, que deben estar sobreyacidos por

horizontes limoníticos poco potentes, en dependencia del grado de erosión en la superficie del depósito, (Smirnov, 1982). El níquel proveniente de la recristalización de la goethita, con una tendencia de concentrarse fundamentalmente en la parte saprolítica en los minerales primarios alterados, sustituyendo el magnesio en los minerales del grupo de la serpentina, formando silicatos hidratados de níquel bajo nuevas condiciones (goethita, esmectitas y garnierita).

Origen del material de rechazo

El material de rechazo de la PP fue inicialmente depositado hacia el sur de la planta, a unos 30 m de distancia. En este sector se depositó todo el material de rechazo desde el inicio de la PP en el año 1959 hasta el año 1970 cuando alcanzó su máxima capacidad; posteriormente este depósito recibió el nombre de presa de rechazo vieja (PRV). En la década de 1970 fue necesaria la construcción de la presa de rechazo nueva (PRN), la que fue concluida y puesta en funcionamiento a finales de 1985.

El rechazo proveniente de la PP era conducido por un sistema de bandas transportadoras hasta un punto de descarga localizado a 100 m al oeste de la planta. En este punto de descarga, por caída libre, era distribuido con flujos irregulares dentro del área de la cuenca.

Las menas limoníticas procedentes de las áreas en explotación son suministradas a la planta de preparación de pulpa, a través de los camiones que parten de los frentes de minería; las menas son depositadas en las tolvas que están ubicadas en las dos unidades de recepción conocidas como trenes 1 y 2.

En la parte inferior de las tolvas se localizan dos sistemas de recepción de mineral constituidos por esteras y bandas transportadoras que trasladan las menas hasta las zarandas, donde comienza el proceso de preparación de la pulpa acuosa. En los puntos de recepción de las menas lateríticas además se localiza un sistema de cadenas y martillos que permiten atenuar la caída de rocas y terrones y su fragmentación.

En el proceso de preparación de la pulpa limonítica se utiliza agua a presión sobre un sistema de zarandas primarias y secundarias que separan la fracción mayores que 0.85 mm. El resultado final es una pulpa que se caracteriza por poseer una granulometría menor que 0.85 mm, con una concentración aproximada de 25 % de sólidos, la cual es enviada a la

planta de espesadores de pulpa por un sistema de tuberías soterradas que comunica a las dos plantas, (Legrá-Cintra, 2012).

Las fracciones mayores de 9,5 mm son sometidas a un proceso de lavado utilizando agua a presión, para recuperar las fracciones limoníticas adheridas; luego son rechazadas en la zaranda primaria y depositadas como parte del primer rechazo de la planta, compuesto principalmente por fracciones de rocas, concreciones de hierro y terrones de material limonítico que no logran ser desmenuzados durante el lavado inicial.

La pulpa con partículas menores que 127 mm caen por gravedad en las cribas vibratorias y luego en las lavadoras de paletas, estas son enviadas a las zarandas secundarias que separan las partículas menores que 0,85 mm. Las partículas mayores que 127 mm son rechazadas y enviadas por bandas transportadoras a un cilindro rotatorio (en color rojo en la Foto 2) que se encarga de un lavado adicional de la pulpa, desmenuza los terrones, lava la parte superficial de las fracciones de rocas y de las concreciones.



Foto 2. Vista de la planta de preparación de pulpa

Este cilindro, contribuye a la recuperación de las fracciones menores que 0.85 mm y mejora la eficiencia de la planta. El rechazo de esta parte del proceso es transportado por un sistema de bandas y depositado hacia el extremo oeste de la planta. En una última etapa, el material es transportado por medio de camiones hacia los diferentes sectores seleccionados para su deposición, donde es acumulado en los espacios dejados por la minería o son empleados para la conformación de las bermas de seguridad en caminos mineros principales y secundarios.

La PP lleva un régimen prolongado de explotación, que unido a los incrementos de producción de níquel y cobalto, han conllevado una disminución en la eficiencia de lavado desde que se puso en operaciones desde 1959 hasta el año 2002. A partir de este último año fue instalado el cilindro lavador con el objetivo de incrementar la eficiencia de lavado del material procesado, recuperando las fracciones limoníticas. La eficiencia de recuperación del cilindro lavador es mayor en la media que existe una disminución de la capacidad de operación de la PP.

El rechazo acumulado en la PRN contiene fracciones de material límoníticos que pueden ser utilizadas para la extracción de níquel y cobalto (Foto 3). En la presente investigación se evalúan, entre otros aspectos, los contenidos de elementos útiles y nocivos, utilizando los resultados analíticos obtenidos de la exploración geológica. En la presa vieja los recursos depositados ya fueron reprocesados.



Foto 3. Vista de la antigua zona de descarga del material de rechazo

Introducción de las técnicas geoestadísticas en la modelación de recursos

El conocido hecho de engaño de la compañía de minerales de Bre-X Ltd., donde reportó haber encontrado las reservas de oro más grandes del mundo en Busang, Indonesia en el año 1995 (Dominy, et al., 2004), marcó un punto importante en la audiencia geológica mundial. A partir de ese momento se incrementaron las exigencias en los reportes públicos de las investigaciones geológicas.

El avance de la industria minera ha traído consigo la necesidad de utilizar métodos más confiables y precisos durante la estimación de recursos y reservas. El incremento de las

regulaciones, en las organizaciones rectoras para certificar los recursos minerales declarados, también ha requerido que los inversionistas sean más selectivos en los métodos propuestos en el desarrollo de cualquier proceso de estimación de recursos o reservas. En el mundo de la minería existe una competencia entre las compañías encargadas de la evaluación económica de los recursos minerales.

El desarrollo y aplicación de la matemática aplicada a la geología ha impulsado los estudios de modelación de los depósitos minerales, aunque realmente la modelación comienza desde que se establecen los diferentes modelos geológicos en función de los tipos genéticos de yacimientos.

La modelación está encaminada a mejorar el grado de conocimiento de un yacimiento o depósito, partiendo de la información geológica disponibles. La integración de los criterios geológicos combinado con métodos geoestadísticos, permiten realizar una representación del objeto físico y descubrir las relaciones entre los diferentes parámetros de estudio.

En la actualidad la aplicación de los métodos geoestadísticos en la esfera internacional es amplia, existen dos polos fundamentales de desarrollo de estas técnicas: El centro de geoestadística de la escuela superior de minas de París (Fontainebleau, Francia) y la Universidad de Stanford en Estados Unidos de América.

Las diferentes empresas productoras de softwares mineros y las compañías consultantes en el tema de estimaciones de recursos, han puesto todo su empeño en insertar nuevas herramientas enfocadas al área de la estimación. Estas se basan en los mismos principios matemáticos, pero con la introducción de los nuevos aportes de la geoestadística.

La aplicación de técnicas geoestadísticas en la estimación de recursos se consolidó con los estudios realizados por George Matheron recogidos en su tesis doctoral; creando las bases de la teoría de la variable regionalizada, (Matheron, 1965). Esta investigación se nutrió de los aportes existentes sobre el uso de la distribución log-normal en minas de oro, así como del análisis de regresión en muestras y la introducción de la teoría de las funciones aleatorias.

El desafío presentado en los yacimientos con menas más complejas ha estimulado el desarrollo de las técnicas de simulación, la geoestadística lineal y no lineal; sobre todo en mineralizaciones complejas de oro, cobre y otros elementos dispersos.

En la tesis doctoral de (Chica Olmo, 1987), se tratan los procedimientos para la aplicación de las técnicas geoestadísticas, específicamente, la elaboración e interpretación de variogramas en el estudio de la variabilidad de los yacimientos minerales y su uso en la estimación de recursos. Los aportes teóricos mencionados anteriormente fueron utilizados como referencia en la presente investigación, durante el análisis geoestadístico.

En la actualidad se usan dos formas básicas de realizar la estimación de recursos, por los métodos clásicos (Legrá-Lobaina, 1994) y los geoestadísticos, (Pérez-Melo, 2003). Entre los métodos clásicos de estimación se pueden destacar el de bloques geológicos, áreas de influencia y el de perfiles paralelos. Estos se basan en el uso de estadígrafos de tendencia central, valores medios o medias ponderadas de los contenidos de la exploración en bloques. La eficiencia de estimación se incrementa cuando existe una determinada regularidad espacial y geoquímica de los datos.

Los métodos geoestadísticos son los más aplicados, estos siguen como premisa fundamental la realización de las estimaciones a partir de las características de variabilidad y correlación espacial de los datos originales. La geoestadística, a diferencia de los métodos clásicos, proporciona una estimación óptima de estas cantidades tanto a nivel global como local.

En la estimación de recursos y reservas está de forma inherente algún nivel de incertidumbre e imprecisión, por ende en los procesos se requiere de experiencia y habilidades para interpretar los mapas geológicos y datos analíticos de las exploraciones, los que representan la base del análisis geoestadístico. Es aquí donde los métodos modernos comienzan a tomar un mayor auge, buscando mejorar la precisión de las estimaciones.

Antecedentes de la estimación de recursos en los yacimientos lateríticos cubanos

El método de estimación de recursos limoníticos y saprolíticos empleado tradicionalmente en los yacimientos lateríticos cubanos fue el de áreas de influencia. Este método fue aplicado desde el mismo inicio de las exploraciones geológicas en la región hasta la década

de 1990 donde fueron introducidas otras técnicas. El método de áreas de influencia se basa en asignar un polígono de influencia a cada muestra, el punto dentro de cada polígono está más cerca de la muestra central que de cualquier otra muestra.

Las redes de exploración ejecutadas en los yacimientos lateríticos cubanos van desde 100 x 100 m, 33,33 x 33,33 m, 16,66 x 16,66 m, entre otras. En las diferentes etapas de exploración estas redes tratan de garantizar que los polígonos que se forman tengan una estructura simple bien definida. No obstante, cuando los pozos no presentan una equidistancia que permita crear áreas homogéneas en la distribución en el plano, las áreas de influencia se asignan en correspondencia de su ubicación y relación con el resto de los pozos.

El método de áreas de influencias, aunque es sencillo y práctico, no permite describir las relaciones entre las variables involucradas en la estimación. El hecho de no considerar las características de variabilidad y correlación espacial, impide el tratamiento adecuado de los datos cuando existe una alta variabilidad espacial. Otro aspecto es que este método no permite la integración de informaciones con distintos grados de estudio (José Quintín Cuador-Gil, 2002).

En las investigaciones actuales este método se utiliza como un método de control de las estimaciones cuando se emplean otros métodos, (Urrea-Abaira, et al., 2012; Figueras-Serrano, et al., 2014). En el ejercicio realizado por (Pieter-Jan, et al., 2011) en un yacimiento de cromitas utilizando el software Gemcom, señalan que se puede obtener resultados similares a los logrados por el método de Kriging.

En términos de correlación espacial, este método no utiliza la información aportada por los pozos vecinos, considerando solo los datos existentes en cada pozo de forma aislada. Lo anteriormente expuesto provoca que existan cambios bruscos en las leyes estimadas de cada bloque en relación con los que se localizan en el entorno, hecho que es más significativo cuando existen zonas muy variables en cuanto a sus contenidos. Otro aspecto desfavorable, es que solo considera como estadígrafo el promedio para asignar el valor a un bloque u área. Este parámetro debe ser analizado con otras medidas de tendencia central y medidas de dispersión como la desviación estándar y la varianza.

Otros métodos aplicados en la estimación de los recursos en los yacimientos lateríticos fueron el método de perfiles paralelos y el auxiliar de pozo a pozo, su aplicación estuvo más orientada al control de los recursos minados y la actualización del estado de recursos luego de realizar las actividades de destape y minería.

La introducción de técnicas de programación permitieron que (Guardia-Rodríguez, 1997), (Legrá-Lobaina, 1999) implementaran el sistema integral minero (SIM) y el sistema Tierra, respectivamente. El SIM fue aplicado en la mina de la Pedro Sotto Alba para el control de la explotación hasta el año 2008, en este caso se logró automatizar el método de áreas de influencias y se establecieron los primeros modelos de bloques de explotación. En este software se logró implantar por primera vez en los yacimientos lateríticos las unidades de selección minera de 8,33 x 8,33 x 3 m. El sistema Tierra fue desarrollado y aplicado desde 1998 en la mina de la planta Comandante Ernesto Che Guevara y el mismo contó con todas las herramientas para el control de las operaciones mineras y el control de los recursos.

La empresa Geominera Oriente en esta misma etapa desarrolló el software el Microniq, el cual fue utilizado para la estimación de recursos, aplicando el método de áreas de influencia en la exploración de los yacimientos.

En las dos últimas décadas, el desarrollo de las empresas que prestan servicio en la localidad a las plantas productoras, como el Centro de Proyectos a la Unión del Níquel (CEPRONIQUEL), lograron la implementación de softwares internacionales, como es el Gemcom, (Gemcom-Software, 1998) . Al mismo tiempo, las plantas productoras fueron adquiriendo otros programas utilizados a nivel mundial con el objetivo de aumentar la precisión en los estimados de recursos y cumplir con los requerimientos de las nuevas clasificaciones de recursos y reservas. Entre los software se encuentra el Surpac (Surpac, 2001) y el Isatis, (Geovariance Ltd., 2014), ambos con herramientas orientadas a la estimación de recursos y geoestadísticas avanzadas.

En la actualidad la empresa Che Guevara está en proceso de implementación del software Gemcom y la empresa Pedro Sotto Alba el Surpac combinado con el Isatis para el control y estimación de los recursos.

En la tesis de (Pérez-Melo, 2003), se recogen de forma resumida los principales estudios publicados sobre la aplicación de técnicas geoestadísticas en los yacimientos lateríticos cubanos, existen otros valiosos estudios pero los mismos constituyen parte del patrimonio geológico de Cuba y los mismos no han sido publicados. En este estudio se realiza un resumen de forma cronológica los datos históricos disponibles:

En el estudio presentado por (Legrá-Lobaina, 1999), exponen elementos del análisis variográfico y de la estimación por Kriging y concluyen que estas herramientas permiten resolver problemas comunes de los profesionales geólogo - mineros, aunque sugieren continuar profundizando en el estudio de estas técnicas. En la tesis se presentan modelaciones novedosas tridimensionales de los parámetros geoquímicos utilizando el software “Tierra”, desarrollado por el propio autor, como herramienta básica para el pronóstico, planificación y control de la minería en la empresa niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara.

En la investigación realizada por (José Quintín Cuador-Gil, 2002), trata la problemática de los yacimientos de corteza de intemperismo en su tesis doctoral. En esta investigación se establece una metodología que permite la caracterización de recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos a partir de la aplicación de métodos de estimación y simulación geoestadística, tomando como referencia de estudio el yacimiento Punta Gorda. En la tesis, el mismo hace referencia a que el proceso de validación puede resultar en algunos momentos innecesarios cuando la curva teórica describe exactamente la curva experimental de los semivariogramas.

Un aporte importante realizado por (José Quintín Cuador-Gil, 2002) constituye la secuencia metodológica a seguir en la aplicación de las técnicas geoestadísticas, relacionada con yacimientos lateríticos.

En la tesis doctoral de (Vera-Sardiñas, 2001), se usan estas herramientas geoestadísticas pero encaminadas a desarrollar una metodología que permita la optimización de las redes de exploración de los yacimientos lateríticos. Los resultados más importantes de este estudio radican en el establecimiento de siete dominios geológicos del yacimiento Punta

Gorda, sobre la base de la modelación, el análisis geomorfológico, geológico y geoquímico, para la delimitación y caracterización de los dominios.

En la tesis doctoral de (Martínez-Vargas, 2006) se introduce un nuevo modelo matemático multivariado que explica la desigual naturaleza de los contenidos de hierro en cada horizonte de la corteza, el cual estuvo encaminado a disminuir el error de estimación de los contenidos de hierro en las unidades de selección minera.

El autor presupone dos problemas adicionales, el primero está dado en que los datos que lo describen son puramente heterotópicos y los variogramas cruzados experimentales no están definidos en ese contexto, para modelarlos fue necesario crear un nuevo procedimiento de ajuste interactivo. El segundo problema consistió en obtener un método robusto para modelar los horizontes del perfil laterítico, lo cual se logró empleando la simulación en el contexto gaussiano truncado, usada por primera vez en los yacimientos de níquel y cobalto cubanos.

En los estudios realizados por (Urta Abaira, 2006), introduce la aplicación de la geofísica de ground penetration radar (GPR), en combinación con las técnicas geoestadísticas para confirmar la continuidad geológica y geometría de la mineralización. Enfatiza en que los programas de perforación utilizados por si solos en los depósitos lateríticos, no son suficientes para identificar la distribución de la mineralización, generando una inapropiada modelación geológica, y un bajo pronóstico de ocurrencia de pináculos de roca mezclados con material limonítico.

La relación entre densidad de las perforaciones, espaciado óptimo de líneas de geofísica de GPR y costo de explotación son aspectos que deben reflejarse en un equilibrio de costo beneficio y que aún están por definir en los tipos de yacimientos. El método de GPR se ha venido introduciendo como método de prospección de exploración, ejecutados por Geominera Oriente y la compañía Ground Penetration Radar en algunos yacimientos cubanos.

Regulaciones internacionales y nacionales sobre la declaración de recursos y reservas minerales

Regulaciones internacionales sobre la declaración de recursos

En la actualidad los reportes públicos de estimaciones de recursos y reservas a nivel mundial se realizan por personas competentes, conocidas como personas competentes o Quality Person (Q.P.), los especialistas han sido abalados por una institución de prestigio internacional que los certifica como tales, (Parker, 2009). Los Q.P. son profesionales independientes que no responden a los intereses de las empresas inversionistas, estas empresas los contratan como auditores para verificar la autenticidad de la información técnica que se emiten en los reportes de recursos y reservas.

En cuanto a los procedimientos y requerimientos específicos para la declaración de recursos, no se tiene un acuerdo específico, aunque si existe un mutuo reconocimiento de los diferentes profesionales de los disímiles países, sobre unificar los términos en los reportes de clasificación de recursos y reservas.

La comunidad internacional experta sobre el tema ha creado el sistema denominado CRIRSCO, (CRIRSCO, 2013) el cual está aglutinando una familia de reportes estándares sobre la declaración de los recursos y reservas, (JORC-Code-Australia, 2004;UNFC-Europa, 2010;NAEN-Russian-Code, 2011;CRIRSCO, 2013;Farmer, 2014), tomando como base el código de Australia para el reporte de recursos y reservas minerales.

En la Tabla 4 se muestran las principales organizaciones internacionales que responden a las exigencias de diferentes países en cuanto a declaración de reportes técnicos, relacionados con la geología y la minería.

La regulación establecida por el CRIRSCO ha considerado en el Acápito 35 la incorporación de materiales como escombreras, presas de colas y depósitos artificiales dentro de la clasificación de recursos y reservas. Los recursos serán considerados como depósitos “*in situ*” siempre y cuando exista una perspectiva razonable para su extracción económica.

Tabla 4. Organizaciones mundiales relacionadas con la declaración de recursos y reservas

Código		Observaciones
Internacional	CRIRSCO	Comité de Normas Internacionales para la Presentación de Informes sobre Reservas Minerales
Australasia	JORC CODE	Joint Ore Reserve Committee
South Africa	SAMREC/SAMVAL	South African Mineral Committee
United K. /Europa	PERC CODE	Pan-European Reserves & Resources Reporting Committee
Canada	CIM (NI43-101)	Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum
USA	SME Guidelines	Society for Mining, Metallurgy and Exploration
S. de Chile	CERTIFICATION CODE	Comisión Minera de Chile
Rusia	NAEN	National Association for Subsoil Examination

Regulaciones nacionales sobre la declaración de recursos

En los últimos años en Cuba se han venido unificando los criterios en relación a las clasificaciones de recursos y reservas internacionales. La Ley de Minas y sus reglamentos constituyen las herramientas legales que normalizan los temas relacionados con la emisión de reportes técnicos de recursos y reservas, entre otros tópicos importantes. (Ley de Minas-Cuba, 1997).

En específico, la Resolución 385 del año 2008 del Ministerio de la Industria Básica, (Resolución-385-Cuba, 2008) se recogen las normas para la clasificación de los recursos y reservas de minerales sólidos y el balance nacional de recursos y reservas de minerales sólidos de la República de Cuba. En la citada resolución [Artículo # 8, inciso m] se recoge que los minerales acompañantes que se van acumulando durante el proceso de beneficio, las pilas de mineral (incluyendo las escombreras y depósitos de cola) y los rellenos se consideran, a los efectos de esta clasificación, como mineral “*in situ*” y a ellos se le aplican los criterios de clasificación de recursos y reservas enunciados en dicha resolución.

Estas regulaciones (internacionales y nacionales) solo establecen las bases generales en cuanto a las clasificaciones, términos y definiciones; pero no explican los procedimientos a seguir durante la estimación de los recursos y reservas en cada tipo de mineralización.

La revisión y evaluación de los antecedentes declarados sobre la PRN en este capítulo, constituyen elementos que apoyan la necesidad de realizar una valoración del material contenido dentro de la misma, con el objetivo final de extraer los contenidos de níquel y cobalto de las menas limoníticas; usando el proceso actual HPAL de la planta Pedro Sotro Alba.

Entre las posibles representaciones de la estimación de los recursos se propone la elaboración de un modelo 3D, que permita caracterizar los contenidos de los elementos químicos útiles y nocivos. En el capítulo siguiente se exponen los métodos utilizados en la exploración, modelación y obtención del estimado de cada elemento químico dentro del modelo de bloques.

CAPÍTULO II. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL LIMONITICO.

Introducción

En la primera etapa de investigación se desarrolló la búsqueda y conciliación del basamento teórico sobre los yacimientos lateríticos, así como un análisis del estado del arte sobre la modelación 3D y geoquímica de materiales de rechazo en yacimientos lateríticos.

En la etapa experimental se procedió a obtener y procesar la información de la exploración geológica. El esquema simplificado de procesamiento de los datos utilizado se muestra en la figura siguiente:

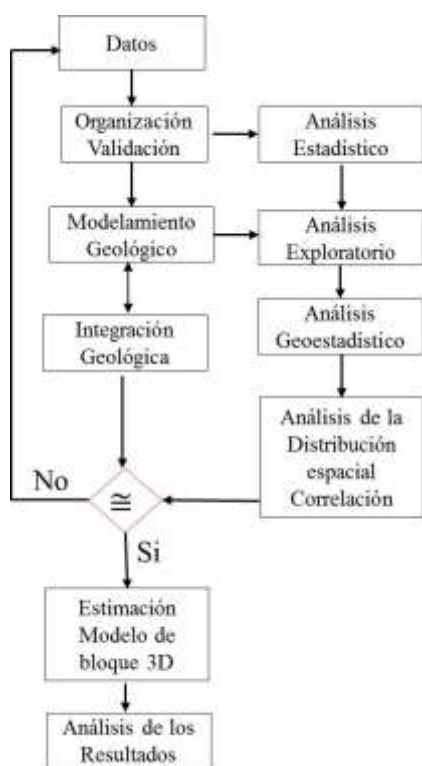


Figura 5. Diagrama teórico del desarrollo de la investigación para obtener el modelo 3D

El diagrama propuesto se corresponde con el análisis realizado desde la toma de los datos hasta la estimación y evaluación de los resultados. El procesamiento se realizó en dos etapas fundamentales, la primera evaluando e interpretando el objeto desde el punto de vista geológico, se procedió a integrar todos los resultados geólogo-geoquímico obtenidos.

La segunda etapa se trabajó de forma paralela, se procedió a obtener la interpretación estadística y geoestadística de los datos obtenidos. En cada variable estudiada se determinó el comportamiento espacial dentro de la presa.

Antes de proceder con la creación de los modelos 3D y la estimación de los recursos se evaluó la posible correspondencia entre la información geológica disponible y la modelación geoestadística. Es importante identificar las posibles relaciones que existe entre el modelo geológico y el comportamiento de los datos geoquímicos de cada variable estudiada, debe existir una correspondencia entre ambos para proseguir con la estimación, en caso contrario se deben revisar los datos iniciales.

Los resultados obtenidos fueron interpretados y correlacionados con la información geoquímica, partiendo de esta información se procedió a realizar la estimación y obtención del modelo 3D de los recursos de la PRN.

Métodos y técnicas empleados

Levantamiento topográfico y modelo digital del terreno

El levantamiento topográfico de superficie partió de las coordenadas Lambert, sistema Cuba Sur, utilizando las poligonales establecidas en el área para el control de la explotación. La escala utilizada para el modelo digital del terreno (MDT) de la superficie del terreno fue de 1:2000, en el área donde se encuentra depositado el material de rechazo. La marcación de los pozos proyectados en el campo se realizó por el método directo de replanteo, a partir de los vértices establecidos por la poligonometría. En los pozos perforados se realizó una segunda determinación de las coordenadas con el objetivo de precisar la ubicación final de perforación.

El procesamiento digital de los datos se realizó utilizando el software Leica Survey Office, los ficheros obtenidos en el trabajo de campo fueron descargados desde la estación total hacia a la computadora. Los ficheros resultantes de las mediciones se obtuvieron en formato GSI o IDX y fueron utilizados en la creación de la superficie topográfica x, y, z.

En la búsqueda de datos geodésicos del basamento del depósito no fue posible localizar referencia de levantamientos topográficos a escala de detalle, lo que provoca una incertidumbre en el conocimiento y precisión del basamento del depósito. El modelo digital

del terreno utilizado para establecer la base del área donde yace el material de la PRN fue obtenido a partir de la digitalización de las curvas de nivel de las planchetas topográfica 1:25 000. La base de datos obtenida permitió obtener una referencia de la ubicación espacial del basamento del depósito y del área de la cuenca.

Perforación y muestreo

El método de perforación empleado fue el de Hollow Auger Integral, con un intervalo de muestreo promedio de 1 metro. Este método consiste en una combinación de barrenas espirales con un tubo interior en forma de cubeta que posibilita la recuperación del testigo lo más natural posible y con la mínima contaminación de la muestra.

El avance del pozo en profundidad es facilitado por la espiral exterior, el tubo interior es hincado con una corona con el extremo inferior en forma de cuchilla. El diámetro exterior de perforación de la barrena es de 89 mm y el interior del tubo colector de la muestra es de 79 mm. El método es recomendable para materiales friables dado que posibilita una alta recuperación del testigo.

En los esquemas de tratamiento de muestras ordinarias de las exploraciones geológicas no se realiza separación por fracciones, solo en aquellos casos para pruebas especiales. En estas investigaciones se efectúa la molienda total de la muestra, procedimiento que se considera incorrecto para el proceso de lixiviación ácida a presión, dado que solo se procesan las fracciones menores que 0,85 mm en la obtención del níquel y cobalto.

Este hecho fue confirmado en pruebas ejecutadas con diferentes muestras del yacimiento Moa Oriental, donde se dividieron las muestras en dos, se realizaron las determinaciones analíticas completas, sin tamizar y tamizadas; obteniendo dos parejas de datos con altas diferencias, en dependencia del tipo de material analizado.

Las muestras obtenidas de las perforaciones de la presa fueron sometidas a un proceso de tamizado en forma de pulpa para obtener las fracciones menores que 0,85 mm, evitando la influencia de las fracciones mayores que 0.85 mm. Las pulpas limoníticas obtenidas fueron envasadas y luego enviadas a la casa de preparación de muestras. (Ver la Foto 4)

El color de las pulpas obtenidas fue diverso, pero en algunos casos se pudo identificar las pulpas saprolíticas, las cuales presentaron colores verdes a gris claro, como se observa en la Foto 4.



Foto 4. Muestras de pulpa de material limonítico, fracción menor que 0,85 mm

El esquema simplificado de preparación se muestra en la se muestra en la Figura 6. En la etapa de molienda se realizó el control de calidad de la granulometría, de cada siete muestras se seleccionó una para confirmar el tamaño de partículas requerido. Las muestras fueron conformadas en embarques acompañadas de un registro de control que con las especificaciones analíticas o ensayos requeridos.

Las muestras pulverizadas fueron enviadas al laboratorio Elio Trincado (DELABEL), localizado en la provincia de Santiago de Cuba, donde fueron recibidas en el área de control de calidad para la conformación de los lotes de análisis y el establecimiento de los números claves correspondientes. Los resultados analíticos fueron obtenidos en soporte magnético y luego fueron ordenados con la información geológica obtenida durante la exploración geológica.



Figura 6. Esquema resumido de preparación de muestras utilizado en la PRN

Técnicas analíticas empleadas

Entre las técnicas analíticas utilizadas está la espectrometría de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado (ICP-AES) para las determinaciones de Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , Cr_2O_3 , MnO , NiO , CoO , CaO y Fe_2O_3 . La espectroscopia de absorción atómica (EAA) fue usada para la determinación de Fe, Ni, Co, Si, Al y Mg relacionados con componentes amorfos. Las determinaciones de Na_2O y K_2O se realizaron con Fotometría de emisión de llama y la determinación de FeO por el método volumétrico con dicromato de potasio (ISCL -315:00). La colorimetría fue usada para los compuestos de FeO- Cr_2O_3 , TiO_2 y sílice residual.

Métodos mineralógicos

Los resultados del estudio de la composición química, granulométrica y mineralógica del material de rechazo estuvo orientado a evaluar la existencia de menas limoníticas que pudieran ser re-procesadas por la planta metalúrgica.

El análisis mineralógico óptico fue realizado por los especialistas de la empresa Geominera, utilizando el microscopio estereoscópico binocular (marca MBC-10 fabricado en URSS) y

un microscopio de luz polarizada (marca NIKON) para la determinación semi-cuantitativa de las fases minerales. Además fueron utilizadas las técnicas analíticas mencionadas anteriormente para determinar la composición química de las muestras.

Método Geofísico

Los estudios geofísicos se proyectaron con el objetivo de estudiar los espesores de sedimentos depositados, determinar la profundidad del nivel freático y evaluar la posibilidad de identificar un contraste en las propiedades geoelectricas de las diferentes granulometrías presentes. En la investigación se utilizó el método geofísico de Sondeo Eléctrico Vertical de Polarización Inducida (SEV-PI).

Las investigaciones geofísicas fueron ejecutadas por los especialistas de Geominera Oriente. El equipo utilizado fue un Georesistivímetro marca SARIS (Scintrex Automated Resistivity Imaging System), de la firma SCINTREX LIMITED proveniente de Canadá. La interpretación cuantitativa de los resultados se realizó utilizando el software RESIXP IP, de la firma INTREPEX LIMITED, Colorado, USA.

El método consiste en introducir corriente en el terreno y medir el voltaje producido por la misma en punto determinado de la superficie. A partir del valor de la corriente introducida y del voltaje medido, puede obtenerse la resistividad de objetos o zonas del subsuelo. La esencia del método consiste en determinar la diferencia del potencial que se produce entre dos puntos ubicados en la superficie del terreno (Arlandi-Rodríguez, 2002).

La configuración utilizada para las determinaciones de campo en la variante SEV-PI, fue del tipo Schlumberger, con distancia máxima AB de 200 m.

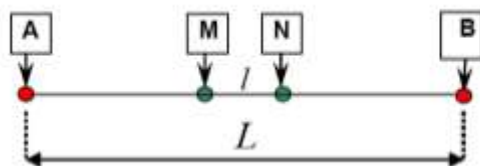


Figura 7. Esquema de ubicación de los electrodos de corriente en relación a los de potencial, tipo Schlumberger, (Notación internacional de electrodos más empleada, Geoconsult)

La operación del equipo se ajustó a las recomendaciones de su manual. Los parámetros de medición se comportaron dentro de los límites normales. Las condiciones de toma a tierra fueron satisfactorias.

Los sondeos de resistividad eléctrica usan la electricidad que es inyectada en el subsuelo, la que permite conocer las características de resistividad que presentan los materiales y rocas.

El método consiste en introducir corriente en el terreno a partir de un dispositivo de cuatro electrodos AMNB. Normalmente se considera que la conducción de la intensidad de corriente en el subsuelo es de manera iónica por esta razón la resistividad aparente obtenida con este dispositivo dependerá de la distribución de las rocas, de diferentes resistividades en el semiespacio debajo de la superficie terrestre, así como del grado de saturación, fracturación, porosidad entre otras condiciones físico químicas de éstas y de la posición mutua de los electrodos de alimentación y medición.

Si se mantiene fijo el punto central y se abre sucesivamente la distancia entre los electrodos AB, la corriente eléctrica atravesará cada vez a mayor profundidad. Los sucesivos valores de resistividad (ρ_a) que se van obteniendo corresponden a profundidades cada vez mayores. Se medirá entonces la diferencia del potencial que se produce entre los dos puntos ubicados en la superficie del terreno (Arlandi-Rodríguez, 2002).

El fenómeno de la polarización inducida se observa cuando se hace pasar corriente eléctrica a través de un electrolito que contiene cuerpos o partículas de conducción electrónica, metales, semiconductores o minerales. Los sistemas cargan el subsuelo por los electrodos de corriente durante un tiempo, y reciben la respuesta con un tiempo mayor, por los electrodos de potencial. El paso de la corriente polariza los materiales conductores y de este modo se localizan y modelizan los cuerpos investigados.

Modelación de yacimientos minerales sólidos en 3D

En las últimas décadas ha existido un gran desarrollo en los software para la modelación de los distintos tipos de yacimientos, incluyendo los yacimientos lateríticos, no obstante muchos autores coinciden en la importancia que reviste el conocimiento geológico durante este proceso de modelación (David, 1977; José Quintín Cuador-Gil, 2002; Martínez-Vargas, 2006).

La modelación e interpretación de un yacimiento consiste en establecer las continuidades, distribución, límites y el grado del metal o minerales de interés, donde se establece la zona o cuerpo discreto. El principio básico para una buena interpretación es conocer y usar al máximo el conocimiento geológico para establecer la continuidad geológica de los minerales o metales de interés (David, 1977).

El conocimiento geológico debe complementarse con los sistemas computarizados que han permitido programar de una forma efectiva la mayoría de los procesos de modelación. En las investigaciones geológicas se emplean diferente software, como por ejemplo el Gemcom, Datamine, Vulcan, Surpac, Solmine, Micromine e Isatis, los cuales constituyen herramientas que facilitan el proceso de interpretación geológica.

La calidad de los resultados depende del nivel de detalle y precisión de los datos, acorde a cada etapa de investigación. Entre los productos finales de los programas están los modelos creados para la exploración y explotación.

Los modelos se han agrupado en tres grupos de principales, (Martínez-Vargas, 2006), los cuales se describen a continuación:

Modelo geólogo-genético: el modelo genético recoge toda la información geológica relacionada con el yacimiento objeto de estudio a partir de datos experimentales o inferidos; para ello resulta útil establecer los procesos de evolución del depósito y la reconstrucción de los sucesos a partir de criterios estratigráficos, mineralógicos, geoquímicos, petrológicos, tectónicos, entre otros; para su confección se debe tener en cuenta la mayor cantidad posible de parámetros que permitan modelar de forma efectiva cada variable.

El objetivo de este modelo es hacer un uso máximo de la geología durante la modelación matemática de los contenidos de los elementos químicos y definir qué cualidades geológicas deben reflejar los modelos resultantes.

Modelo descriptivo: el modelo geométrico tiene como objetivo separar el depósito mineral de las rocas, de forma tal que los límites espaciales de cada zona constituyan campos geométricos, donde las variables caractericen poblaciones estadísticamente homogéneas; en cuanto a su representación pueden ser:

- a) Límites físicos o explícitos: definidos fundamentalmente a partir de superficies o sólidos
- b) Límites matemáticos o implícitos: no tienen una representación física clara, están definidos por dominios, criterios específicos aplicados a determinada variable regionalizada.

En la determinación de los límites físicos se emplean criterios geológicos y geofísicos, donde juegan un papel importante la cartografía y los resultados de la perforación; los sólidos y superficies se modelan de forma manual o empleando interpoladores matemáticos.

Estas superficies pueden ser delimitadas con más precisión mediante el uso de métodos geofísicos auxiliares, como el Georadar y el sondeo eléctrico vertical con polarización inducida (SEV-PI); combinados con técnicas geoestadísticas Kriging con drift y coKriging, como los propuestos por (Martínez-Vargas, 2006).

En las futuras investigaciones se recomienda la utilización del método de Georadar con líneas equidistantes en dos direcciones, permitirá obtener la rugosidad del fondo en los pozos de forma cruzada en dos orientaciones principales.

Modelo de bloques: se define como el conjunto de soportes de volumen (V), sobre el cual se estiman o simulan las variables regionalizadas. Los tipos de modelos más utilizados se mencionan seguidamente:

- ✓ Modelo de paneles: generalmente representado en dos dimensiones, es regular y frecuentemente cada panel contiene varias unidades de selectividad minera; similar a este existe el grid o seam model (Gemcom®, 1999 y Lynx Mining Systems®, 1998, Surpac®, 2014); formado por paneles tridimensionales e irregulares solo en una de las tres dimensiones
- ✓ Modelo de bloques clásico: con figuras regulares de igual forma, orientación y tamaño, las que coinciden con la unidad de selectividad minera básica, (Lynx Mining Systems®, 1998)
- ✓ Modelo de bloques irregulares o poligonales (Lynx Mining Systems®, 1998, Vulcan®, 2010)
- ✓ Modelo con soporte puntual (Isatis®, 2014)

En los yacimientos de menas lateritas de níquel y cobalto los más empleados son el modelo de paneles, definido como el área de influencia de pozos de la red espaciada a 33,33 m y 35 m, y el modelo de bloques clásico. El tamaño del soporte está en correspondencia con las características propias del yacimiento y los criterios minero-técnicos, en los yacimientos lateríticos se han usado varios soportes, 8,33 x 8,33 x 3,0 m, 8,33 x 8,33 x 2,0 m, 25 x 25 x 2 m y 16,66 x 16,66 x 2,0 m para redes de exploración, para recursos en categoría de medidos e indicados, (Urrea-Abaira, et al., 2012; Figueras-Serrano, et al., 2014).

El modelo puntual es empleado para obtener superficies o puntos de discretización de las unidades de selectividad minera.

Métodos de regularización de la base de datos

En la literatura se reconocen tres tipos de compósitos para regularizar los datos de las exploraciones:

Compósito de banco (bench composite): las muestras se regularizan a intervalos que coinciden con la altura de los bancos o una fracción de esta. Se emplea para modelar los recursos de yacimientos grandes, diseminado de baja ley que se explotan con minería a cielo abierto.

Compósito de pozo (downhole composite): las muestras se combinan a intervalos regulares comenzando desde el inicio del pozo.

Compósito geológico (geological composite): las muestras se combinan a intervalos regulares pero respetando los contactos geológicos. Este método se emplea para prevenir la dilución del compósito en el contacto estéril-mineral y donde se logra mayor control sobre el proceso de regularización.

El empleo de compósito de banco o de pozo causa una distorsión de la distribución de los contenidos de cada intervalo, esto puede adicionar contenidos de baja ley a la zona mineral o contenidos de alta ley a la zona de estéril.

La longitud de regularización se realiza por diferentes autores de forma empírica, observando generalmente las reglas siguientes: el tamaño del compósito se selecciona entre la longitud media de las muestras y el tamaño del banco. En el estudio de los cuerpos en los que su análisis se hace en forma bidimensional, es necesario computar por pozos una media

ponderada de los valores de todas las variables de interés de forma tal que abarque todas las muestras positivas del intervalo analizado. Es conveniente no regularizar muestras grandes en intervalos más pequeños, pues se introduce una idea aparente de la continuidad espacial, (Ruíz-Dioses, 2014).

Método geoestadístico

En el momento de seleccionar un método geoestadístico la exactitud de la estimación depende en gran medida del comportamiento de los datos estudiados y de la estrategia de búsqueda empleada en la estimación y la simulación.

Ahora bien, en cuanto a los métodos geoestadísticos de estimación se ha determinado que el Kriging es el método de estimación que proporciona el “valor más probable” de un atributo en un punto no experimental, (Pérez-Melo, 2003). Es un estimador ELIO (Estimador Lineal, Inssegado y Óptimo).

Este método proporciona el mapa de errores relativos de estimación, aspecto de mucho interés en la etapa de categorización de los recursos y de la futura planificación minera. Los resultados de la estimación, utilizando este método, debe interpretarse como la “imagen” más probable de la distribución espacial de la variable estudiada. (Chica-Olmo, et al., 2003)

Existen varios métodos de Kriging los cuales se han adecuado para las diversas situaciones que se generan durante la estimación: Kriging Ordinario, Kriging Simple, Kriging Universal, Kriging Disyuntivo, Kriging de Indicatrices. Estas variantes pueden ofrecer buenos resultados cuando existen poblaciones de datos con alta asimetría.

El Kriging Disyuntivo y el de Indicatrices están diseñados para obtener la distribución de probabilidades cumulativas de la variable en un soporte determinado. El conjunto de todos estos métodos se conoce como la Geoestadística no Lineal, (Pérez-Melo, 2003).

En la solución de tareas muy diversas se emplean varios tipos de Kriging, en dependencia de problemas a resolver y de las características del objeto, (Geovariance Ltd., 2014). Entre los que se encuentran:

Kriging puntual: es aquel donde se estima el valor de la variable regionalizada en un punto que se considera en la estimación.

Kriging de bloque: es análogo al Kriging puntual, con la diferencia de que el valor se estima para un bloque y no para un punto. La estimación es simple y se basa en la determinación del valor medio del variograma entre el bloque a estimar y cada punto de los datos, tomados en la práctica mediante un número de puntos de discretización distribuidos regularmente en el bloque.

Los datos originales en la estimación se utilizan cuando el comportamiento de los datos procesados muestren características de estacionaridad evidentes, existiendo las variantes: Kriging simple y Kriging Ordinario, los cuales pueden ser implementados de forma puntual o de bloque.

En el caso que los datos originales presenten comportamientos asimétricos, de modo que no se revelan característica de estacionaridad evidentes, se hace necesario realizar transformaciones en los datos con el objetivo de obtener distribuciones simétricas y entonces utilizar el Kriging sobre los datos transformados; y finalmente devolver las estimaciones a través de la transformación inversa.

La simulación es otro método geoestadístico que permite (n) realizaciones aleatorias para un mismo punto, cuya desviación estándar está influenciada por el variograma y los datos circundantes. Las simulaciones tratan de reflejar la variabilidad del yacimiento, eliminando el clásico efecto de suavizado del Kriging.

En la solución de los objetivos se ha comprobado que la aplicación del método de Kriging ordinario de bloque garantiza la calidad de las estimaciones en los yacimientos lateríticos para las diferentes variables, (José Quintín Cuador-Gil, 2002; Figueras-Serrano, et al., 2014).

La aplicación de los métodos de Kriging en función de la estructura del estimador (Geoestadística Lineal y no Lineal), dependen del comportamiento de los datos y de la estrategia de búsqueda empleada en la estimación. Los datos obtenidos presentan estacionaridad y un espaciamiento que garantiza una correlación espacial entre los mismos, justificando la aplicación de la Geoestadística Lineal.

En cuanto a los métodos geoestadísticos de estimación se determinó usar el Kriging de bloques. Este método de estimación proporciona el “valor más probable” de un atributo en

un punto no experimental. El método de Kriging se caracteriza por ser el mejor estimador lineal insesgado; los factores de ponderación se determinan de forma tal que la varianza de estimación es mínima; lineal porque es una combinación lineal de la información; insesgado porque la esperanza matemática del error es nulo (considerando como error la diferencia entre el error real y el estimado). Este método es el más empleado en yacimientos lateríticos.

CAPÍTULO III. MODELACION 3D DEL MATERIAL LIMONÍTICO EN LA PRN

Introducción

En la modelación de un yacimiento se hace necesario conocer las características geológicas y geoquímicas, de forma que se pueda establecer el estudio del comportamiento espacial de las diferentes variables.

Las bases de datos y superficies topográficas deben poseer la calidad necesaria para ser incluidas en los procesos de creación de modelos 3D. En relación con la información obtenida PRN se realizó un análisis detallado de las características del material de rechazo, el cual permitió establecer las bases para el estudio geoestadístico y de estimación.

Los resultados de las exploraciones ejecutadas en la PRN revelan que existen menas de níquel y cobalto con fracción menor que 0,85 mm, cuyos espesores fluctúan entre 0,5 y 45 m, con un comportamiento geoquímico homogéneo en los diferentes horizontes.

El procedimiento desarrollado en el siguiente Acápite permitió la confección del modelo de bloques en 3D, con los valores de los contenidos de los elementos útiles y nocivos: Fe, Ni, Co, Al, Mg, Mn, SiO₂, así como el estimado de material útil.

Generalidades del material de la PRN

El material que conforma la PRN, según se ha explicado anteriormente, proviene del rechazo industrial de los yacimientos Atlantic, Zona Sur, Zona Pronóstico, Zona A y en menor medida Moa Oriental, ver Figura 8. La explotación de estos depósitos estuvo dirigida a extraer las menas lateríticas de balance (LB) identificadas en los yacimientos, pero no todas fueron recuperadas de forma eficiente por la PP.

La mena LB se encuentra en contacto o mezclada con otras menas, como la laterita ferruginosa (LF) y la serpentina de balance (SB), lo que imposibilita la explotación selectiva de la mena LB y por tanto, durante la explotación estas menas son incluidas en determinadas proporciones.



Figura 8. Esquema Ubicación de los yacimientos en relación a la PRN

En los diagramas de tres componentes de la Figura 9, se muestran en puntos rojos los contenidos de hierro, níquel y cobalto del rechazo, calculados en la exploración geológica, en relación a los contenidos de los yacimientos que participaron en la conformación de la PRN, los cuales se representan en diferentes colores.

Los contenidos de Ni, Fe y Co en el material de rechazo, se corresponde con las determinaciones de la fracción menor que 0,85 mm del material limonítico, mientras que los datos para estos tres elementos en los yacimientos incluyen todas las fracciones, dado que en las exploraciones pretéritas no se realizó una separación granulométrica por fracciones a las muestras.

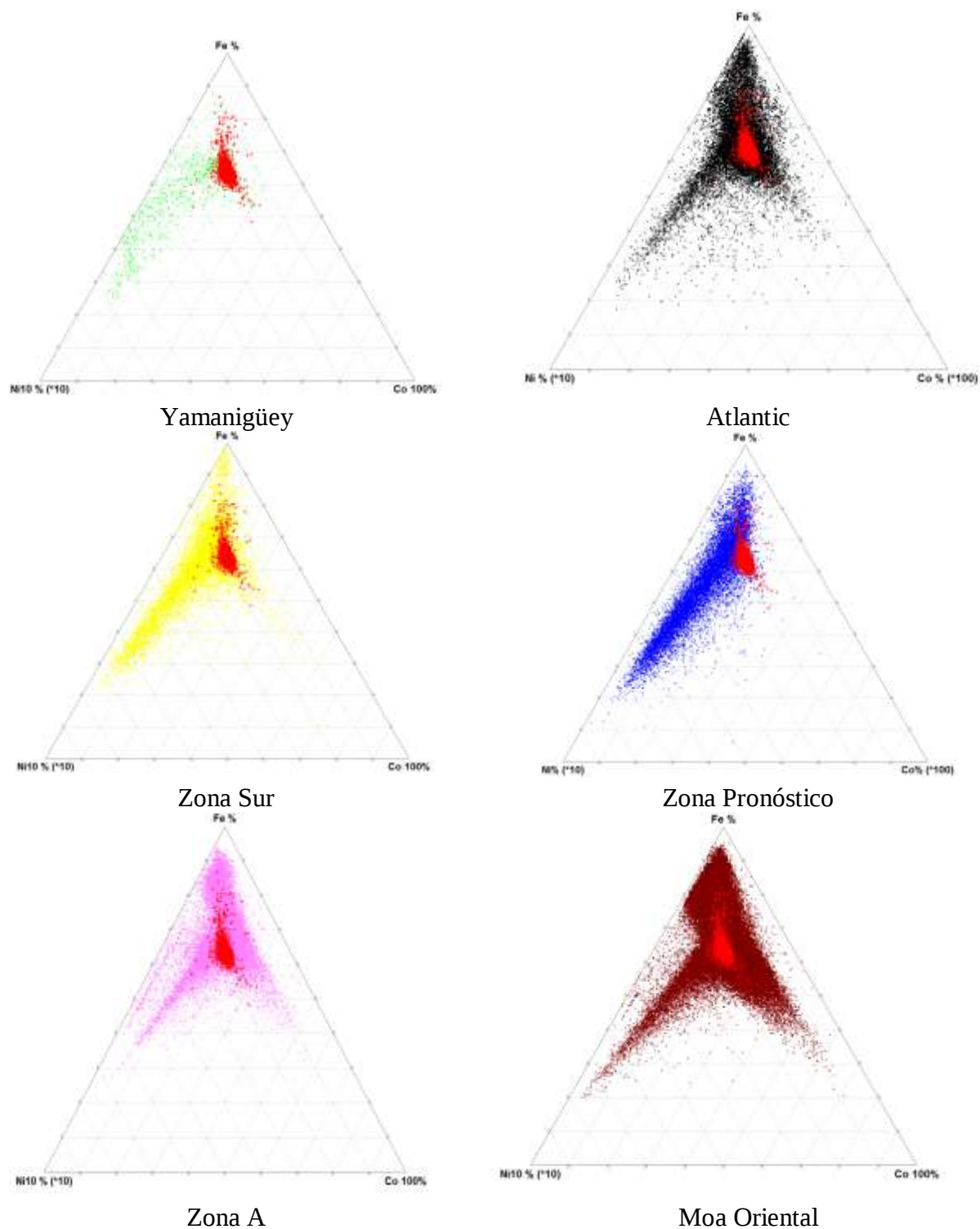


Figura 9. Distribución de los contenidos de Fe, Ni y Co de la PRN vs yacimientos que aportaron el material
(Cada vértice del triángulo representa el 100 % del elemento representado)

✗ Contenidos de hierro, níquel y cobalto de la PRN

Los valores de los elementos de la PRN se distribuyen en la parte superior del triángulo, mostrando un comportamiento similar a los yacimientos que aportaron el rechazo. En el muestreo del rechazo realizado durante las exploraciones, se ha podido identificar en las fracciones menores que 0,85 mm contenidos útiles de níquel y cobalto que pueden ser considerados mena, que no fueron enviadas a la planta de espesadores de pulpa.

Estas fracciones se hacen más evidentes cuando la planta trabaja a altas capacidades y se prolongan los períodos de mantenimientos planificados, provocando que el proceso de beneficio no sea eficiente.

El comportamiento de las menas lateríticas en el proceso de lavado es muy variable, algunas menas requieren de mayor tiempo de lavado que otras, aspecto que no se tiene en cuenta durante la operación de la planta dado que responden a una demanda de producción. Las menas con alto contenido de humedad tienen a formar aglomeraciones cuando se le aplica agua a presión y son rechazadas por las zarandas primarias y secundarias.

Caracterización del material acumulado en la PRN

El material de rechazo se acumula de forma progresiva en la presa, por lo que no se puede hablar de horizontes meníferos que permitan caracterizar este depósito como si fuera una corteza *in situ*. Al mismo tiempo, el rechazo no guarda relación directa con el sustrato rocoso, aunque mantiene cierto vínculo con el marco geológico del área, en este caso con las rocas presentes en la asociación ofiolítica.

A pesar de no constituir un yacimiento laterítico por su génesis, en este depósito se aplicó la clasificación de tipos de perfiles propuesta por (Lavaut-Copa, et al., 2003); partiendo de la base de las descripciones geológicas de las muestras tomadas durante la perforación.

Esos resultados indicaron el predominio del perfil laterítico estructural incompleto y completo y laterítico-saprolítico estructural incompleto. El análisis global de esta clasificación revela que está mejor representado el componente laterítico en toda la presa (74 %) y en menor medida el laterítico-saprolítico (26 %). La representatividad de cada tipo de perfil para la PRN se expone en la Tabla 5.

Tabla 5. Tipos de perfiles de corteza presentes en la PRN, aplicando la clasificación de Lavaut-Copa, 2003

Tipo de perfil		% de Distribución
1	Laterítico inestructural completo	23,4
2	Laterítico inestructural incompleto	32,5
3	Laterítico estructural completo	5,2
4	Laterítico estructural incompleto	13
5	Laterítico saprolítico estructural completo	-
6	Laterítico saprolítico estructural incompleto	26
7	Saprolítico estructural completo	-
8	Saprolítico estructural incompleto	-
		100
Tipo de perfil global		% de Distribución
Laterítico		74
Laterítico-Saprolítico		26
Saprolítico		-
		100

En cuanto a las características generales del rechazo, su espesor promedio es de 22,7 m, fluctuando entre 0,5 y 45 m. En las descripciones macroscópicas se determinó que el 74 % de las muestras se encuentran ocres inestructurales con abundantes concreciones de hierro y pequeños fragmentos de rocas mezclados con una matriz limonítica. El 23 % de las muestras se caracteriza como ocres estructurales.

El comportamiento geoquímico del rechazo es bastante homogéneo en los diferentes horizontes lateríticos identificados en cada pozo, excepto en el horizonte de ocres estructurales iniciales, donde existe una disminución significativa del contenido de hierro y níquel, como se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Promedio de la composición química por tipo de horizonte identificado en la PRN

Horizonte		%							
		Ni	Fe	Co	SiO ₂	Al	Cr	Mg	Mn
Ocres inestructurales con perdigones	1	1,22	43,4	0,121	6,2	5,6	1,6	1,60	0,8
Ocres inestructurales sin perdigones	2	1,16	42,8	0,120	6,5	5,8	1,6	1,59	0,8
Ocres estructurales finales	3	1,20	44,2	0,121	5,8	5,5	1,6	1,42	0,8
Ocres estructurales iniciales	4	0,90	29,9	0,067	21,1	5,7	1,0	5,49	0,4

El resultado mostrado en la tabla anterior indica que, exceptuando los ocre estructurales iniciales, los horizontes caracterizados durante el muestreo se pueden clasificar como meníferos, dado los altos contenidos de níquel y cobalto. No obstante, debe destacarse que las fracciones mayores que 0,85 mm, como concreciones y fragmentos de serpentina, aparecen mezclados con las fracciones menores que 0,85 mm en todo el perfil.

Los promedios de los intervalos de níquel y cobalto (Ni+Co) de la Figura 10 fueron calculados cada dos metros en profundidad, con el objetivo de permitir la representación gráfica. En los diferentes intervalos de los pozos existe una tendencia a incrementarse en la medida que se profundiza, excepto en los intervalos 19 hasta el 21 m donde están por debajo de 1,15 %, estos intervalos se corresponden con la profundidad de 38 a 42 m.

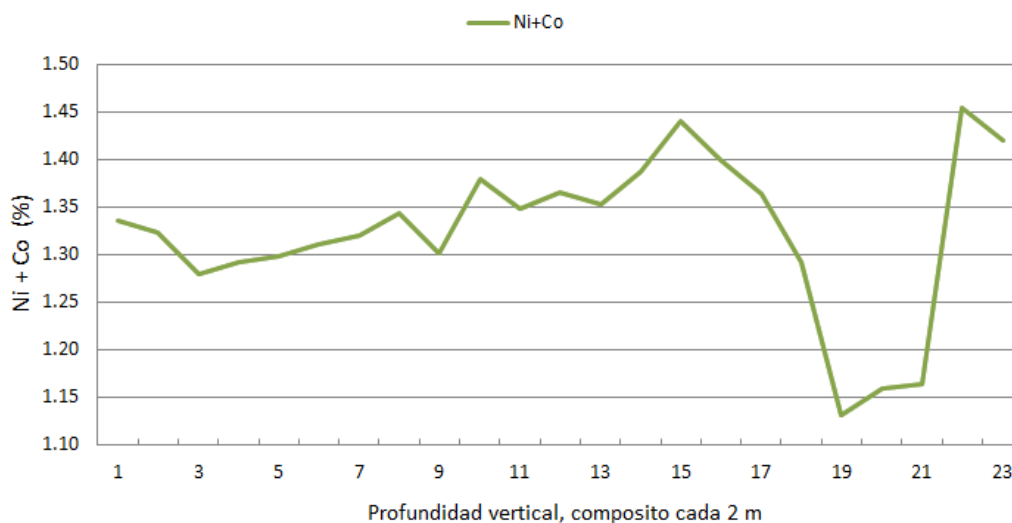


Figura 10. Distribución del contenido de Ni+Co en la profundidad vertical, horizontes cada 2 m

En la Figura 11 se muestra el diagrama ternario Mg, SiO₂ y Al del rechazo, donde se puede observar que el mayor por ciento de muestras se agrupan entre los vértices de la SiO₂ y Al, indicando un predominio de estos elementos en relación a los contenidos de magnesio.

Se puede observar que algunas muestras tienden al vértice del Al, reflejando la influencia de cortezas a partir del gabro, lo que puede estar relacionado con el yacimiento Zona Sur, donde fueron identificados diques de gabro durante la explotación.

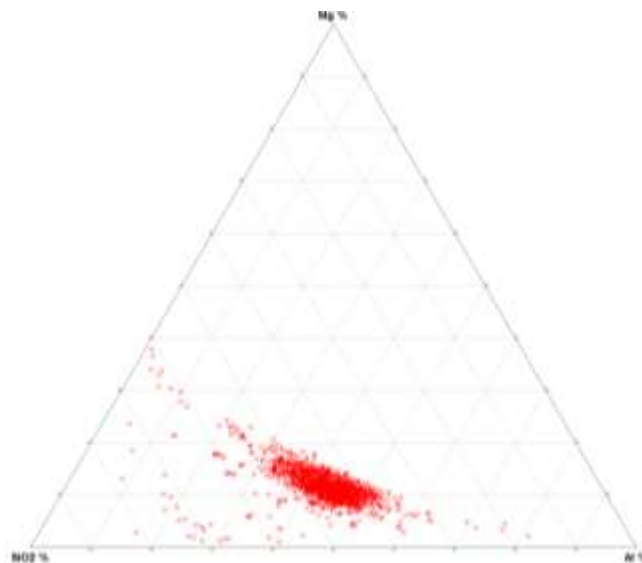


Figura 11. Diagrama ternario con la distribución de Fe-Cr-Al del rechazo
(Cada vértice del triángulo representa el 100 % del elemento representado)

Los contenidos de magnesio en todos los intervalos de profundidad de la presa presentan un promedio de 1,68 %, en relación con los contenidos de las menas explotadas; estas últimas con valores de magnesio inferiores a 1 % como promedio. Al parecer durante el proceso de preparación de pulpa existe un beneficio de este elemento químico incrementando su concentración en la fracción menor que 0,85 mm, aspecto este que debe ser estudiado en mayor detalle.

El comportamiento de los elementos químicos, según diferentes intervalos de profundidad de la PRN (Ver Tabla 7), evidencia que existe una tendencia a disminuir el contenido de hierro en los intervalos desde 38 - 42 m, así como un incremento de los contenidos de sílice en este mismo intervalo. Los datos fueron promediados en intervalos de dos metros para mostrar el comportamiento en profundidad.

Tabla 7. Elementos químicos (% en peso) por intervalos de profundidad de la PRN

Intervalos m		%							
		Ni	Fe	Co	SiO ₂	Al	Cr	Mg	Mn
0	2	1,22	45,0	0,121	5,5	5,1	1,7	1,4	0,8
2	4	1,21	44,5	0,118	5,9	5,1	1,6	1,6	0,8
4	6	1,16	42,7	0,116	7,0	5,4	1,6	2,0	0,7
6	8	1,18	42,8	0,116	6,6	5,6	1,6	1,8	0,7
8	10	1,18	43,0	0,117	6,3	5,8	1,6	1,7	0,8
10	12	1,20	42,7	0,117	6,6	5,8	1,6	1,7	0,8
12	14	1,20	42,6	0,121	6,6	5,9	1,6	1,6	0,8
14	16	1,22	43,0	0,126	6,3	5,9	1,6	1,6	0,8
16	18	1,18	42,0	0,123	7,4	6,0	1,6	1,7	0,8
18	20	1,25	43,1	0,127	6,1	5,7	1,6	1,7	0,8
20	22	1,23	43,3	0,121	6,2	5,7	1,6	1,7	0,8
22	24	1,24	43,0	0,122	6,2	5,7	1,6	1,7	0,8
24	26	1,23	41,9	0,123	7,2	6,1	1,6	1,7	0,8
26	28	1,27	41,4	0,121	7,7	6,0	1,6	1,9	0,8
28	30	1,32	41,9	0,125	6,9	6,0	1,6	1,9	0,8
30	32	1,28	40,9	0,118	8,4	6,0	1,6	2,2	0,8
32	34	1,25	42,3	0,115	7,3	5,9	1,6	1,7	0,7
34	36	1,18	42,3	0,113	7,9	6,0	1,6	1,6	0,7
36	38	1,03	39,3	0,098	10,1	7,3	1,5	1,6	0,7
38	40	1,06	38,4	0,096	11,5	6,7	1,4	2,3	0,6
40	42	1,05	44,7	0,111	5,0	6,3	1,7	0,9	0,7
42	44	1,35	41,5	0,107	9,2	4,8	1,6	2,7	0,6
44	46	1,29	44,4	0,131	5,0	5,1	1,7	1,2	0,8

En relación al contenido de aluminio, presenta un ligero incremento, a partir de los intervalos 24 hasta el 42, en relación a la media histórica de los yacimientos (<5 %). El resto de los intervalos están muy próximos a 6 % en la mayoría de los intervalos.

En la Figura 12 se muestra el diagrama ternario SiO₂-MgO₂-F₂O₃ para la presa nueva (izquierda) comparado con la presa vieja (derecha), donde se muestran los valores dentro del círculo rojo indicando la posible presencia de detritos finos de rocas, los datos identificados con el color azul indican la presencia de sílice mezclada con materiales saprolíticos, localizados en el fondo de los pozos perforados. En puntos rojos se muestran los valores más predominantes, como se puede observar existe una tendencia a valores elevados de hierro y con mayor contenido de sílice en relación al contenido de magnesio.

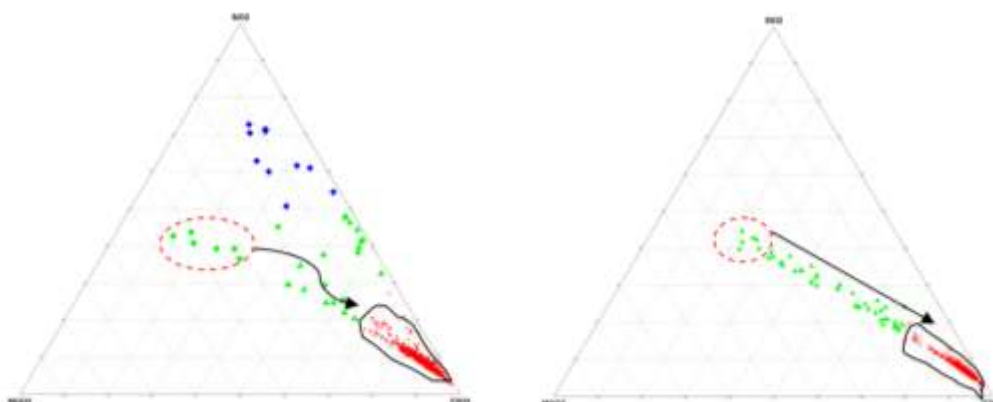


Figura 12. Diagrama ternario $\text{SiO}_2\text{-MgO}_2\text{-F}_2\text{O}_3$ del rechazo, izquierda: Presa Nueva, derecha: presa vieja (Cada vértice del triángulo representa el 100 % del elemento representado)

+ ◆ Sílice mezclada con material saprolítico ▲ Detrito fino de roca + Valor predominante

En la presa vieja el comportamiento en la distribución de los componentes es en forma lineal desde los detritos de rocas hasta los materiales limoníticos-saprolíticos, este último más representativo. Esta tendencia lineal debe estar relacionada con una homogeneidad de las menas en los primeros yacimientos explotados. En la PRN se muestra una mayor heterogeneidad, confirmado por la alta variabilidad que presentan los nuevos yacimientos en explotación.

Características mineralógicas del material de rechazo de la PRN

En total el estudio mineralógico se basó en el resultado de 8 muestras distribuidas dentro del depósito. Las muestras tomadas representan diferentes horizontes de la presa ubicados en casi toda el área de la misma. Los horizontes de la corteza representados van desde los ocre inestructurales con concreciones de hierro hasta la serpentinita desintegrada.

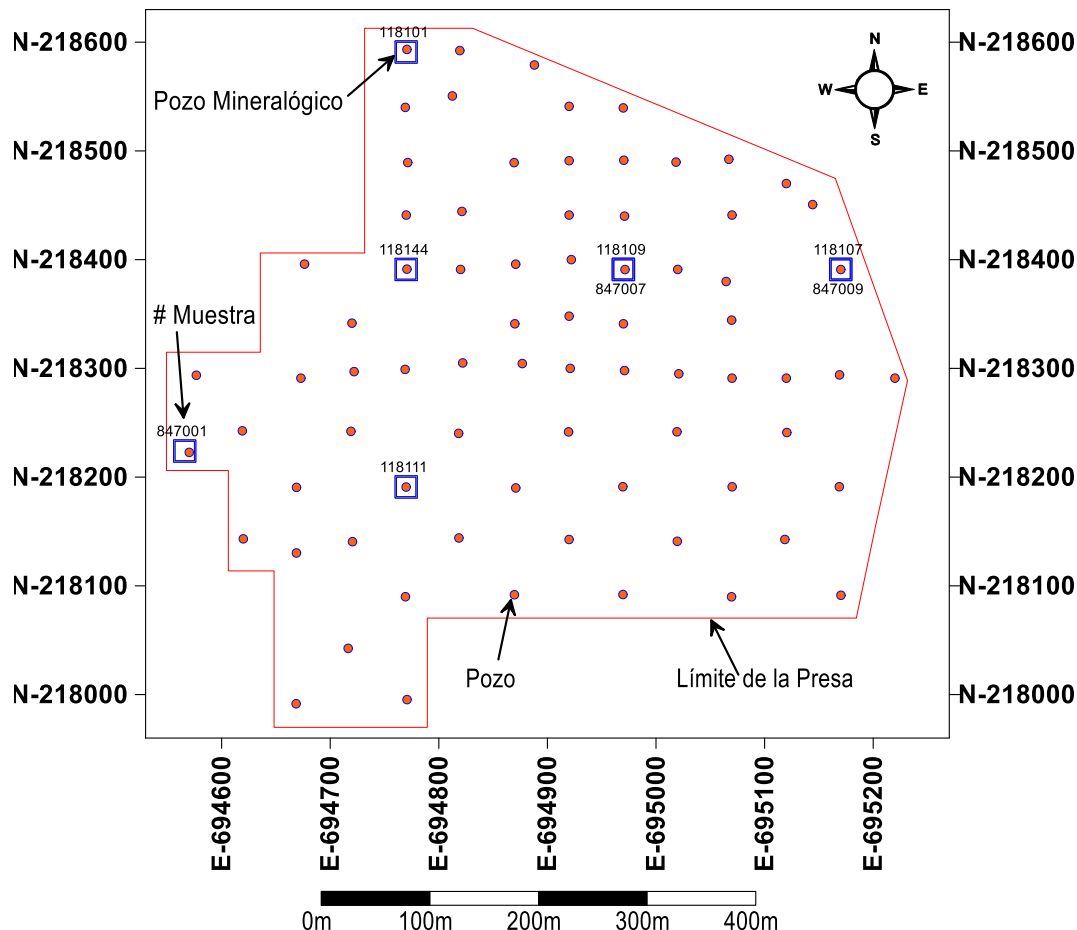


Figura 13. Distribución de los pozos mineralógicos en la PRN

Las fases mineralógicas se encuentran distribuidas en varias fracciones granulométricas, con predominio de la fracción menor que 0,85 mm. Las determinaciones semicuantitativas permitieron determinar que la fase mineralógica principal la constituye la goethítica, que representa el 66 % de los minerales presentes en el depósito; en menor proporción aparecen la gibbsita con 14 %, los minerales arcillosos con el 7 % y minerales del grupo de la serpentina con el 5 %. El resto, está compuesto por hematita, magnetita, cuarzo y concreciones de hierro, ver Tabla 8.

Tabla 8. Resultado del análisis mineralógico semicuantativo de la PRN

Muestra	Minerales en %							
	Goethita	Gibbsita	Min. Arcillosos	Min. Serpent	Hematita	Cuarzo	Cromita	Min. Magnéticos
118101	64	15	5	5	6	1	3	1
118107	73	12	5	4	1	1	3	1
118109	74	12	5	4	0	1	3	1
118111	69	12	6	5	3	1	3	1
118144	67	16	5	6	1	1	3	1
847001	51	16	14	4	10	2	2	1
847007	70	13	6	5	1	1	3	1
847009	57	13	8	10	7	1	3	1
Media	66	14	7	5	4	1	3	1

Mineral	Fórmula química
Goethita	$\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$
Hematita	$\alpha\text{-Fe}^{2+}\text{O}_3$
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$
Cuarzo	$\alpha\text{-SiO}_2$
Magnetita	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$
Cromita	$\text{Fe}^{2+}\text{Cr}^{2+}\text{O}_4$

Las mayores concentraciones de goethita, gibbsita y minerales arcillosos se localizan hacia la parte oeste del depósito (muestras 847001, 118101 y 118144), donde se concentran las fracciones menores que 0.85 mm, lo cual puede explicarse por la disminución gradual de la pendiente de la superficie de la presa de este a oeste, facilitando que las aguas provenientes de la planta de pulpa o producto del escurrimiento superficial transporten esas fracciones menores que 0,85 mm en forma de suspensión hasta sedimentarlas en el norte y este de la presa.

En la Tabla 9 se muestra la composición mineralógica de la presa de rechazo vieja. Se puede apreciar que existe una correspondencia entre los minerales presentes en ambas presas, a pesar de que proceden de diferentes yacimientos.

Tabla 9. Resultado del análisis mineralógico semicuantativo, presa de rechazo vieja

Muestra	Minerales en %						Cromita	Mín. Magnéticos
	Goethita	Gibbsita	Min. Arcillosos	Min. Serpent	Hematita	Cuarzo		
794103	63	12	7	8	5	0,42	3	1
794111	67	15	9	4	0,48	1	3	1
794118	65	14	6	6	3	1	3	1
794123	66	14	7	7	1	1	3	1
794126	62	14	6	7	3	2	3	1
794128	61	10	9	16	0	1	3	1
794135	61	14	7	9	4	1	3	1
847012	72	12	6	3	3	0,36	2	1
Media	65	13	7	7	2	1	3	1

En el diagrama ternario $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, ver Figura 14, obtenido a partir de los resultados del análisis químico mineralógico de las muestras tomadas en los pozos de exploración, se puede observar una tendencia al incremento del contenido de aluminio, el que está representado por cruces de color verde, influenciado por la presencia de corteza a partir de gabros que aparecen en los distintos yacimientos explotados, como son los diques identificados en yacimiento Zona Sur.

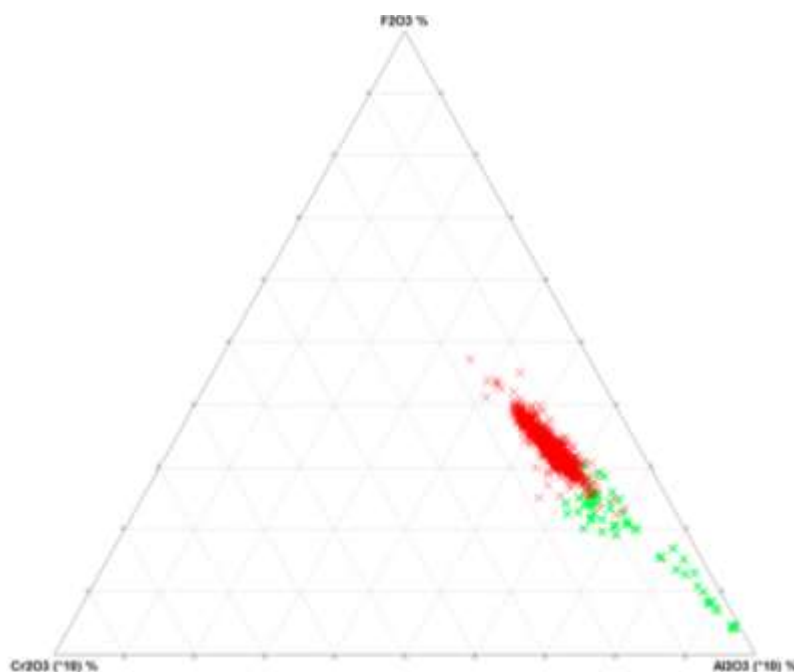


Figura 14 Diagrama ternario $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ de las muestras de la exploración geológica (Cada vértice del triángulo representa el 100 % del elemento representado)

✕ Contenidos de Al_2O_3 con valores superiores a 13 %

En los resultados analíticos mineralógicos mostrados en la Tabla 10, se puede observar que el contenido de Al_2O_3 alcanza el 9 % como promedio de las muestras investigadas, presentando un ligero incremento en relación a la media de los yacimientos que fueron explotados la cual no alcanza el 6 % como promedio.

En relación al MgO , los valores promedios determinados en las muestras en la PRN (2,45 %), parecen indicar que durante el procesamiento de las menas lateríticas en la planta de pulpa ocurre un incremento de su concentración, ya que los datos registrados por la planta para este compuesto no supera el 1,70 %. Las causas pueden estar asociadas al proceso de

formación de la pulpa, donde incide el agua y la separación de fracciones, ayudando a la obtención de fracciones menores que 0,85 mm con altos contenidos de magnesio. En las Tabla 10 y Tabla 11 se muestra una comparación de los contenidos medios de las fracciones estudiadas en la PRV y en la PRN, los valores medios para todos los elementos mantienen los mismos niveles de concentración en las muestras estudiadas.

Tabla 10. Resultados del análisis químico de las muestras mineralógicas, presa de rechazo nueva

Muestra	Mena	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO	% FeO_Cr	NiO	CoO	Na ₂ O	K ₂ O	PPI	Si_Lib
118101	LB	5,43	10,53	2,30	2,22	0,94	64,18	0,15	0,48	1,55	0,141	0,05	-	12,81	0,74
118107	LB	4,46	9,32	1,89	2,45	1,04	65,96	0,10	0,60	1,50	0,169	0,06	-	13,04	0,58
118109	LB	4,47	9,00	1,75	2,45	1,00	66,39	0,10	0,57	1,54	0,145	0,05	-	13,18	0,65
118111	LB	5,63	9,88	2,42	2,34	1,03	63,24	0,10	0,53	1,61	0,160	0,05	-	13,07	0,77
847001	LF	9,39	12,87	1,89	1,86	0,78	57,88	0,15	0,58	1,09	0,117	0,05	-	12,77	1,95
847007	LB	5,54	9,59	2,29	2,35	0,97	63,81	0,10	1,07	1,56	0,151	0,05	-	12,87	0,59
847009	LB	8,71	9,82	4,60	2,18	0,85	59,09	0,10	0,61	1,56	0,132	-	-	12,46	0,89
118144	LB	5,57	1,08	2,47	2,48	1,13	60,67	0,10	0,71	1,59	0,176	-	-	13,25	0,95
Promedio		6,15	9,01	2,45	2,29	0,97	62,65	0,11	0,64	1,50	0,149	0,05	-	12,93	0,89

Tabla 11. Resultados del análisis químico de las muestras mineralógicas, presa de rechazo vieja

Muestra	Mena	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO	% FeO_Cr	NiO	CoO	Na ₂ O	K ₂ O	PPI	Si_Lib
794101	LB	6,98	9,01	3,49	2,48	1,09	61,61	0,15	0,74	1,97	0,163	0,05	0,03	12,17	0,43
794103	LB	5,22	11,46	2,11	2,58	1,02	61,95	0,10	0,63	1,40	0,145	0,05	0,03	13,26	0,65
794111	LB	5,99	10,33	2,51	2,41	1,27	62,04	0,15	0,64	1,59	0,202	0,05	0,03	12,86	0,83
794118	LB	6,72	10,23	2,88	2,44	1,07	60,83	0,21	0,61	1,55	0,168	0,05	0,03	12,91	1,11
794123	LB	7,82	10,25	3,17	2,62	1,22	59,54	0,21	0,80	1,68	0,207	0,05	0,03	12,71	2,17
794126	LB	11,37	7,92	7,09	2,21	0,94	55,60	0,15	0,59	1,69	0,140	0,03	0,03	12,66	0,52
794128	LB	7,88	10,28	4,06	2,42	1,18	59,32	0,15	0,72	1,55	0,187	0,05	0,03	12,91	0,89
794135	LB	4,50	8,99	1,48	1,93	0,91	68,04	0,15	0,40	1,68	0,129	0,05	0,03	12,52	0,34
847012	LB	6,67	9,28	2,92	1,98	0,88	62,81	0,10	0,51	1,61	0,129	0,05	0,03	12,41	0,82
Promedio		7,02	9,75	3,30	2,34	1,06	61,30	0,15	0,63	1,64	0,163	0,05	0,03	12,71	0,86

Si_Lib- % Sílice libre

La composición mineralógica de las menas lateríticas es sumamente compleja, ya que en el alto número de elementos químicos que se liberan de la desintegración de la molécula del olivino y ortopiroxenos, principales portadores de níquel y cobalto, se incluyen los minerales accesorios de las rocas mantélicas y las rocas de la porción basal del complejo oceánico, que por su alta estabilidad física y química se mantienen estables durante los procesos de serpentinización y lateritización.

La mineralogía de las menas lateríticas responde a la migración geoquímica de los elementos de la familia del hierro y a las condiciones termodinámicas existentes durante el proceso de lateritización. En correspondencia a esos factores, la migración geoquímica del níquel se realiza en tres fases:

- 1) Desintegración de la molécula del olivino y ortopiroxenos
- 2) Fase de formación de óxidos e hidróxidos
- 3) Fase de formación de silicatos de níquel

De esta forma la migración del níquel en la corteza de intemperismo queda:

olivino + piroxenos $\rightarrow$ goethita + asbolana $\rightarrow$ silicatos de Ni

En correspondencia con lo expuesto, las paragénesis minerales en las menas lateríticas se pueden agrupar en:

- ✓ Minerales magmáticos primarios (complejo mantélico – complejo oceánico y MTZ)
- ✓ Minerales con composición de óxidos e hidróxidos
- ✓ Minerales del grupo de las smectitas y arcillas
- ✓ Minerales silicatados de níquel y cobalto
- ✓ Minerales del grupo de la serpentina
- ✓ Otros (anfíboles, granates, micas, talco).

En el estudio mineralógico de la PRN se han podido identificar las paragénesis minerales siguientes:

Minerales magmáticos primarios (complejo mantélico – complejo oceánico y MTZ)

Se corresponden con los minerales primarios de origen magmático, como componentes fundamentales de las rocas de la asociación ofiolítica o como minerales accesorias a ellas. En el área se reporta solamente:

- ✓ Magnetita

Minerales con composición de óxidos e hidróxidos

Constituyen un numeroso grupo de minerales en que las relaciones atómicas se corresponden a óxidos e hidróxidos de Fe, Al, Co, Ni y Mn; entre ellos se incluyen los principales portadores de níquel y cobalto a las menas lateríticas; en la presa se reportan los minerales siguientes:

- ✓ Goethita
- ✓ Hematita
- ✓ Gibbsita

Minerales del grupo de las smectitas y arcillas

En el grupo de minerales de las arcillas y las smectitas no se pudo identificar qué tipo específico (montmorillonita, nontronita, caolinita), se requieren nuevos estudios para profundizar en la mineralogía de estos minerales.

Minerales del grupo de la serpentina

En el horizonte de saprolitas se determinó de forma cualitativa solo un 5 % de minerales que se corresponden con los minerales del grupo de la serpentina.

Resultados geofísicos, método de sondeo eléctrico vertical de polarización inducida (SEV-PI)

El sondeo eléctrico vertical (SEV) fue utilizado como método geofísico indirecto durante la exploración. Los perfiles se ejecutaron en diferentes direcciones, con el objetivo de conocer la variabilidad de los espesores de rechazo en varias zonas de la presa, antes de realizar la perforación. Las mediciones se realizaron hacia la parte norte de la PRN, en la parte sur no se pudieron realizar mediciones geofísicas, dado que se estaba vertiendo el rechazo y las condiciones eran inseguras. Ver Figura 15.

En algunos puntos de medición se aprecia una rápida disminución de los valores de resistividad asociado con el aumento de la humedad por la elevación del nivel freático hacia la zona oeste del depósito. Este hecho ocurre también hacia la parte norte, sectores donde se localizan las menores elevaciones. El aporte de agua es el resultado del escurrimiento que proceden de las partes altas de la cuenca y la que porta el material que rechaza la planta.

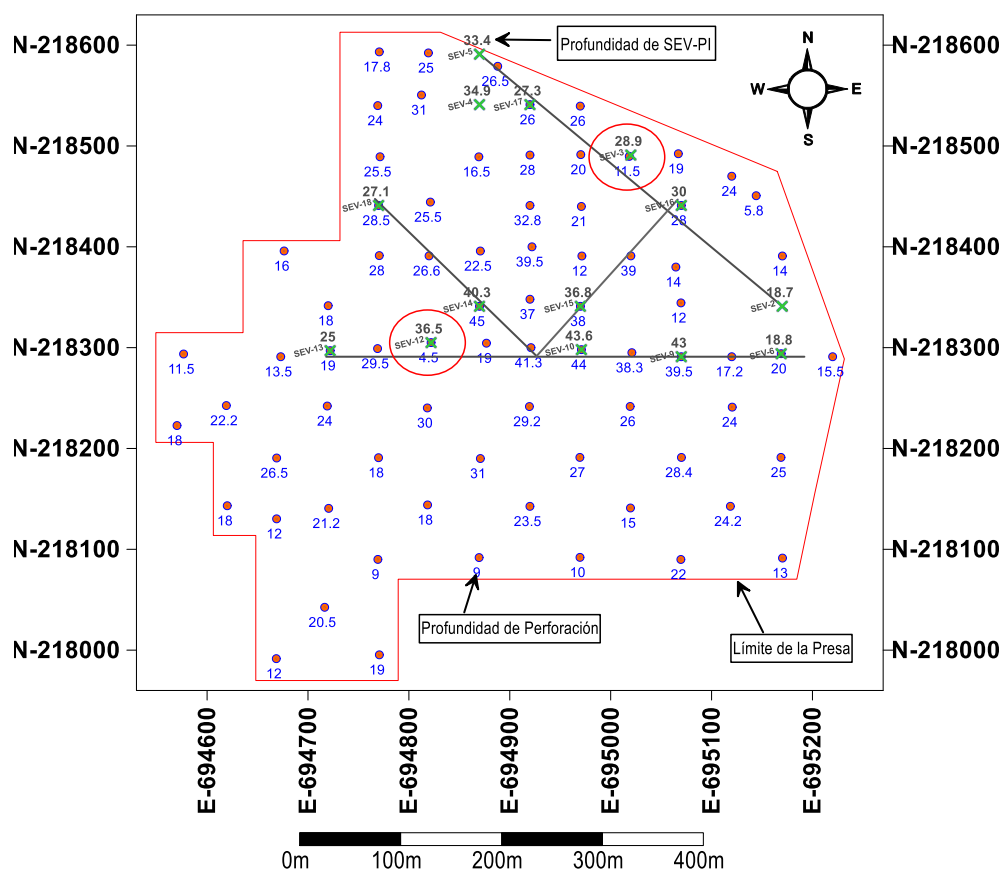


Figura 15. Ubicación de las líneas de sondeo eléctrico vertical (SEV-PI) en la PRN

Los estudios geofísicos revelan que los mayores espesores del depósito se encuentran en la zona sur y central del área investigada, alcanzando más de 45 m de espesor.

En la Figura 15 se muestra en círculos de color rojo los puntos del SEV-3 y SEV-12, donde se puede observar que las profundidades de los pozos perforados son inferiores a los valores obtenidos por los estudios geofísicos.

En el SEV-3 fue determinado un espesor de 36,5 m en relación a la de perforación de 4,5 m, al igual que en el SEV-12 fue de 28,9 m vs 11,5 m respectivamente. Esto indica que las perforaciones se detuvieron antes de alcanzar el límite del corte en profundidad, lo que puede estar relacionado con fragmentos de rocas que se encuentran dentro del material depositado.

La utilización de este método geofísico o de GPR en toda el área, permitirá conocer la variabilidad de los espesores de dentro del depósito y contornear la superficie del basamento.

Datos de la exploración

La proyección inicial de los pozos se realizó en una línea central y tres angulares que mantenían un paso aproximado entre pozos de 50 m, según las posibilidades reales del terreno dado que la presa se encontraba en operaciones, ver Figura 16.

La información obtenida de la exploración permitió establecer la existencia de menas limoníticas con fracciones menores que 0,85 mm, lo que permitió continuar con el estudio distribuyendo nuevos pozos a partir de los sondeos ejecutados.

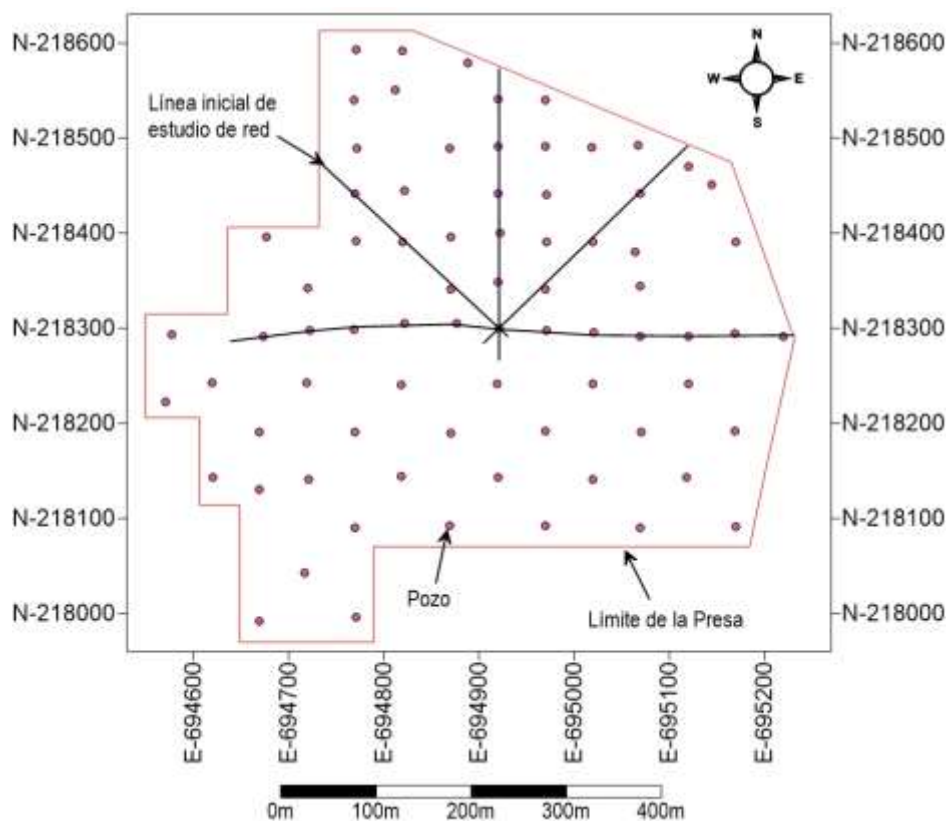


Figura 16. Distribución de las líneas iniciales de exploración, paso de 50 m en la PRN

Los nuevos pozos de exploración fueron distribuidos en una red aproximada de 70 m x70 m dentro de toda la presa, el intervalo de muestreo utilizado fue de 1 m. La base de datos obtenida de las perforaciones contiene la ubicación de los pozos (en coordenadas del sistema Cuba Sur, Lambert), código de horizonte y los intervalos con los valores de los elementos en por ciento de Ni, Fe, Co, Mg, Mn, Al y SiO₂.

Los datos fueron provistos predominantemente en formato Access, los que fueron sometidos a un proceso de certificación para eliminar y corregir los errores comunes que se pueden localizar en la confección de las bases. Entre las funciones de certificación aplicada a la base de datos se encuentran los siguientes:

- 1) Búsqueda de contenidos de elementos químicos repetidos
- 2) Coordenadas repetidas en los pozos de exploración
- 3) Desde y/o hasta repetidos en un mismo intervalo de pozo

- 4) Elevaciones erróneas de la cota de los pozos
- 5) Distancia entre pozos erróneas de las red de exploración aplicada
- 6) Contenidos de elementos químicos con valores en cero
- 7) Contenidos de elementos químicos fuera de los rangos permisibles
- 8) Contenidos de elementos químicos con valores negativos
- 9) Discontinuidad en el registro de cada intervalo del pozo de exploración
- 10) Solapamiento de las muestras en los diferentes intervalos.

Los errores detectados fueron corregidos dentro de las bases de datos; la magnitud de los errores fue despreciable, asociados con la introducción de los datos de los registros de pozos. En sentido general los datos presentan la calidad requerida para ser usados en los diferentes estudios geoestadísticos y de estimación de recursos.

Los resultados analíticos fueron realizados en el laboratorio DELABEL, utilizando el método de espectrometría atómica por emisión con plasma inductivo acoplado (ICP-AES). Los valores de los contenidos de los elementos químicos se obtuvieron de forma digital directamente desde el equipo, luego fueron procesados y conformada la base de datos.

Regularización de la base de datos

En las exploraciones geológicas no siempre es posible garantizar una regularidad en la distribución de las muestras obtenidas en los pozos, cuando no se cumple se hace necesario realizar una regularización de la ubicación de cada muestra en la base de datos. Este proceso no es aconsejable, dado que existe una manipulación de los datos antes de la estimación, las coordenadas de las muestras son desplazadas del lugar original donde fueron referidas y se generan nuevos intervalos a partir de promedios de diferentes muestras, incrementando las posibilidades de errores.

Los estudios geoestadísticos se hacen más simples cuando la distribución espacial de los datos es homogénea, donde existe una equidistancia entre pozos y entre las longitudes de las muestras. Es por ello, que en la mayoría de los softwares de tratamiento de datos de explotación se ha incluido un módulo que permite la regularización de los datos, evitando así las agrupaciones de muestras en un mismo punto y la distribución entre puntos.

En el análisis realizado las muestras mantuvieron una longitud predominante de 0,97 m, como promedio. Los intervalos que presentaron una longitud menor de un metro, se corresponden con el final de los sondeos relacionados con el fondo del depósito, ver Tabla 12.

Tabla 12. Estadística descriptiva de la longitud de muestreo de los pozos en la PRN

Media	0,97
Mediana	1
Moda	1
Desviación estándar	0,13
Varianza de la muestra	0,02
Rango	1,4
Mínimo	0,1
Máximo	1,5

La regularización de las muestras en la base de datos se realizó en aquellos pozos donde existe una longitud de muestreo menor de 1 m, lo que representa el 6,5 % de la base de datos. La regularización se realizó a intervalos de 1 m, siguiendo a todo lo largo del pozo (compósito de pozo), lo que permitió garantizar un mismo soporte de muestreo para todas las muestras de cada pozo durante la estimación.

Análisis exploratorio o estadístico de los datos

El análisis estadístico de los resultados de los análisis químicos de las perforaciones de explotación se realizó con el objetivo de evaluar la distribución y estructura espacial de los datos geoquímicos, en lo adelante estos datos se consideran como variables durante el estudio geoestadístico. Las desviaciones identificadas sirvieron de base durante el estudio variográfico y el proceso de selección del método de estimación de los recursos.

El análisis exploratorio de los datos permitió caracterizar estadísticamente las diferentes variables estudiadas, detectar la presencia de valores extremos o poblaciones mixtas que puedan influir negativamente en el procesamiento geoestadístico.

En el análisis estadístico univariado se calcularon los estadígrafos fundamentales de tendencia central y de dispersión, además de la construcción de los histogramas para cada variable. Ver anexo textual.

El análisis estadístico se realizó de forma global para todo el depósito, dado que las variables estudiadas no muestran una tendencia que permita establecer determinados dominios o zonas.

Entre las variables estudiadas se encuentran los siete elementos determinados en los análisis químicos de laboratorio, Ni, Fe, Co, Mg, Mn, Al y SiO₂ y la variable útil, esta última se utiliza por primera vez en una investigación geológica de yacimientos lateríticos.

El establecimiento de la variable útil parte de que en las muestras obtenidas durante la exploración o explotación de los yacimientos lateríticos para el proceso HPAL, no se realizan determinaciones detalladas para la fracción menor que 0.85 mm. En los modelos de bloques utilizados se desconoce, en cada unidad de selección minera, las fracciones útiles que pueden ser utilizadas por la planta metalúrgica y por ende no se tiene conocimiento del rechazo de las fracciones mayores que 0.85 mm, ver Figura 17.



Figura 17 Esquema de unidad de selección minera en el modelo de bloque de la PRN

La variable útil en esta investigación fue obtenida a partir del procesamiento de las muestras tomadas usando el tamiz de 0,85 mm. En cada etapa se realizó la determinación del peso antes de tamizar y el peso del material retenido en el tamiz de 0,85 mm, el porcentaje de material útil para cada muestra se estableció mediante la fórmula siguiente:

$$\text{útil} = ((\text{pini} - \text{prech}) / \text{pini}) \times 100$$

Dónde:

pini- peso inicial de la muestra

prech- peso del rechazo retenido en el tamiz 0,85 mm

A partir de esta fórmula se pudo obtener, para cada muestra, el por ciento de material útil menor que 0.85 mm que puede ser reprocesado metalúrgicamente. En la Figura 18 se puede observar la variabilidad de este parámetro en los pozos explorados, las columnas de pozo más estrechas indican contenidos bajos de la variable útil.

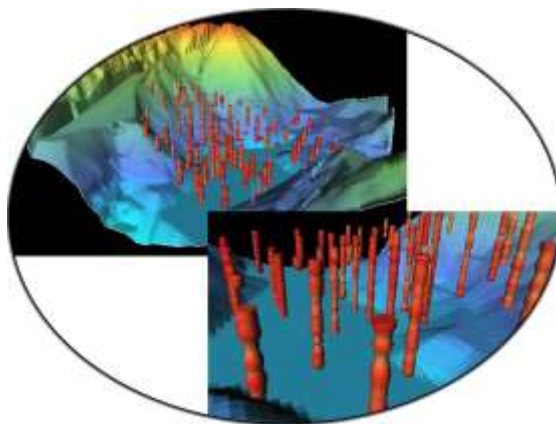


Figura 18. Ejemplo de la distribución de la fracción menor que 0,85 mm en los pozos de exploración

Las columnas más estrechas indican bajos contenidos de la variable útil

Esta información sirvió como base para conocer el comportamiento de esta fracción útil en cada unidad de selectividad minera en el modelo de bloques. En la Figura 19 se muestra un esquema 3D con algunos bancos del modelo de bloques donde se puede observar en color rojo las zonas donde existe mayor acumulación de materiales limoníticos con fracciones inferiores a 0,85 mm. En color amarillo y azul se muestran las zonas con mayor por ciento de rechazo.

La principal zona de acumulación de las fracciones menores que 0,85 mm se localiza hacia la parte oeste y norte del depósito. Las fracciones mayores que 0,85 mm tuvieron menos transporte en relación a las pulpas con fracciones inferiores, en la figura se puede observar una transición en dirección este a oeste.

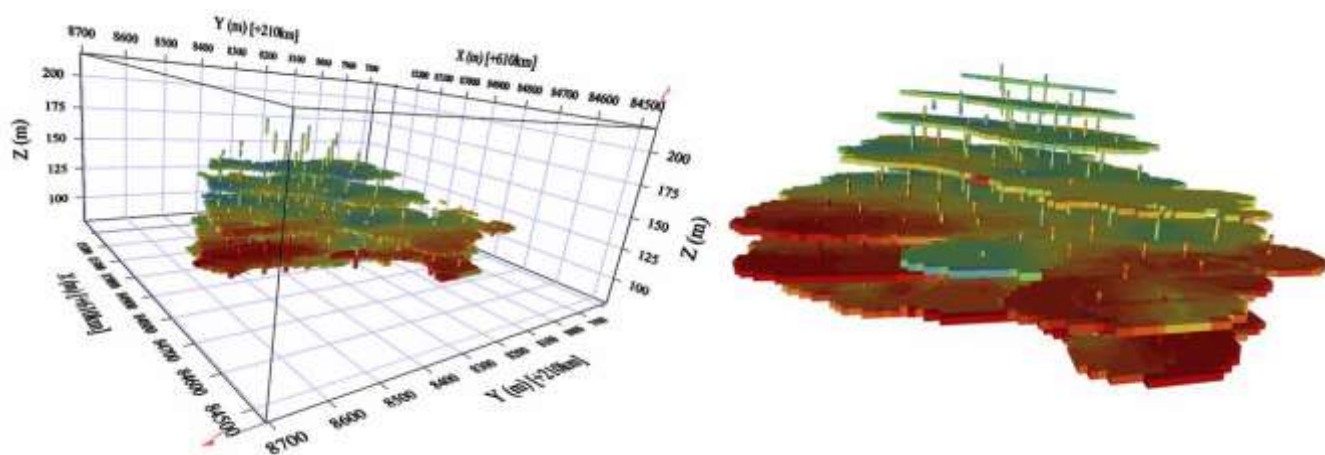


Figura 19. Ejemplo de niveles en el modelo de bloque 3D, material útil vs pozos de exploración

■ Alta concentración de fracciones menor que 0.85 mm

En los primeros bancos, desde el 8 al 22, se obtuvieron valores de 43 % de rechazo como promedio; a partir del banco 23 hasta el banco 45, el rechazo está en 29 % como promedio general. Los resultados muestran que el 32 % del material depositado se corresponde con fracciones superiores a 0,85 mm, lo que se traduce en un contenido útil de 68 %, con posibilidades de ser reprocesado por la actual PP. En la información precedente se ha utilizado un 22 % de rechazo para estimar los recursos de la PRN, por lo que las fracciones mayores que 0,85 mm son superiores a las aplicadas hasta el momento. La variable útil fue estudiada unida con el resto de las variables analizadas.

En la Tabla 13 se muestran los estadígrafos para todas las variables a partir de los muestreos realizados en el depósito.

Tabla 13. Estadígrafos globales para los datos de exploración

Variable %	Estadígrafos globales						
	Mínimo	Máximo	Media	C. Var.	Varianza	Desv St.	Skewness
Ni	0,07	1,60	1,21	0,13	0,03	0,16	-3,33
Fe	7,00	52,10	43,06	0,10	18,01	4,24	-4,77
Co	0,009	0,212	0,120	0,18	0,0005	0,022	-1,26
SiO ₂	2,08	46,55	6,53	0,61	15,95	3,99	6,56
Mg	0,38	22,40	1,68	0,78	1,74	1,32	9,70
Mn	0,13	1,28	0,77	0,16	0,01	0,12	-1,49
Al	0,64	15,81	5,64	0,17	0,95	0,97	3,59
Cr	0,12	2,82	1,61	0,12	0,04	0,20	-2,99
útil	0,93	99,98	68,70	0,25	305,40	17,47	-0,35

En todas las variables se refleja un coeficiente de variación menor que 1, indicando una distribución regular dentro del depósito. Este comportamiento permite justificar el uso de la Geoestadística Lineal en el proceso de estimación (José Quintín Cuador-Gil, 2004), en este estudio fue seleccionado el método de Kriging ordinario (KO) para la estimación de los contenidos en cada una de las unidades de selección minera (USM).

En relación a la desviación estándar en la mayoría de las variables se presentan valores bajos para este estadígrafo, mostrando que la mayor parte de los datos se encuentran distribuidos alrededor de la media. Los valores más altos de desviación estándar se corresponden con las variables Fe (4.24), SiO₂ (3.99) y útil con (17.47).

El coeficiente de asimetría muestra que en la mayoría de las variables las muestras se agrupan hacia las zonas de altas concentraciones del elemento, exceptuando las variables SiO₂ y el Mg, donde existe un predominio de los valores bajos.

Las determinaciones de la velocidad de sedimentación no fueron suficientes para realizar un análisis geoestadístico; en la base de datos solo se cuenta con 432 determinaciones de esta variable, lo que representa solo el 24 % de las muestras, esta variable no fue analizada en la presente investigación.

Análisis variográfico

El estudio del comportamiento espacial de las diferentes variables fue realizado mediante la construcción de variogramas en el plano horizontal y en la dirección perpendicular (pozo abajo), para determinar las direcciones de mayor y menor continuidad de cada variable.

Los semivariogramas se confeccionaron en las principales direcciones de anisotropía: norte (0^0), este (90^0) y pozo abajo (-90^0), el análisis fue realizado aplicando en el software Isatis. Los semivariogramas experimentales fueron calculados de acuerdo a los parámetros que se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros utilizados en la confección de los semivariogramas direccionales

Parámetros	0^0 (norte)	90^0 (este)	-90^0 (pozo abajo)
Azimuth (0)	0	90	0
Dip (0)	0	0	-90
Tolerancia angular (0)	45	45	45
Número de lag	10	10	10
Espaciamiento (m)	30	30	1
Tolerancia lineal (m)	15	15	0,5
Ancho del corredor Vertical (m)	15	15	-

El ajuste de los modelos teóricos de las diferentes direcciones a las curvas experimentales fue realizado según la metodología propuesta por (Gringarten, 2001). En la misma se asume que la variable analizada se compone de una suma de variables aleatorias independientes, donde cada una presenta su propia estructura de variograma (γ) y puede ser expresada mediante la expresión siguiente:

$$\gamma(h_x/h_y/h_z) = C_0 + C_1 M_1 (h_x/h_y/h_z) + C_2 M_2 (h_x/h_y/h_z) + \dots C_i M_i (h_x/h_y/h_z)$$

Dónde:

C_0 .es el efecto de pepita

C_i . la meseta

M_i - el modelo de semivariograma

$h_x/h_y/h_z$ - alcances en las tres direcciones

El comportamiento observado en los semivariogramas, para todas las variables, en el plano horizontal es anisotrópico (anisotropía geométrica), manifestado por las diferencias en los alcances. La dirección de máxima continuidad para todas las variables se presenta hacia el norte del depósito (dirección 0^0) donde se observan las mejores estructuras.

En la dirección pozo abajo (-90^0) se aprecia cierta anisotropía, la máxima continuidad espacial alcanza 42 m para la variable útil.

La presencia de efecto pepita está inducida por las microvariaciones de los datos a pequeña escala, errores en el muestreo, preparación de muestras y calidad de los análisis químicos, (Alfaro-Sironvalle, 2007); por lo que el inicio de los semivariogramas no parte del origen de coordenadas.

En la Tabla 15 se muestran los parámetros de los modelos obtenidos para las diferentes variables estudiadas.

Tabla 15. Resultados del ajuste de los modelos variográficos de las diferentes variables

Var	C ₀	Tipo	Estructura 1				Tipo	Estructura 2				Tipo	Estructura 3			
			C	hx	hy	hz		C	hx	hy	hz		C	hx	hy	hz
Ni	0,00544	Sp	0,005	80	80	3	Sp	0,015	650	270	20					
Fe	6,46	Sp	2,00	70	70	6	Sp	6,70	500	150	20					
Co	0,00017	Sp	0,00014	70	70	6	Sp	0,00015	650	250	20					
SiO ₂	2,05	Sp	4,2	80	60	2	Sp	7,30	430	210	15					
Mg	0,04	Sp	0,35	75	50	1,3	Sp	0,249	330	150	12					
Al	0,272	Sp	0,25	150	85	8	Sp	0,40	800	300	20					
útil	14	Sp	93,00	45	45	1,5	Sp	53,00	60	60	35	Sp	138	585	295	42

Var - variable, Co - efecto pepita, C - meseta o sill, Tipo - modelo teórico matemático, (sp - esférico), hx, hy, hz – alcance en cada dirección.

Los modelos calculados de las variables se corresponden con un modelo pepita y dos estructuras esféricas (Sp), sólo en la variable útil se incorporaron tres estructuras esféricas. Los gráficos con los modelos ajustados para cada variable se muestran en el anexo textual; los modelos ajustados obtenidos para las diferentes variables se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Modelos tridimensionales ajustados

Variable	Modelo
Ni	$\gamma(h_x/h_y/h_z) = 0,00544 + 0,005 \text{ Sp } (80/80/3) + 0,015 \text{ Sp } (650/270/20)$
Fe	$\gamma(h_x/h_y/h_z) = 6,46 + 2 \text{ Sp } (70/70/6) + 6,7 \text{ Sp } (500/150/20)$
Co	$\gamma(h_x/h_y/h_z) = 0,00017 + 0,000141 \text{ Sp } (70/70/6) + 0,00015 \text{ Sp } (650/250/20)$
SiO ₂	$\gamma(h_x/h_y/h_z) = 2,05 + 4,20 \text{ Sp } (80/60/2) + 7,3 \text{ Sp } (430/210/15)$
Mg	$\gamma(h_x/h_y/h_z) = 0,40 + 0,35 \text{ Sp } (75/50/1,3) + 0,249 \text{ Sp } (330/150/12)$
Al	$\gamma(h_x/h_y/h_z) = 0,272 + 0,25 \text{ Sp } (150/85/8) + 0,4 \text{ Sp } (800/300/20)$
útil	$\gamma(h_x/h_y/h_z) = 14 + 93 \text{ Sp } (45/45/1,5) + 53 \text{ Sp } (60/60/35) + 138 \text{ Sp } (585/295/42)$

Creación de superficies

En la búsqueda de datos geodésicos del basamento del depósito no fue posible localizar referencia de levantamientos topográficos a escala de detalle. Los datos del modelo digital del terreno (MDT) utilizados, se obtuvieron a partir de la digitalización de las planchetas topográficas a escala 1:25 000.

Esta escala no garantiza un conocimiento preciso, por lo que se recomienda realizar estudios geofísicos de GPR o SEV-PI a escala más detallada: 1:2 000 o mayor, que permitan obtener la rugosidad del basamento.

El MDT de la superficie se obtuvo por levantamiento directo a escala 1: 2 000, una vez que se finalizaron las operaciones de deposición del material, partiendo de los datos de campo de las poligonales y la nivelación de los sondeos de exploración. El límite físico se estableció por la superficie topográfica del último vertimiento dentro de la presa y el basamento del depósito.

Los datos obtenidos del levantamiento y de las planchetas topográficas, sirvieron como base para la creación de las superficies del techo y basamento del depósito para estimar el volumen de la PRN, ver Figura 20. El volumen estimado asciende a 8 339 500 m³, partiendo de la superficie topográfica utilizada como base y la superficie obtenida luego de culminadas las operaciones de vertimiento del rechazo, dentro del límite definido de la presa.

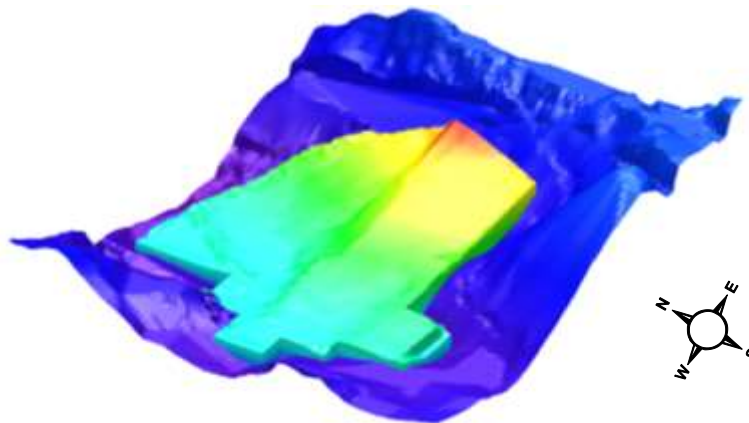


Figura 20. Superficie topográfica del basamento y volumen de rechazo en la PRN

Estimación de los recursos

El proceso de estimación de recursos por método geoestadístico contempla el análisis exploratorio de los datos, el análisis variográfico, la selección de parámetros de estimación y la estimación de cada variable dentro del modelo de bloque.

El análisis variográfico de una variable incluye la determinación del efecto pepita y la definición del variograma, el que trata de manifestar la relación espacial de la variable en función de una distancia determinada.

Los variogramas experimentales de las variables se calcularon para diferentes distancias, buscando las mejores regularidades de los variogramas. Los resultados mostraron que a una distancia de 35 m los variogramas se comportan más uniformes para todas las variables, en las direcciones horizontales N-S y E-W. En estas direcciones se obtiene la mayor correlación de las variables, alcanzando continuidades por encima de los 300 m.

El efecto pepita corresponde a los cambios de las variables en relación a ella misma a corta distancia, relacionado con la menor distancia entre muestras en cada pozo de perforación; se puede definir como el error intrínseco de la variable en estudio.

A partir del estudio geoestadístico y las superficies topográficas, se realizó la estimación de los contenidos de las variables aplicando el método de Kriging Ordinario, utilizando los variogramas que describen la variabilidad a diferentes distancias. Los programas profesionales que se utilizaron fueron el software Isatis, y el Surpac V-6.0.

La estimación de los contenidos de las diferentes variables se realizó con el uso de los datos globales, dado que no existe la posibilidad de una diferenciación geológica dentro del depósito. En Tabla 17 se muestran los resultados de los principales estadígrafos obtenidos del proceso de estimación en comparación con los resultados obtenidos de la exploración.

Los datos utilizados para la estimación de cada variable se realizaron mediante la elaboración de un elipsoide de búsqueda móvil, considerando 4 sectores angulares, con un total de 24 muestras como máximo dentro del elipsoide. Los parámetros utilizados en la estimación fueron:

# Mínimo muestras por sector	5
Sectores angulares	4
Mínimo muestras por pozo	3
Rango (m)	X Y Z
	100 50 6
Rotación Azimut	180 ⁰
# Optima muestra por sector	6
Discretización del bloque	4 x 4 x 2
# Máximo muestras por pozo	4

El azimut de mayor continuidad fue en la dirección de 180⁰, con una máxima distancia de búsqueda de 100 m en el eje X y 50 m en el eje Y. En cada sector angular se seleccionaron 4 muestras como máximo en cada pozo. En la Figura 21 se muestra un esquema del elipsoide utilizado.

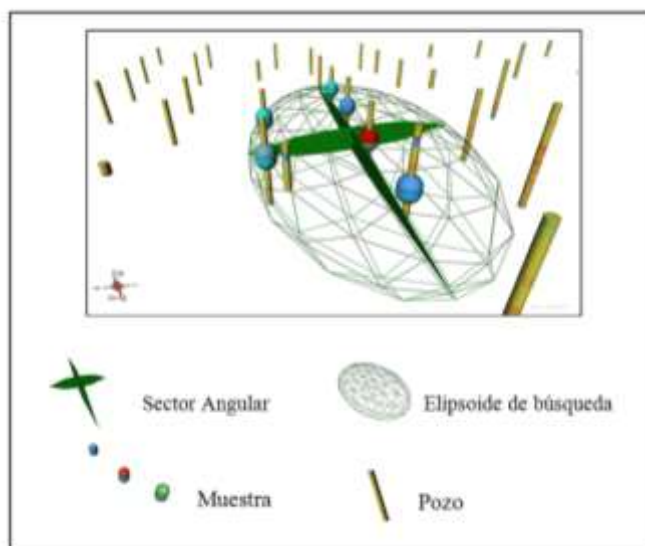


Figura 21 Esquema del elipsoide de búsqueda utilizado

La comparación estadística de los valores estimados en el modelo 3D evidencia correspondencia en relación a los valores medios durante la exploración. En el modelo se observa una disminución en los valores de la desviación estándar, excepto en el aluminio y la sílice donde existe un ligero incremento.

Tabla 17. Comparación de los parámetros estadísticos estimados vs registro de los pozos

Variable %	Mínimo		Máximo		Media		Coef. Variación		Varianza		Desv. St.	
	Pozo	Modelo	Pozo	Modelo	Pozo	Modelo	Pozo	Modelo	Pozo	Modelo	Pozo	Modelo
Ni	0,07	0,15	1,60	1,41	1,21	1,15	0,13	0,14	0,03	0,03	0,16	0,16
Fe	7,00	8,91	52,10	49,07	43,06	42,58	0,10	0,10	18,01	16,58	4,24	4,07
Co	0,009	0,013	0,212	0,165	0,120	0,115	0,18	0,16	0,0003	0,0002	0,022	0,018
SiO ₂	2,08	2,84	46,55	43,01	6,53	7,47	0,61	0,56	15,95	17,30	3,99	4,16
Mg	0,38	0,61	22,40	13,09	1,68	1,66	0,78	0,35	1,74	0,33	1,32	0,58
Mn	0,13	0,17	1,28	1,02	0,77	0,73	0,16	0,14	0,01	0,01	0,12	0,10
Al	0,64	2,85	15,81	12,85	5,64	5,71	0,17	0,18	0,95	1,05	0,97	1,02
útil	0,93	2,98	99,98	100,00	68,70	71,10	0,25	0,21	305,40	213,80	17,47	14,60

En el área de la presa se realizaron determinaciones de la masa volumétrica a través de monolitos solo en algunos sectores, debido a la inestabilidad del material para ubicar de forma segura los equipos de perforación. Las determinaciones realizadas no fueron suficientes para caracterizar este parámetro en toda la PRN, por esa razón se decidió no usar esos datos de la masa volumétrica hasta tanto se realicen estudios más detallados.

Modelo de bloques 3D

El tamaño del soporte seleccionado fue de 8,33 x 8,33 x 2,0 m; siendo uno de los utilizados en los yacimientos de menas lateritas de níquel y cobalto en la región, (Urrea-Abaira, et al., 2012). Esta configuración ha sido confirmada de forma práctica durante la explotación, donde se logra una adecuada estabilidad en los taludes de los bancos. En la Tabla 18 se muestran los parámetros utilizados en la creación del modelo de bloques.

Tabla 18. Parámetros del modelo de bloques

Parámetro	X	Y	Z
	m		
Coordenadas Mínimas	694 465,83	217 770,83	79
Coordenadas Máximas	695 407,46	218 712,46	219
Tamaño del Bloque	8,33	8,33	2
Número de Bloques	113	113	70

En el modelo de bloques 3D se incorporaron los valores obtenidos de los contenidos de Fe, Ni, Co, Al, Mg, Mn, SiO₂ y el contenido de material útil. Los resultados obtenidos de la estimación de los recursos por diferentes métodos se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 19. Estimados de recursos por diferentes métodos, Cut-off % Ni ≥ 1 y % Fe ≥ 35

Método	Volumen Total (m ³)	Volumen Útil (m ³)	%						
			Ni	Fe	Co	Al	Mg	Mn	%SiO ₂
KO	5 737 200	3 874 300	1,22	42,64	0,122	5,8	1,73	0,78	6,7
ID	5 737 200	3 874 300	1,20	42,93	0,118	5,7	1,64	0,75	6,8
Polígono	6 115 600	4 129 900	1,22	43,61	0,122	5,6	1,56	0,78	6,0

ID- Inverso de la distancia, KO- Kriging Ordinario

Los resultados obtenidos por el método de Kriging ordinario fueron comparados con el Método del Inverso al Cuadrado de la distancia y el Método de Polígonos. Los valores medios por los tres métodos presentan resultados similares, indicando que los estimados del KO son aceptables.

En la aplicación del método de polígonos de influencia se construyeron polígonos de Thiessen, limitando su extensión por el borde de cada pozo donde se le asignó el área calculada del polígono; el volumen se calculó para cada muestra, multiplicando su longitud por el área del polígono.

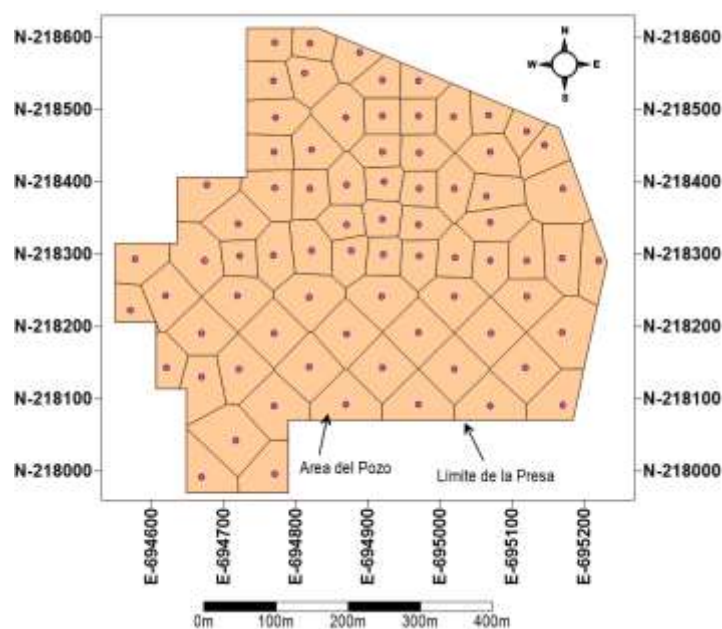


Figura 22. Distribución de las áreas de influencia de los pozos perforados en la PRN

La distribución de los pozos, dentro de los polígonos de influencia, representa una red aproximada de 68 m x 68 m como promedio, encontrándose pozos a una distancia mínima de 52 m y máxima de 78 m. El espesor promedio de limonita de balance estimada fue de 22 m para la variante de 1 % de Ni y 35 % de Fe; solo en tres pozos se presentan contenidos de níquel por debajo del límite de cálculo.

Validación de los resultados

La valoración de la calidad de la estimación se realizó mediante el cálculo de los errores estandarizados y su varianza estandarizada (Tabla 20).

Los resultados mostrados se obtuvieron a partir de la validación cruzada, que permite calcular los residuos de cada variable mediante la diferencia del valor estimado vs el valor real, utilizando como método de estimación el Kriging.

La validación permitió comprobar que los modelos ajustados propuestos garantizan una correspondencia con los semivariogramas experimentales. Los valores obtenidos de los errores estandarizados de la media y la varianza, se encuentran próximos a 0 y 1 respectivamente, (Tabla 20). Este hecho infiere que la estimación puede considerarse exacta y precisa para la mayoría de las pruebas efectuadas, (José Quintín Cuador-Gil, 2004).

Tabla 20. Estadígrafos estandarizados resultantes de la validación cruzada

Variable	Media del error estandarizado	Varianza estandarizada
Ni	0,005	1,228
Fe	0,011	1,108
Co	0,004	1,073
SiO ₂	-0,009	1,198
Mg	-0,012	1,176
Al	-0,003	1,318
útil	-0,002	0,986

En la Figura 23 se muestra el diagrama de dispersión e histograma de errores estandarizados obtenidos de los residuos de níquel, se puede observar una tendencia de distribución alrededor de la línea de 45 grados. Los histogramas de frecuencia de los errores estandarizados presentan mayor concentración de los datos en la zona central, predominando los valores bajos. La varianza de estimación por kriging no solo depende de la posición espacial de los datos, sino también, de los valores de la variable que se estudia en esos datos, (Legrá-Lobaina, et al., 2010).

Los valores de la media y la desviación estándar de los errores se aproximan a una distribución normal. En el anexo textual se encuentran los gráficos para resto el variables.

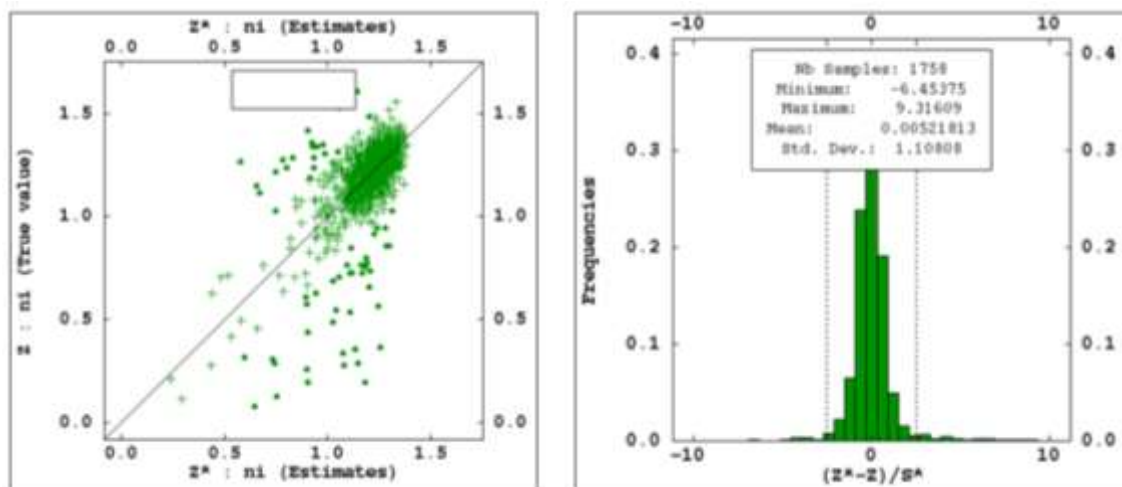


Figura 23. Diagrama de dispersión e histograma de errores estandarizados de los residuos de ni

La validación se realizó en cada columna de pozo, comparando los resultados obtenidos en las exploraciones geológicas y las columnas de bloques más próximas, permitiendo evaluar las desviaciones de cada parámetro estimado, (Tabla 21).

Tabla 21. Variables estimadas en columnas de bloques vs resultados de pozos

Variable		Mínimo	Máximo	Suma	Media C.	Var.	Varianza	Desv St.
		%						
Ni	Modelo	0,25	1,40	1,079	1,22	0,10	0,02	0,12
	Pozo	0,07	1,60	1,083	1,21	0,13	0,02	0,15
Fe	Modelo	14,18	49,00	38,498	42,64	0,07	8,08	2,84
	Pozo	7,00	52,10	38,606	43,14	0,10	17,45	4,18
Co	Modelo	0,020	0,160	107	0,122	0,13	0,0001	0,02
	Pozo	0,010	0,200	108	0,120	0,18	0,0001	0,02
SiO₂	Modelo	2,84	38,82	5,901	6,70	0,44	8,59	2,93
	Pozo	2,08	46,55	5,805	6,49	0,61	15,66	3,96
Mg	Modelo	0,71	12,44	1,513	1,73	0,45	0,59	0,77
	Pozo	0,40	20,46	1,512	1,69	0,79	1,78	1,33
Mn	Modelo	0,23	1,00	684	0,78	0,11	0,01	0,09
	Pozo	0,13	1,22	686	0,77	0,16	0,01	0,12
Cr	Modelo	0,96	1,88	1,450	1,62	0,06	0,01	0,10
	Pozo	0,12	2,82	1,448	1,62	0,12	0,04	0,20
útil	Modelo	21,5	100	62,607	68,00	0,21	207,36	14,40
	Pozo	0,0	100	59,973	67,01	0,32	469,77	21,67

En todos los elementos existe una correspondencia entre el valor promedio estimado y el obtenido en los pozos. En las variables SiO₂ y Mg se muestra un coeficiente de variación aproximado de 0.5, por debajo del obtenido en las exploraciones de 0,61 y 0,79 respectivamente. El por ciento de material útil muestra resultados elevados de la desviación

estándar en los pozos (21,67 %), en relación al obtenido en el modelo de bloques de 14,40 %.

En la Figura 24 se muestra de forma ilustrativa un perfil con los resultados obtenidos de la estimación del por ciento útil, se puede observar que las menores concentraciones de este parámetro (entre 30 % y 60 %) se localizan hacia la parte este, con una tendencia de incrementar su contenido hacia la zona oeste, donde llega alcanzar valores superiores a los 80 %.

Los elementos expuestos permiten confirmar la existencia de recursos limoníticos con fracciones menores que 0.85 mm que pueden ser reprocesadas por la actual planta metalúrgica, con el proceso HPAL.

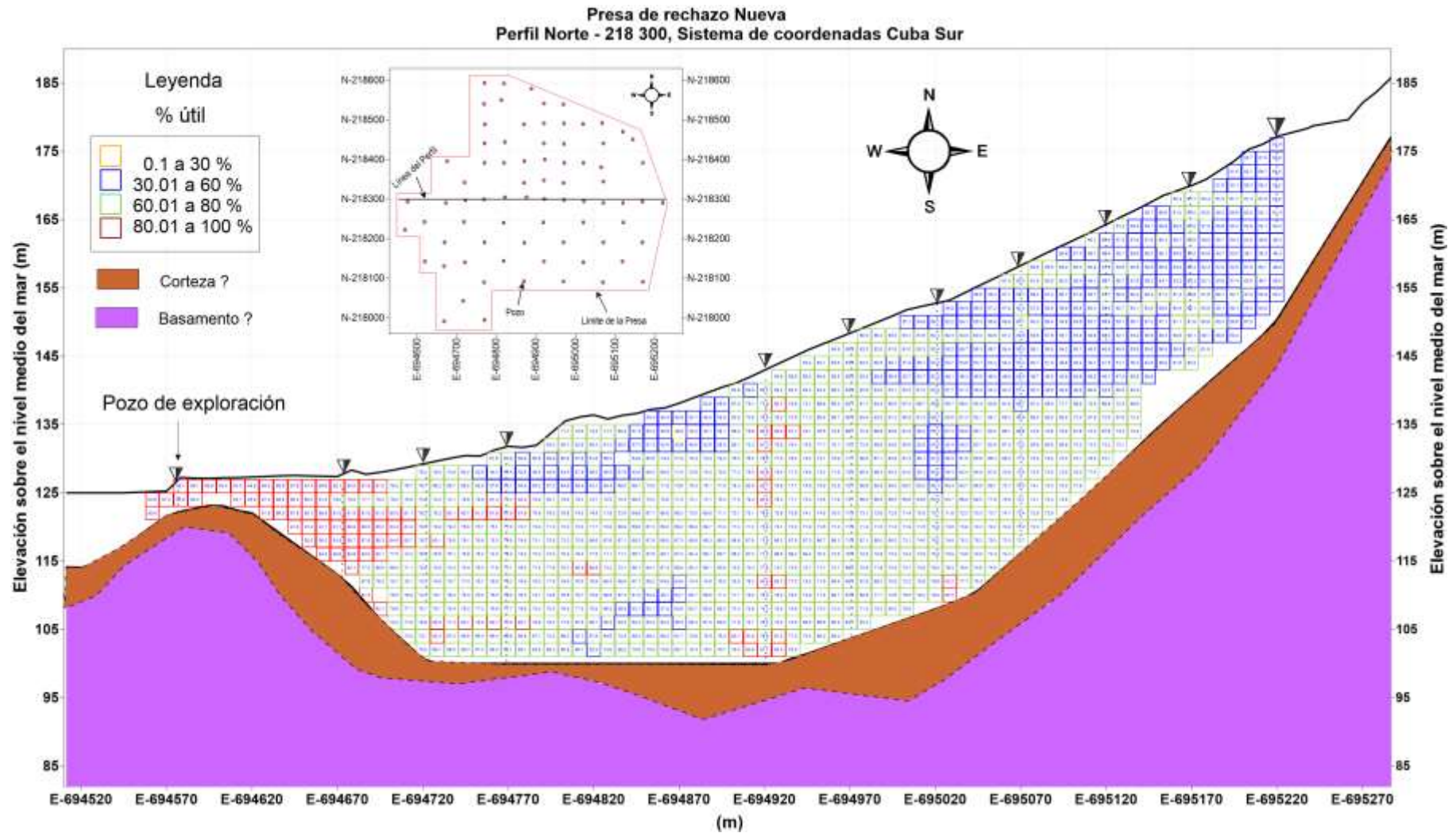


Figura 24. Perfil esquemático de la distribución de material útil en el modelo 3D de la PRN

CONCLUSIONES

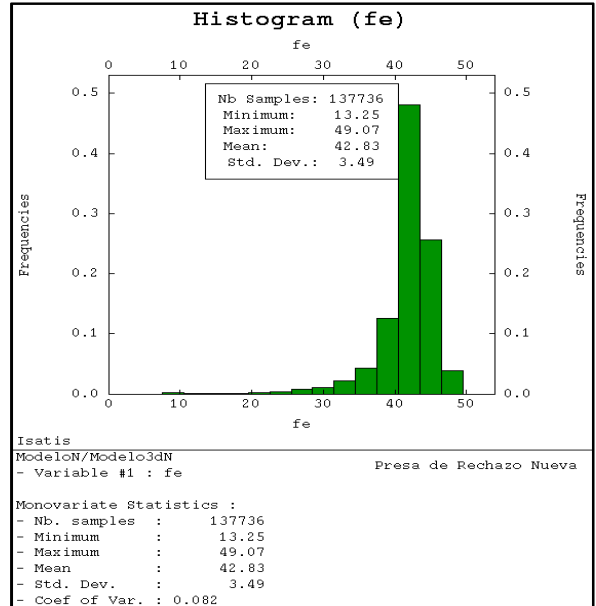
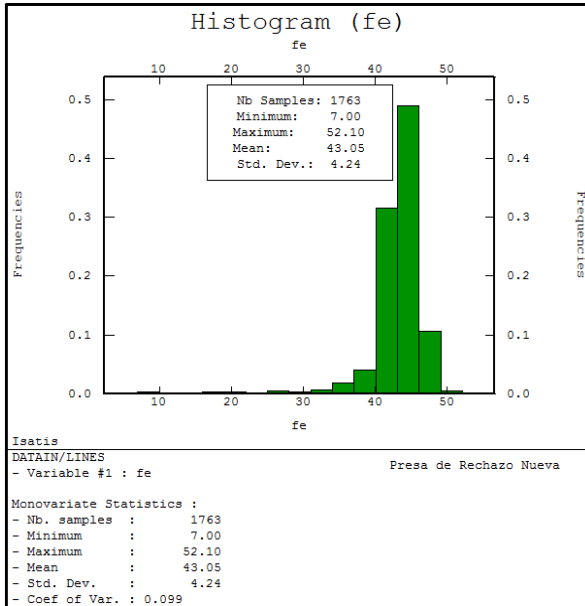
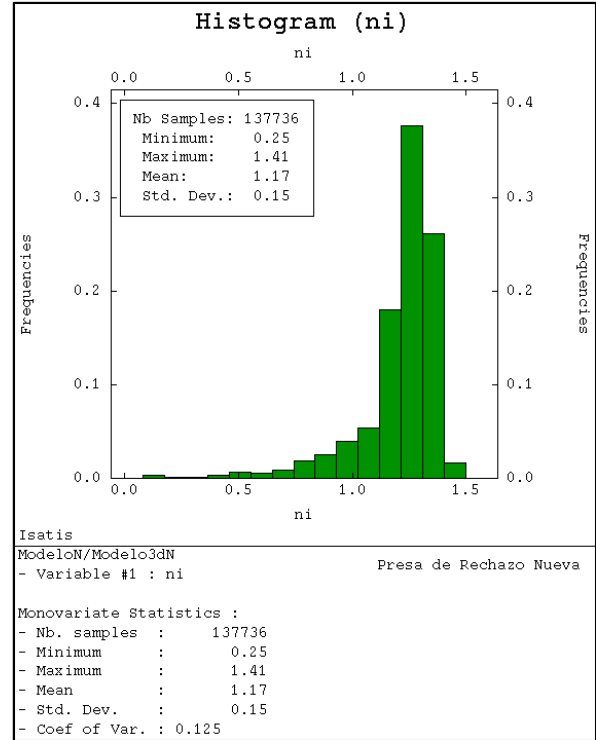
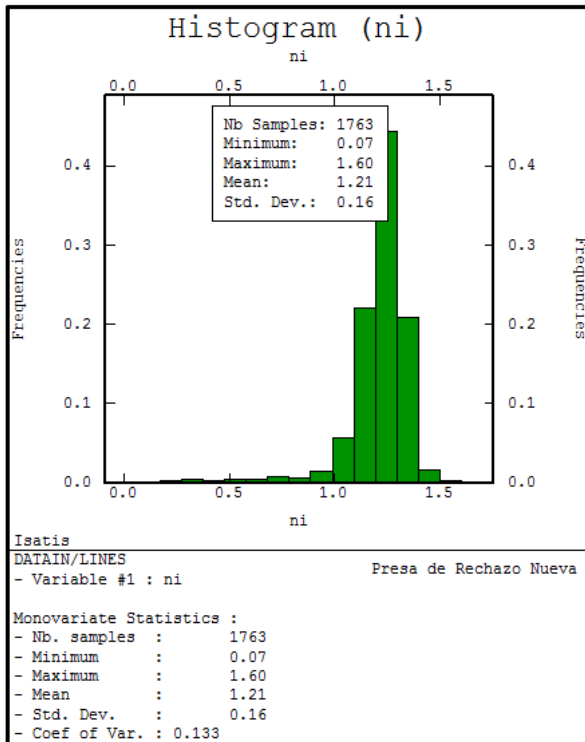
1. Se verificó que los contenidos de magnesio en la presa de rechazo presentan un valor medio superior al valor medio (1,73 %) de este elemento en los yacimientos explotados
2. Se demuestra que el contenido relativo de fracciones limoníticas útiles contenidas en el material de rechazo menores que 0,85 mm alcanzan el 68 %. Los recursos estimados aplicando el método de Krigeage Ordinario ascienden a 3870 000 t de material útil, con contenidos promedios de 1,22 % de Ni, 0,122 % de Co, 42,64 % de Fe, 5,8 % de Al, 6,7 % de SiO₂ y 1,73 % de Mg
3. Se demuestra que los planos geoquímicos obtenidos a partir del modelo 3D para cada banco permiten orientar el control geológico de la explotación
4. Se corrobora que el modelo 3D obtenido demuestra que los mayores contenidos útiles de níquel (> 1,21 %) se localizan en las cotas inferiores a 156 m y los de cobalto (> 0,120 %), en las cotas inferiores a 138 m

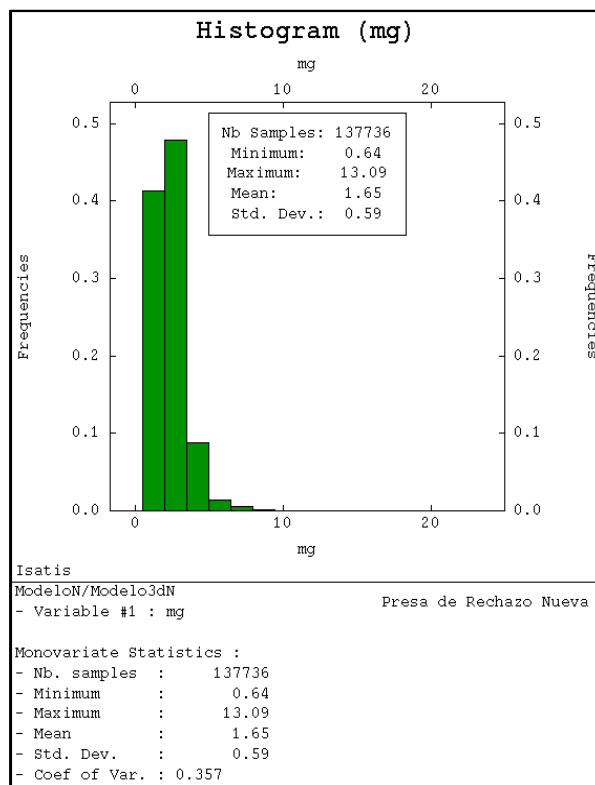
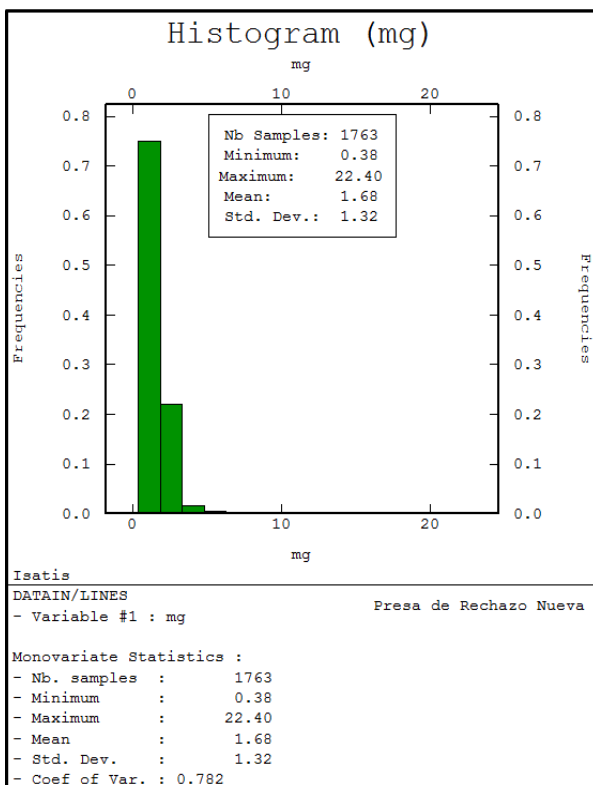
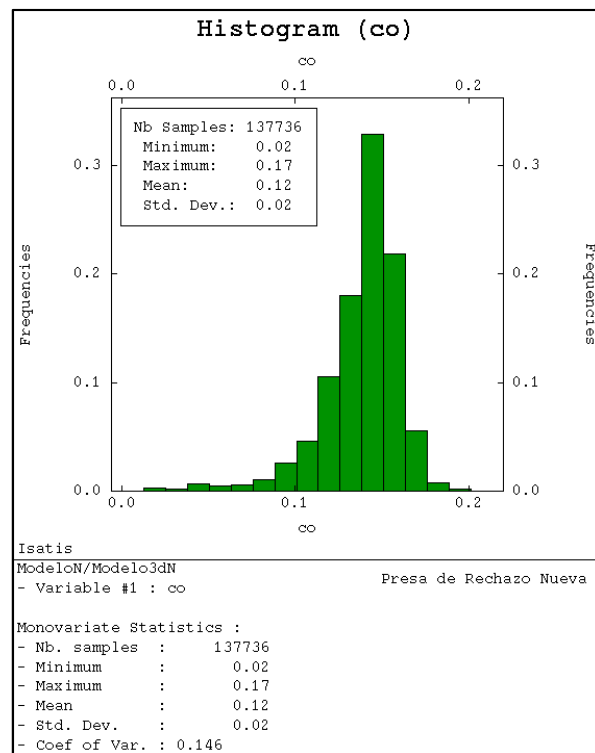
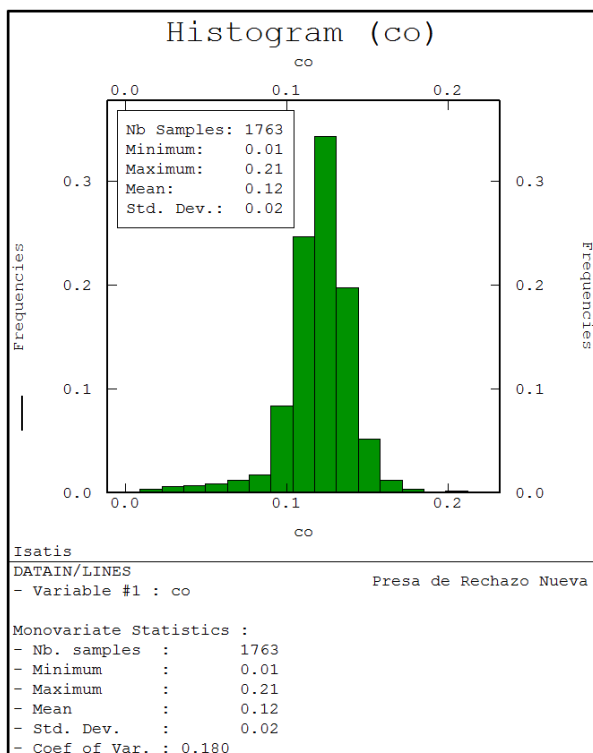
RECOMENDACIONES

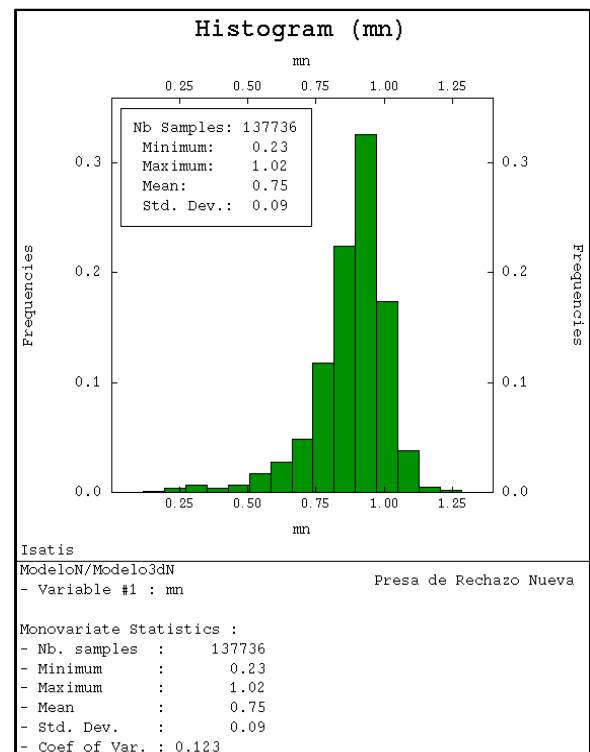
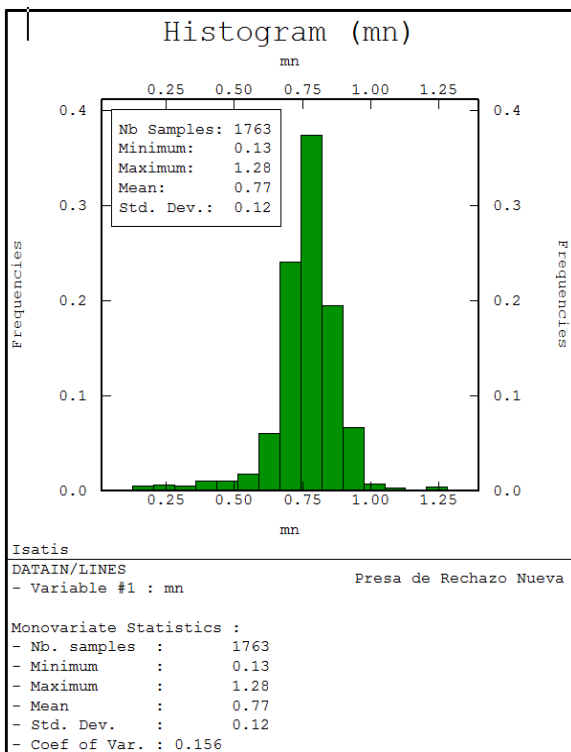
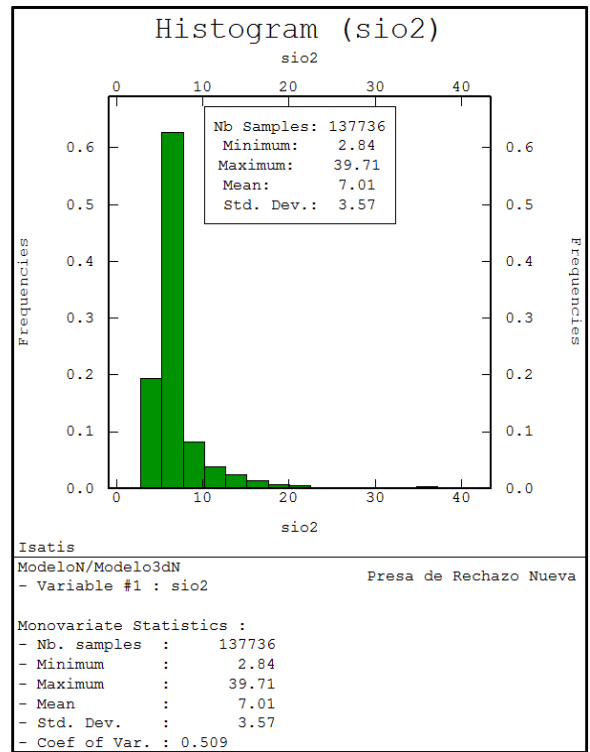
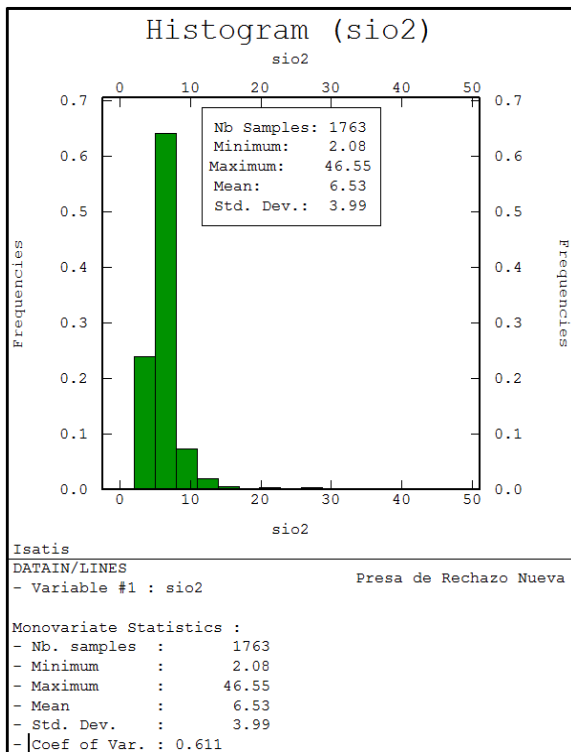
1. La información aportada por el MDT del basamento utilizado no tiene el grado de detalle necesario para el control de la explotación, por lo que se recomienda realizar estudios geofísicos de GPR, SEV-PI a escala más detallada: 1:2 000 o mayor
2. Evaluar las principales fracciones granulométricas portadoras de aluminio en los yacimientos lateríticos y el posible efecto de beneficio durante el procesamiento de las menas limoníticas
3. Realizar una caracterización química y mineralógica detallada de las fracciones menores que 0.85 mm en los yacimientos en exploración
4. Evaluar los contenidos de níquel y cobalto contenidos en las fracciones mayores que 0,85 mm para su posible aprovechamiento industrial
5. Realizar determinaciones de la velocidad de sedimentación de las menas limoníticas contenidas en la presa, dada la poca información disponible de este parámetro.

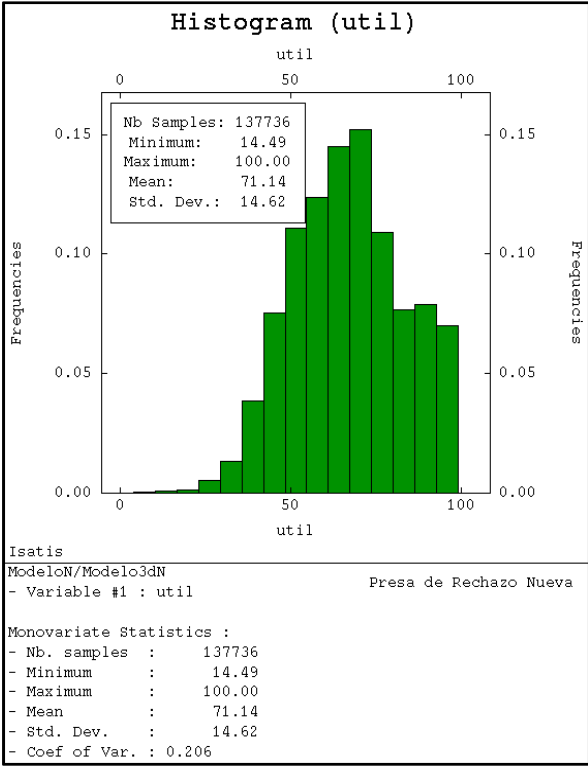
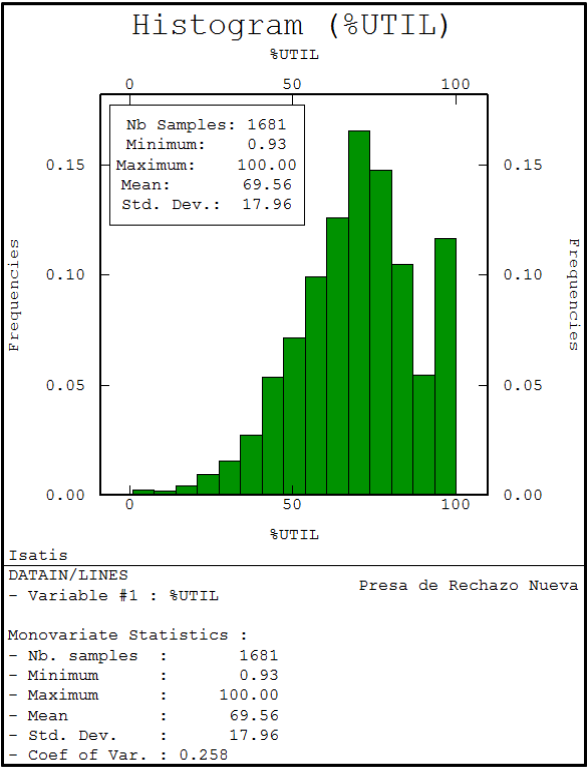
ANEXO TEXTUAL

Histogramas de los contenidos los pozos exploración vs modelo de bloques









Validación cruzada de las estimaciones

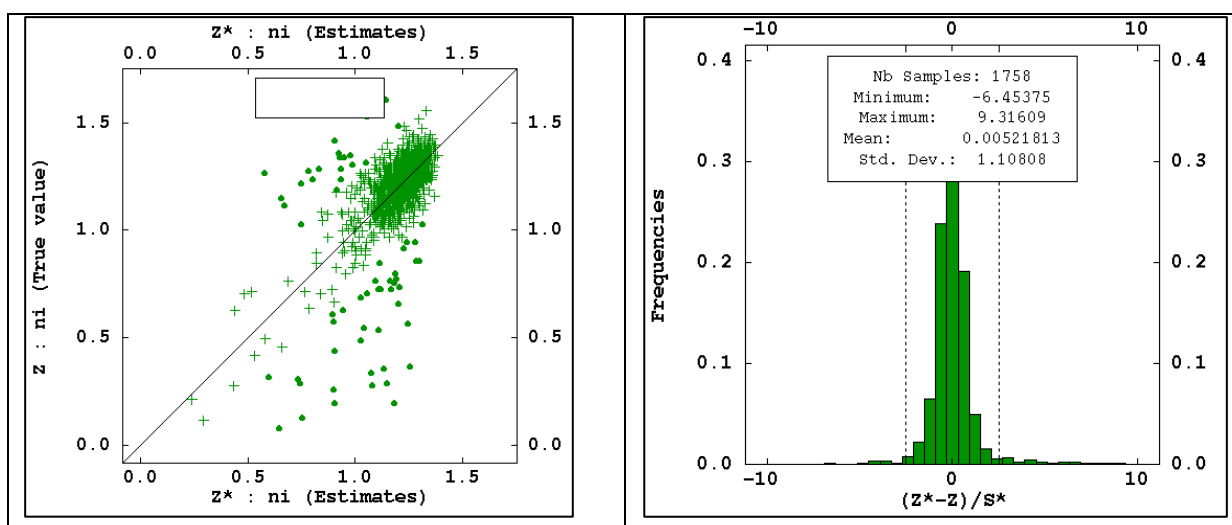


Diagrama de dispersión e histograma de errores estandarizados obtenidos de los residuos de ni.

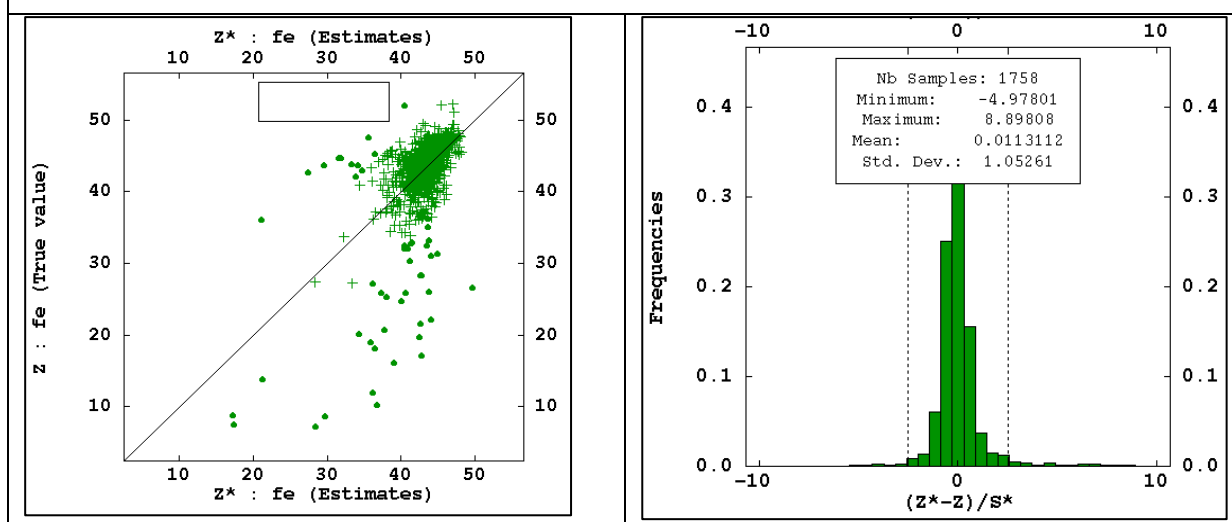


Diagrama de dispersión e histograma de errores estandarizados obtenidos de los residuos de fe.

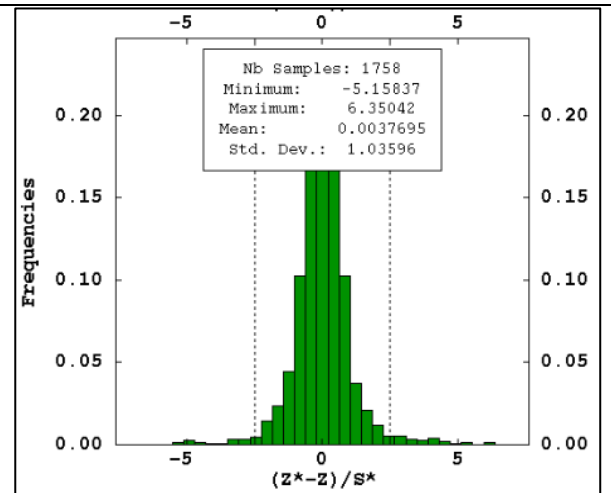
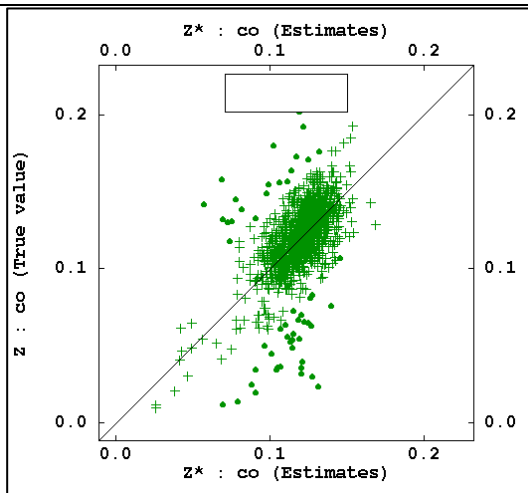


Diagrama de dispersión e histograma de errores estandarizados obtenidos de los residuos de co.

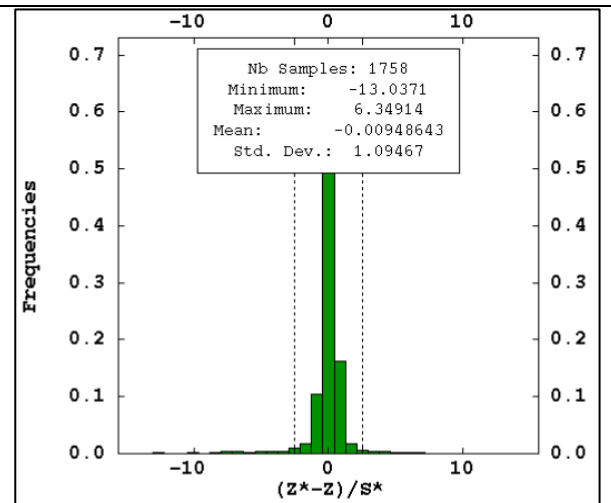
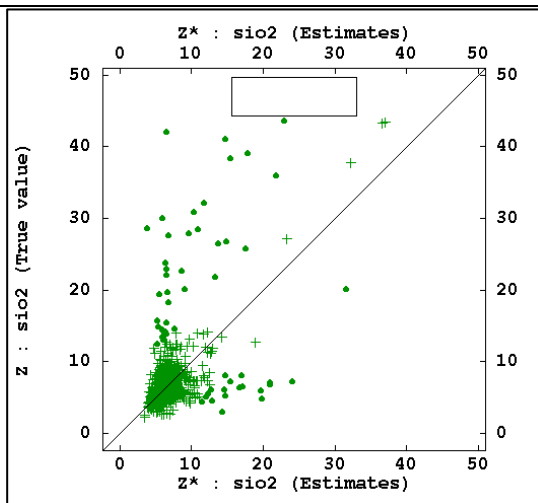


Diagrama de dispersión e histograma de errores estandarizados obtenidos de los residuos de sio₂.

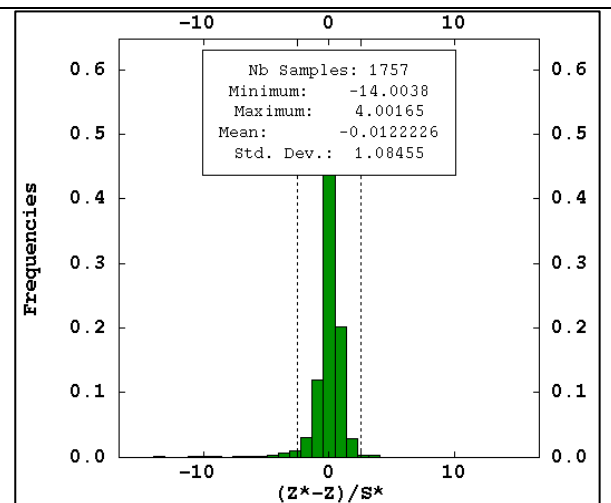
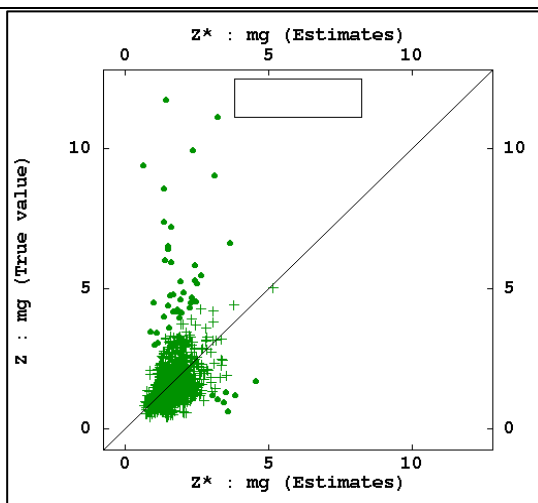


Diagrama de dispersión e histograma de errores estandarizados obtenidos de los residuos de mg.

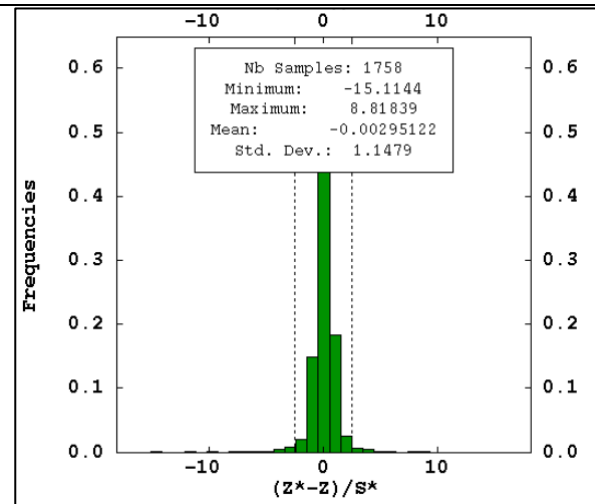
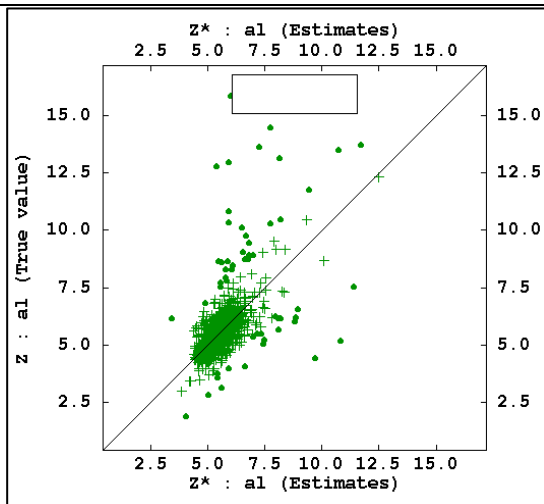


Diagrama de dispersión e Histograma de errores estandarizados obtenidos de los residuos de Al.

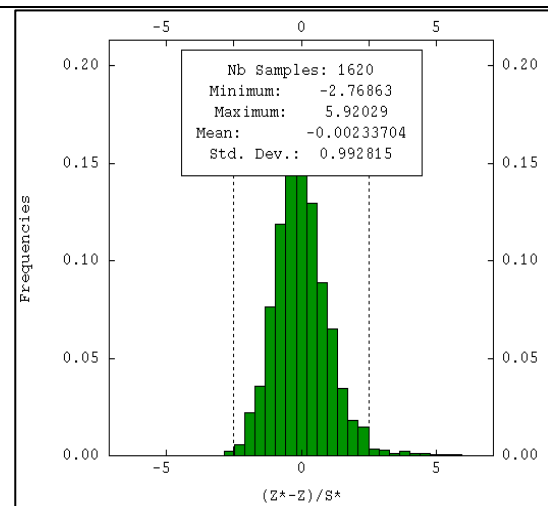
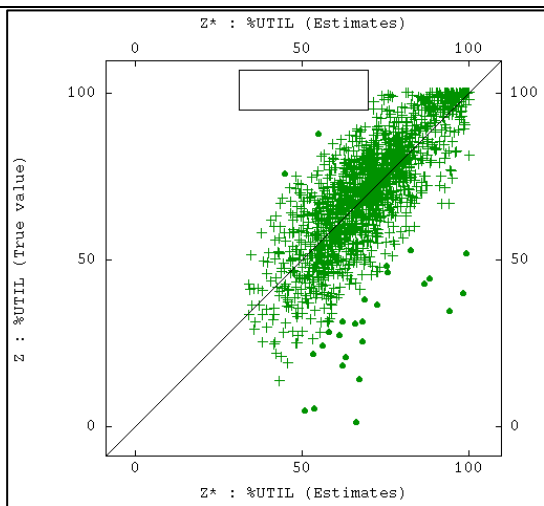
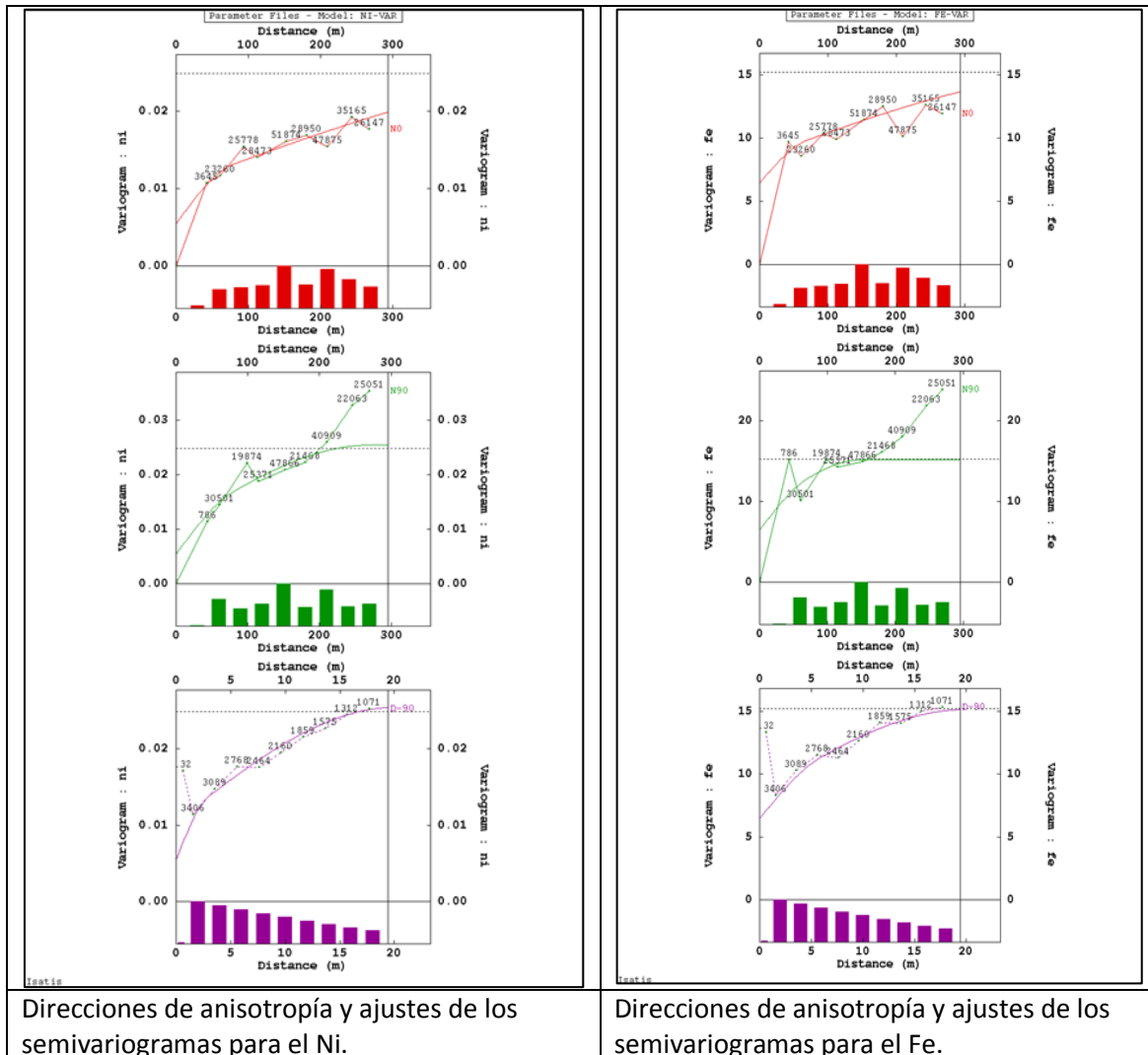
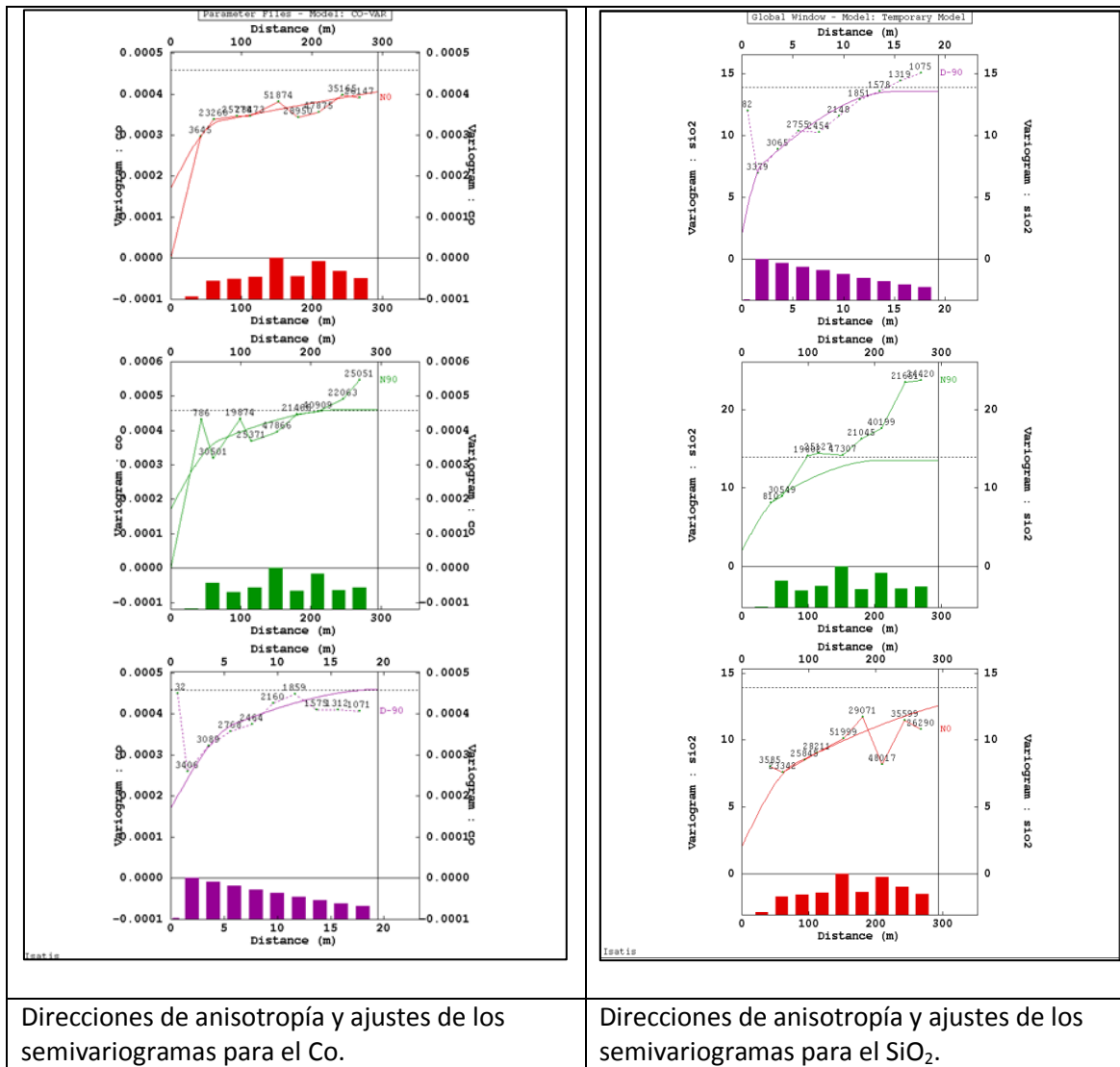
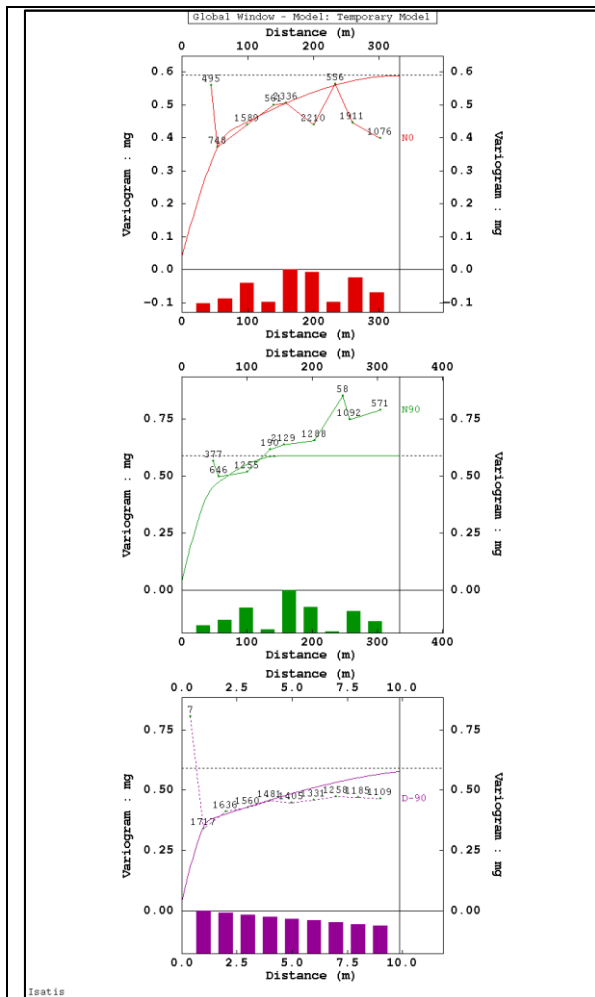


Diagrama de dispersión e histograma de errores estandarizados obtenidos de los residuos de útil.

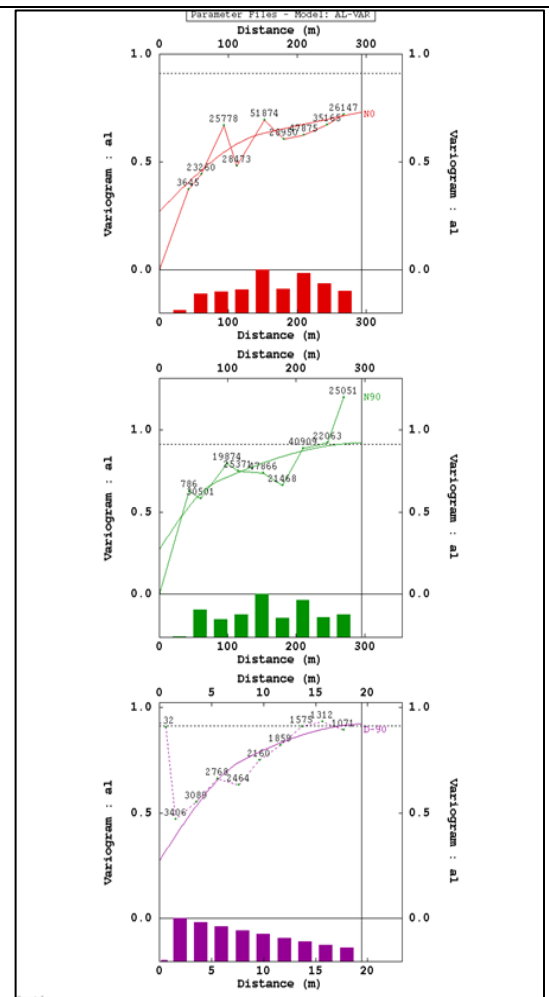
Variogramas ajustados, datos de los pozos de exploración



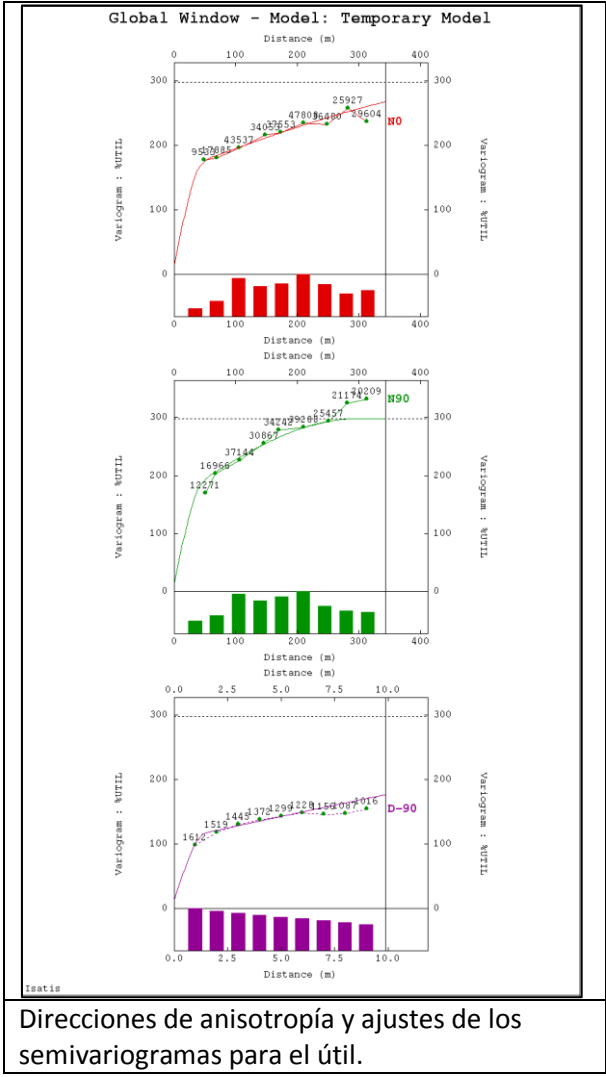




Direcciones de anisotropía y ajustes de los semivariogramas para el Mg.



Direcciones de anisotropía y ajustes de los semivariogramas para el Al.



Direcciones de anisotropía y ajustes de los semivariogramas para el útil.