ARTÍCULO ORIGINAL

Predicción del potencial recuperable de recursos niquelíferos y su incertidumbre en un sector del depósito *San Felipe*

Predicting nickel resources recoverable potential and their uncertainty in a sector of *San Felipe* deposit

José Alberto Arias-del Toro[1], Alain Carballo-Peña[2*], Elmidio Estévez-Cruz[3], Rosa María Cobas-Botey[1]

[1]Oficina Nacional de Recursos Minerales, La Habana, Cuba.

[2]Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

[3]Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba.

[*]Autor para la correspondencia: acarballo@ismm.edu.cu

Resumen

La estimación de los recursos recuperables se vincula estrechamente con la selectividad minera, su objetivo primordial es maximizar el beneficio de la explotación. Dado que los modelos de estimación sufren inevitablemente el efecto de "suavizamiento" de la ley estimada, resultan inapropiados para predecir tanto la ley como el tonelaje de los recursos que pudieran ser recuperados. Contrariamente, los modelos de la ley del mineral útil obtenidos de la aplicación de la simulación geoestadística reproducen satisfactoriamente las características globales (la textura), la estadística (histograma) y variabilidad espacial (variograma). Mediante la aplicación del método de simulación secuencial gaussiana se simuló la ley de níquel en una densa red de puntos de 12,5 m x 12,5 m x 1 m para 100 escenarios equiprobables. Posteriormente, se realizó la predicción del potencial de recursos recuperables para el panel de 25 m x 25 m x 1 m del tonelaje, la cantidad de metal, la ley media y las incertidumbres asociadas, a través de un cambio de soporte y la aplicación de varias leyes de corte en un pequeño sector del depósito niquelífero San Felipe, escogido como caso de estudio. Se concluye que al variar la ley de corte sobre un determinado soporte de estimación se produce un efecto en los recursos recuperables: a medida que se incrementa la ley de corte, el tonelaje y la cantidad de metal disminuyen; contrariamente, la ley media de níquel se incrementa, pero la incertidumbre se incrementa en todos los casos, debido al incremento de los errores medios de estimación asociados a cada uno de estos parámetros.

Palabras clave: recursos recuperables, cambio de soporte, simulación secuencial gaussiana, incertidumbre

Abstract

Estimation of recoverable resources is closely linked to mining selective and its primary objective is maximizing the profit from exploitation. Since estimation models inevitably suffer from the "softening" effect of the estimated law, they are inappropriate for predicting both the law and the tonnage of resources that could be recovered. Conversely, useful mineral law models obtained from applying geostatistical simulation efficiently reproduce global characteristics (texture), statistics (histogram) and spatial variability (variogram). Recoverable resource potential was predicted by applying sequential simulation method for 25m x 25m x 1m tonnage panel, metal quantity, mean grade and associated uncertainties, through a change of support and by applying several laws of cut in a small sector of San Felipe nickel deposit, chosen as a case study. In conclusion, changing the cut-off law over a given estimated medium has an effect on recoverable resources: as the cut-off law increases, tonnage and metal quantity decrease; conversely, the average nickel law increases, but uncertainty increases in all cases, due to the growth of average estimation errors associated with each of these parameters.

Keywords: recoverable resources, change of support, sequential Gaussian simulation method, uncertainty

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de los recursos recuperables se vincula estrechamente a la selectividad minera que tiene como objetivo primordial maximizar el beneficio de la explotación; su dificultad radica en prever de modo preciso las características del mineral *in situ*, teniendo en cuenta que la selección se realiza sobre cierto volumen y no puntualmente sobre los pozos de perforación (Chica-Olmo, 1987).

Cambiar el soporte de estimación significa discretizar el volumen o soporte (panel) en el que se estimarán los parámetros en unidades más pequeñas, para, de tal manera, poder predecir la distribución de leyes a un volumen equivalente al tamaño de la Unidad de Selección Minera (USM), dada la distribución de leyes de las muestras (datos puntuales).

La unidad de selección minera (USM) constituye el volumen más pequeño de material que puede ser selectivamente extraído, sea de mineral útil o estéril, cuyas dimensiones estarán condicionadas al método de minería y al

equipamiento minero utilizado (Neufeld y Leuangthong 2005; Sinclair y Blackwell 2006; Rossi y Deutsch 2014).

El efecto de suavizamiento de la ley como consecuencia de la utilización de estimadores está siempre presente, sobre todo cuando la estimación se realiza a partir de datos ampliamente espaciados.

A la discrepancia entre la distribución de la ley estimada y la ley de distribución de las unidades de selección minera se le denomina sesgo condicional, que ocurre cuando el valor esperado de la ley real del mineral $(Z_v^* = z)$ condicionada en la ley estimada $E\{Z_v|Z_v^* = z\} \neq z$ no es igual a la ley estimada $E\{Z_v|Z_v^* = z\} \neq z$, donde v representa al volumen de estimación (Rossi y Deutsch, 2014).

A diferencia de la estimación, la simulación condicional produce modelos de la variable de interés donde son reproducidas las características globales (textura), estadística (histograma) y variabilidad espacial (variograma), proporcionando representaciones globales alternativas donde prevalecen los patrones de reproducción de la continuidad espacial, lo que permite la construcción de modelos numéricos equiprobables de la variable en cuestión.

El uso de la técnica de simulación condicional permite el cambio de soporte. Su principio se basa en simular valores puntuales de la ley a la escala de los bloques más pequeños y promediar los valores obtenidos dentro del panel para obtener el valor de la ley en un escenario simulado equiprobable dado. El estimado del panel y su incertidumbre resultará del promedio de una serie de *n* simulaciones condicionales.

El objetivo del presente estudio fue predecir el potencial global recuperable de recursos a partir de la mineralización niquelífera contenida en los horizontes de meteorización y cuantificar su incertidumbre para varios valores de ley de corte de níquel. Para ello se utilizaron paneles de 25 m x 25 m x 1 m, dentro de los límites del sector objeto de estudio del depósito niquelífero San Felipe, partiendo de la ley de níquel simulada a escala puntual para 100 escenarios equiprobables, y mediante el uso de la técnica de la Simulación Secuencial Gaussiana.

1.1. Geología del sector objeto de estudio

El sector objeto de estudio se localiza en un área de la porción sureste del depósito de níquel San Felipe, en la provincia cubana de Camagüey, sobre la cual se desarrolla una corteza de meteorización de tipo manto lineal, de edad terciaria (Cobas-Botey *et al*., 2017) y con alto contenido de sílice (Chang-Rodríguez y Rojas-Purón, 2018), formada a partir de rocas ultramáficas,

principalmente harzburguitas serpentinizadas, donde subordinadamente aparecen, además, cúmulos máficos, diques paralelos de diabasa y basaltos oceánicos (Rodríguez-Catalá y Rodríguez-Infante, 2021).

La mena niquelífera es esencialmente de composición arcillosa esmectítica silicatada (nontronita y montmorillonita), también denominada como de tipo arcilla (Gallardo *et al*., 2010; Cobas-Botey *et al*., 2017). El mineral aparece en forma de óxidos e hidróxidos de hierro, estando el níquel concentrado como inclusiones dentro de los alumosilicatos (arcillas) y silicatos de magnesio (serpentina), y en menor proporción, asociado con las cromitas y los óxidos de manganeso, distribuyéndose de forma regular y continua por todo el depósito (Cobas-Botey, 2017).

El perfil de la corteza de meteorización que se desarrolla en el depósito de níquel San Felipe presenta una zonación litológica transicional en profundidad, formada por seis horizontes (Cobas-Botey, 2017). Para la modelización geoestadística, en el presente estudio, los horizontes de los ocres no texturales con perdigones (ONTCP) y los ocres no texturales sin perdigones (ONT) se consideran como una sola unidad: ocres no texturales (ONT). El resto de los horizontes de la corteza de meteorización se mantienen como los describe Cobas-Botey (2017).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Base de datos del sector en estudio

La base de datos del sector estudiado utilizada para el presente estudio está compuesta por 4 113 intervalos compositados a un metro de longitud, donde cada compósito posee el contenido de níquel y el código litológico del horizonte de meteorización correspondiente. Los datos provienen de 181 pozos verticales con una profundidad media de 24,5 m, perforados en una red de exploración de 100 m x 100 m, donde aparecen localmente pozos en red de 25 m x 25 m, así como otros dispuestos radialmente, espaciados a distancias menores, de aproximadamente 12,5 m.

2.2.1. Densidad volumétrica

La densidad volumétrica (Tabla 1) se obtuvo promediando los valores de densidad seca de cada horizonte de meteorización, cuyos valores fueron transferidos a los paneles de 25 m x 25 m x 1 m para obtener los recursos recuperables.

Tabla 1. Densidad volumétrica seca por horizontes de meteorización

Horizonte de meteorización	Densidad volumétrica seca promedio (t/m³)
Ocres no texturales (ONT)	1,68
Ocres texturales Limoníticos (OTL)	1,24
Ocres texturales Saprolíticos (OTS)	1,09
Serpentinitas Nontronizadas (SN)	0,96
Serpentinitas Lixiviadas (SL)	1,05

2.2. Procedimiento para la determinación de los recursos recuperables y la cuantificación de la incertidumbre asociada

Con base en las características geológicas del depósito niquelífero San Felipe, la determinación de los recursos recuperables y la cuantificación de su incertidumbre en el sector bajo esudio se realizó en las siguientes etapas:

Etapa 1. Preprocesamiento de datos

Validación de la base de datos y creación de compósitos. Despliegue de compósitos con referencia al modelo digital de elevación MDE (Richmond, 2013). Análisis Exploratorio de datos. Detección de valores aberrantes, acotamiento mediante las curvas de metal acumulado (Ecuación 1). Análisis de frontera entre horizontes de meteorización (Sterk *et al*., 2019; Kapageridis *et al*., 2021). Desagrupamiento en celdas de 100 m x 100 m.

$$\text{Metal acumulado} = \sum_{K=1}^{n} n_k \cdot \bar{C}_k \qquad (1)$$

Donde: n_k cantidad de compósitos cuyo contenido se encuentra dentro del k ésimo intervalo percentil de la distribución estadística de la ley de níquel y $\bar{C}_k$ ley media de níquel del k ésimo intervalo.

Etapa 2. Transformación geoestadística

Transformación gaussiana de los compósitos de níquel, condicionada a los horizontes de meteorización mediante el método de Normal Scores de la GSLIB (Deutsch y Journel, 1998).

Etapa 3. Análisis estructural

Cálculo y ajuste de los semi-variogramas experimentales direccionales globales de los compósitos de níquel condicionalmente transformados a gaussianos. Chequeo de la predictibilidad del modelo teórico ajustado, mediante validación cruzada (Webster y Oliver, 2007).

Etapa 4. Simulación y validación

Simulación secuencial gaussiana en red de nodos de 12,5 m x 12,5 m x 1 m para 100 escenarios equiprobables, mediante algoritmo SGSIM (Remy, Boucher y Wu, 2009). Transformación inversa de los valores de níquel simulados gaussianos, a valores reales de níquel (procedimiento BACKTR de la GSLIB (Deutsch y Journel, 1998). Validación de los escenarios simulados (chequeo de la reproductibilidad de histogramas y los variogramas globales).

Etapa 5. Cambio de soporte

Cambio de soporte por escalamiento (Neufeld y Leuangthong, 2005) de la ley de níquel a un panel de dimensiones 25 m x 25 m x 1 m. Determinación del tonelaje $t(u_i; z_c)$, la cantidad de metal $q(u_i; z_c)$ y la ley media $m(u_i; z_c)$, a partir de los valores simulados utilizando valores de corte entre 0 % hasta 2,5 % de níquel, según la función indicador siguiente $Si\ Z_v(u_i) \geq Z_c \quad I_v(u_i; z_c) = 1$, $0\ \ de\ lo\ contrario$, y las ecuaciones 2, 3 y 4:

$$t(u_i; z_c) = \quad I_v(u_i; z_c).p(u_i; z_c).v_{usm}.\bar{d}_h \tag{2}$$

$$q(u_i; z_c) = \quad I_v(u_i; z_c).Z_p(u_i; z_c).v_{usm}.\bar{d}_h \tag{3}$$

$$m(u_i; z_c) = \quad q(u_i; z_c)/t(u_i; z_c) \tag{4}$$

Donde: $\bar{d}_h =$ densidad media del horizonte en t/m^3, $.v_{usm}$ volumen de la USM de dimensiones de 12,5 m x 12,5 m x 1 m, igual a 156,25 m^3.

Etapa 6. Recursos recuperables

Cómputo de los valores medios y sus varianzas condicionales asociadas, por ley de corte, para el tonelaje (T_{z_c}), la cantidad de metal (Q_{z_c}), la ley media de níquel (M_{z_c}), recuperables y la probabilidad mineral P_{z_c}, en cada panel de 25 m x 25 m x 1 m, para los 100 escenarios equiprobables simulados, según la condición $m(u_i; z_c), \geq z_c$ (ecuaciones 5, 6, 7 y 8):

$$T_{z_c} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{100} t(u_i; z_c) \tag{5}$$

$$Q_{z_c} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{100} m.t(u_i; z_c) \tag{6}$$

$$M_{z_c} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{100} \frac{Q_{z_c}}{T_{z_c}} \tag{7}$$

$$P_{z_c} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{100} n(u_i; z_c) \tag{8}$$

Etapa 7. Cuantificación de incertidumbre

Cuantificación de la incertidumbre de los parámetros T_{z_c}, Q_{z_c} y M_{z_c} mediante los intervalos de confianza IC_{z_c} (Yamamoto, 1999; Murphy *et al*., 2005; Artica, 2023) a partir del cálculo del error E_{z_c}(ecuaciones 9 y 10):

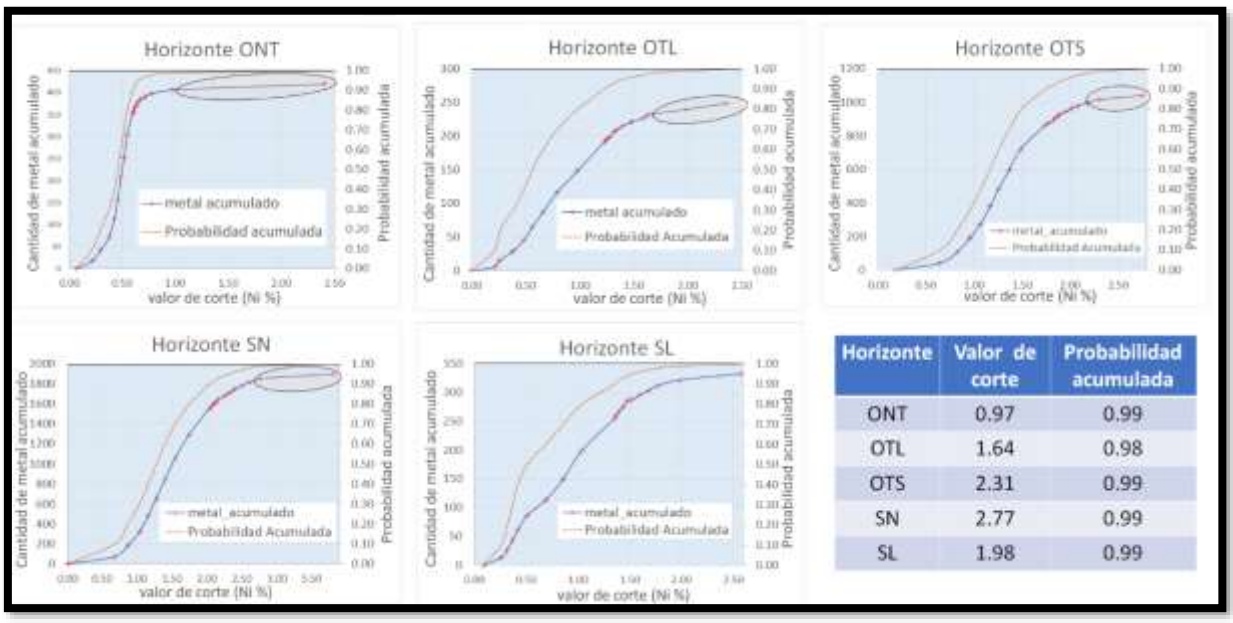
$$E_{z_c} = t.\frac{\sigma_{z_c}}{\sqrt{n_{z_c}}} \tag{9}$$

$$IC_{z_c} = M_{z_c} \pm \quad E_{z_c} \tag{10}$$

Donde t es el valor de Student con $n_{z_c} - 1$ grados de libertad, para una probabilidad del 95 %, σ_{z_c} - desviación estándar obtenida a partir de la raíz cuadrada de la varianza condicional y n_{z_c} la cantidad de escenarios simulados donde Z es ≥ Z_c

3. RESULTADOS

Las curvas acumulativas de la cantidad de metal y de probabilidad *versus* valores de corte para níquel, los histogramas de frecuencias relativas y los gráficos de contacto entre los horizontes de la corteza de meteorización se exponen en las Figuras 1, 2 y 3.



Horizonte	Valor de corte	Probabilidad acumulada
ONT	0.97	0.99
OTL	1.64	0.98
OTS	2.31	0.99
SN	2.77	0.99
SL	1.98	0.99

Figura 1. Gráficos de las curvas acumulativas de la cantidad de metal y de probabilidad *versus* valores de corte para níquel.

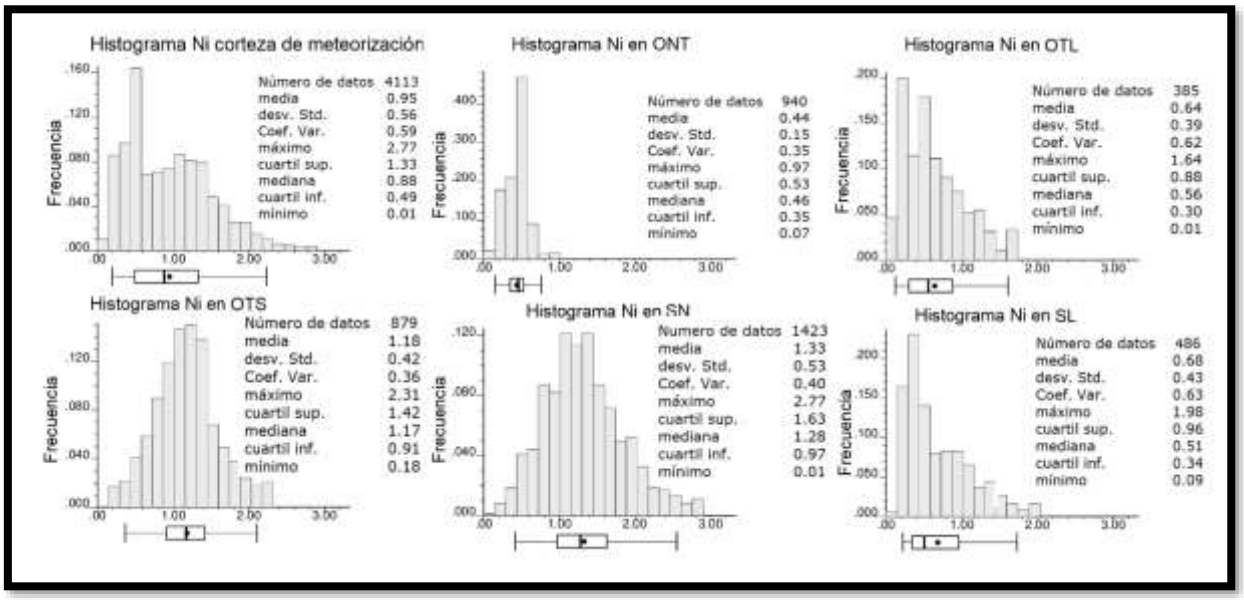


Figura 2. Histogramas de frecuencias relativas para la corteza de meteorización y sus horizontes, con sus respectivos gráficos de "Caja y Bigote".

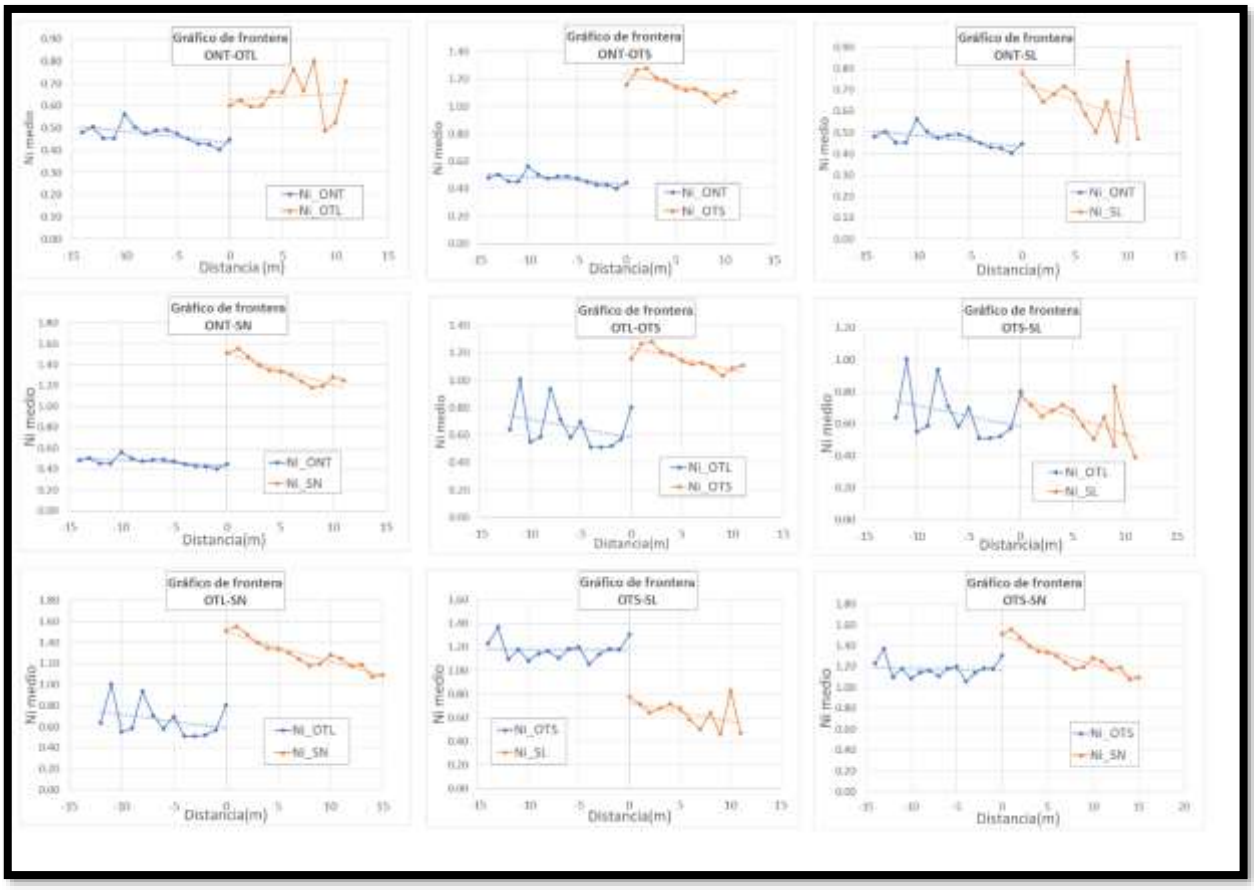


Figura 3. Gráficos de contacto entre los horizontes de la corteza de meteorización.

La función estructural ajustada (ecuación 11) a los semi-variogramas gaussianos globales de níquel (Figura 4) en los límites del sector de estudio es la que a continuación se presenta:

$$\gamma(h_{x,y,z}) = 0.10 + 0.5 \cdot Esf(1) \cdot \left[\frac{h_{1,1}}{56m}, \frac{h_{2,1}}{56m}, \frac{h_{3,1}}{10m}\right] + 0.40 \cdot Exp(2) \cdot \left[\frac{h_{1,2}}{143.5m}, \frac{h_{2,2}}{143.5m}, \frac{h_{3,2}}{7m}\right] \quad (11)$$

La simulación secuencial gaussiana se realizó en el programa geoestadístico SGeMS, mediante el algoritmo SGSIM (Remy *et al*., 2011). En total, se simuló el valor de níquel en 233,100 localizaciones (nodos), 74 nodos en la dirección X, 94 en la dirección Y, y 35 en dirección Z, cubriendo el espacio tridimensional dentro de los límites de la corteza de meteorización del sector bajo estudio. Las Figuras 5, 6 y 7 exponen los resultados del proceso de validación de la simulación.

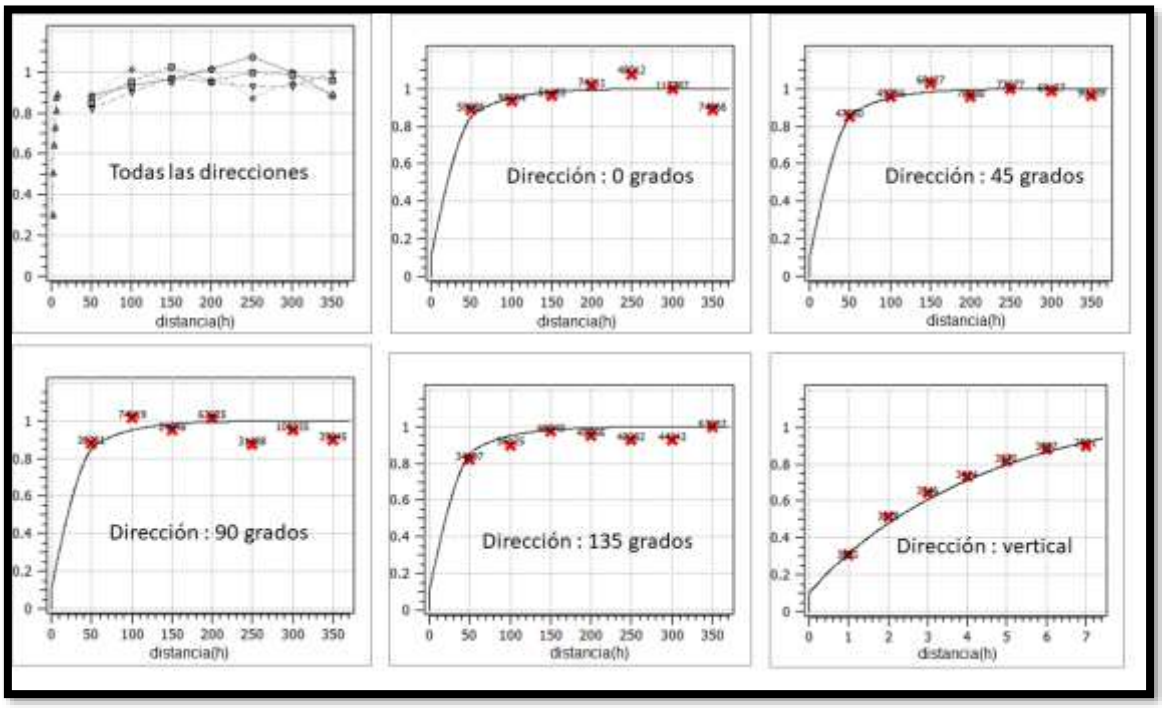


Figura 4. Semi-variogramas experimentales direccionales de níquel gaussiano según las direcciones, 0º, (Dir=0) 45º (Dir=45), 90º (Dir=90), 135º (Dir=135) y vertical (pozo abajo) con modelo teórico ajustado horizontal y vertical.

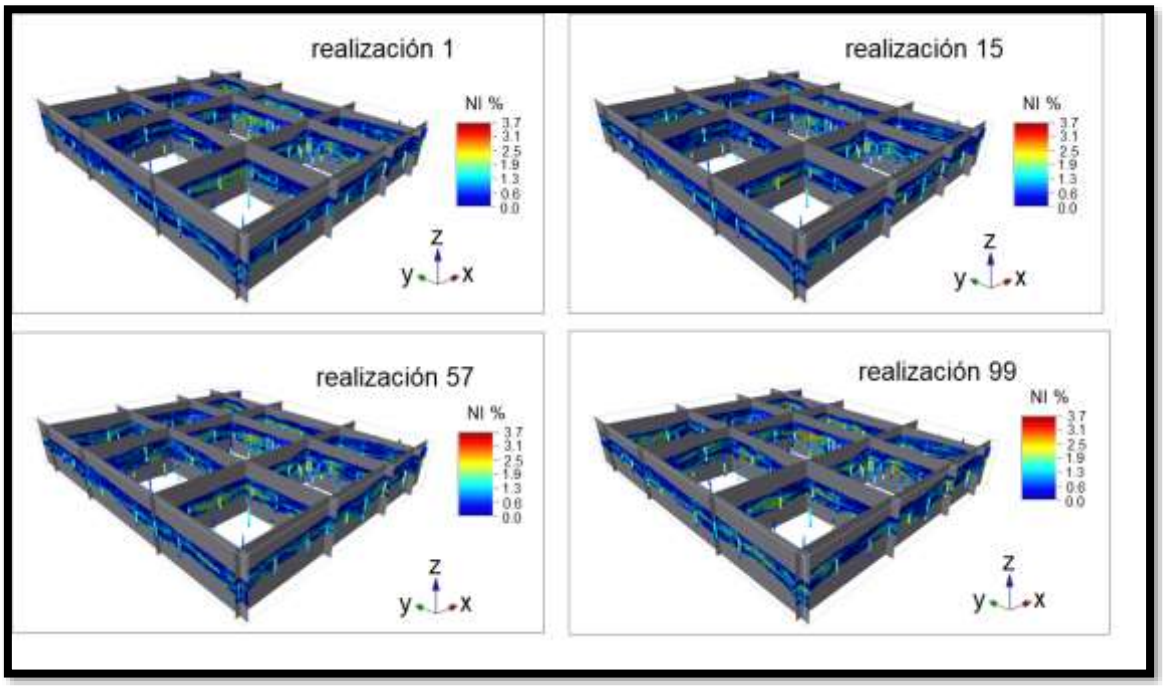
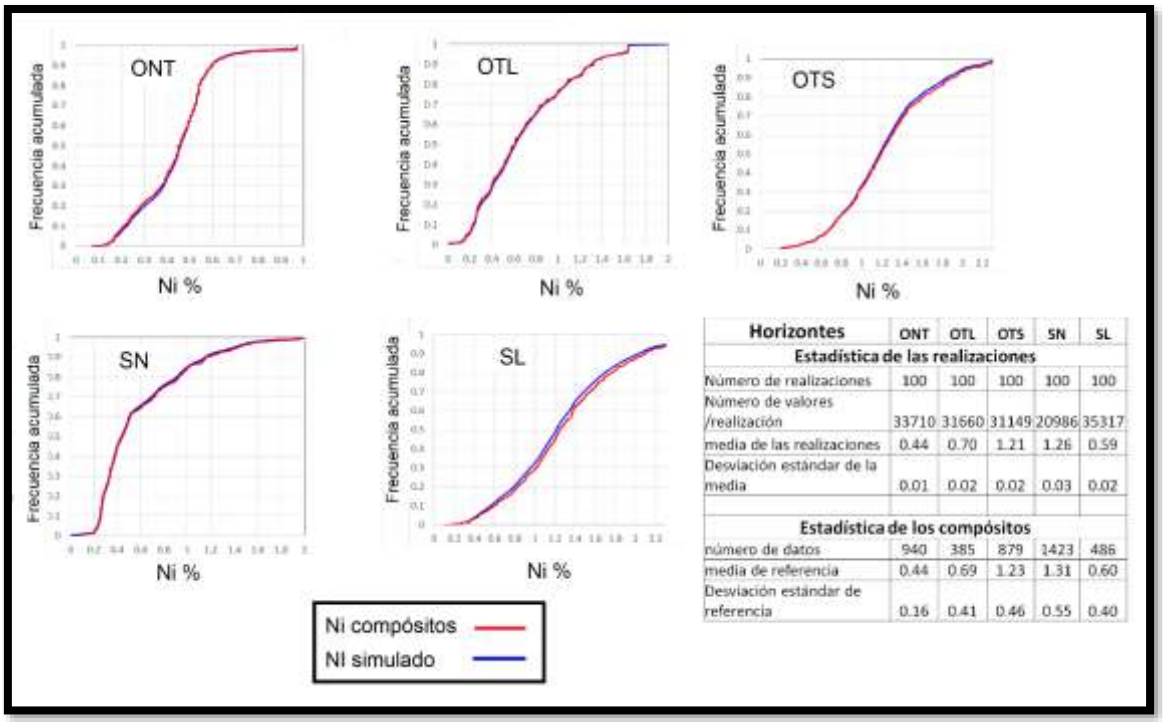


Figura 5. Vista en perspectiva de las realizaciones 1, 15, 57 y 99 de los valores simulados de níquel *versus* datos reales (compósitos).



Horizontes	ONT	OTL	OTS	SN	SL
Estadística de las realizaciones					
Número de realizaciones	100	100	100	100	100
Número de valores /realización	33710	31660	31149	20986	35317
media de las realizaciones	0.44	0.70	1.21	1.26	0.59
Desviación estándar de la media	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02
Estadística de los compósitos					
número de datos	940	385	879	1423	486
media de referencia	0.44	0.69	1.23	1.31	0.60
Desviación estándar de referencia	0.16	0.41	0.46	0.55	0.40

Figura 6. Curvas de frecuencia acumulada y estadígrafos promedios correspondientes de los valores de níquel reales y simulados, por horizontes litológicos de meteorización.

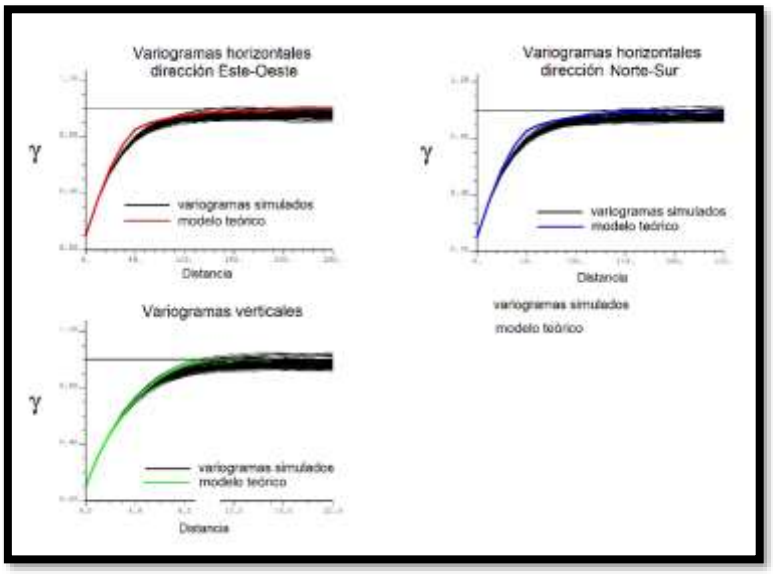


Figura 7. Semi-variogramas gaussianos globales simulados *versus* modelo teórico ajustado (100 escenarios equiprobables).

Como resultado del cálculo de los valores de probabilidad mineral estimados, se establecieron las clases de probabilidad mineral siguientes:

- De probabilidad alta: paneles con valor de probabilidad mayor o igual al 0,8.
- De probabilidad media: paneles con valores de probabilidad entre 0,5 y 0,8.
- De probabilidad baja: paneles con valores de probabilidad entre 0,01 y menores de 0,5.
- No mineral: paneles cuya ley de níquel resultó inferior a la ley de corte para los 100 escenarios equiprobables simulados.

Con base en la clasificación precedente se realizó el modelo de probabilidad mineral en paneles de 25 m x 25 m x 1 m (Figura 8). A partir de los valores medios obtenidos del tonelaje, la cantidad de metal, la ley de níquel e intervalos de confianza que aparecen en la Tabla 2, se elaboraron las gráficas de las Figuras 9, 10 y 11.

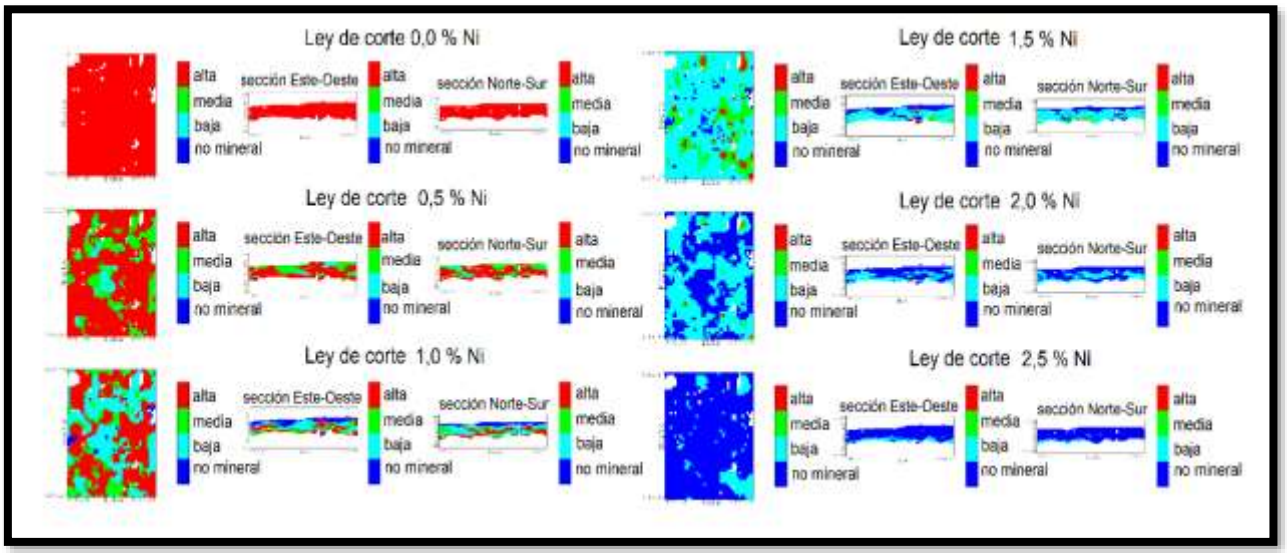


Figura 8. Probabilidad mineral promedio vista a través de secciones y niveles según las clases de probabilidad establecidas de acuerdo con los valores de corte de níquel, en los paneles de 25 m x 25 m x 1 m para 100 escenarios equiprobables.

Tabla 2. Recursos recuperables para el tonelaje, la cantidad de metal y la ley media de níquel con sus respectivos errores medios globales e intervalos de confianza asociados

Parámetro	**Ley de corte Ni (%)**	**Error medio global**	**valor Medio del parámetro**	**valor medio - IC 95%**	**valor medio + IC 95%**
Tonelaje	0,0	0	737	737	737
	0,5	37	515	479	552
	1,0	39	359	320	398
	1,5	54	257	202	311
	2,0	48	219	170	267
	2,5	59	195	136	254
cantidad de metal t x % Ni	0,0	35	550	514	585
	0,5	46	502	455	548
	1,0	63	499	436	562
	1,5	105	456	351	561
	2,0	120	484	364	604
	2,5	173	516	344	689
Ley de Ni	0,0	0,05	0,78	0,74	0,83

%	0,5	0,05	0,93	0,88	0,98
	1,0	0,06	1,33	1,27	1,39
	1,5	0,08	1,75	1,66	1,83
	2,0	0,10	2,20	2,10	2,31
	2,5	0,12	2,64	2,52	2,76

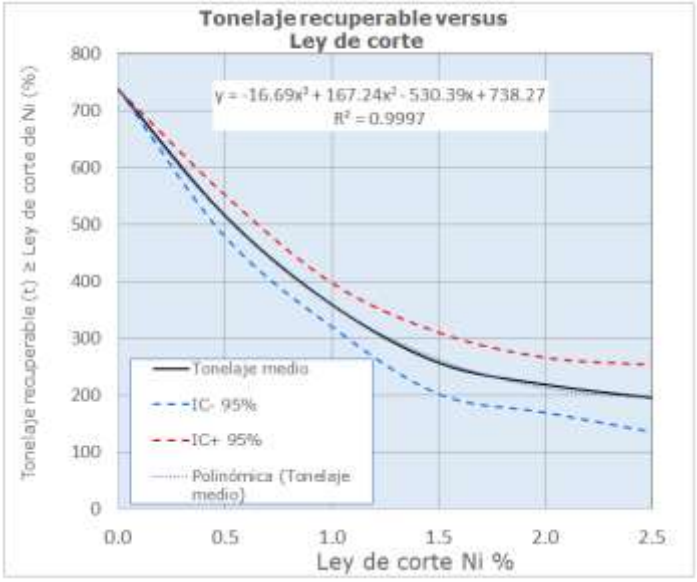


Figura 9. Curvas del tonelaje recuperable e intervalos de confianza *versus* ley de corte de níquel en panel 25 m x 25 m x 1 m.

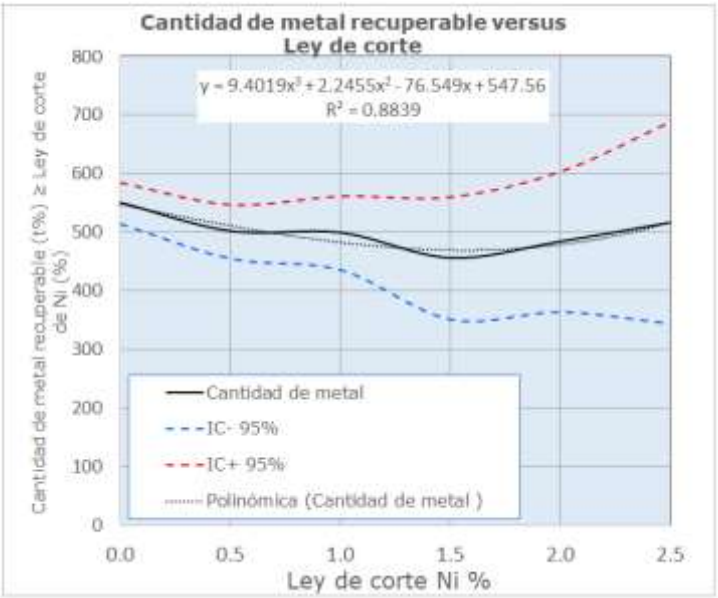


Figura 10. Curvas de la cantidad de metal recuperable e intervalos de confianza *versus* ley de corte de níquel en panel 25 m x 25 m x 1 m.

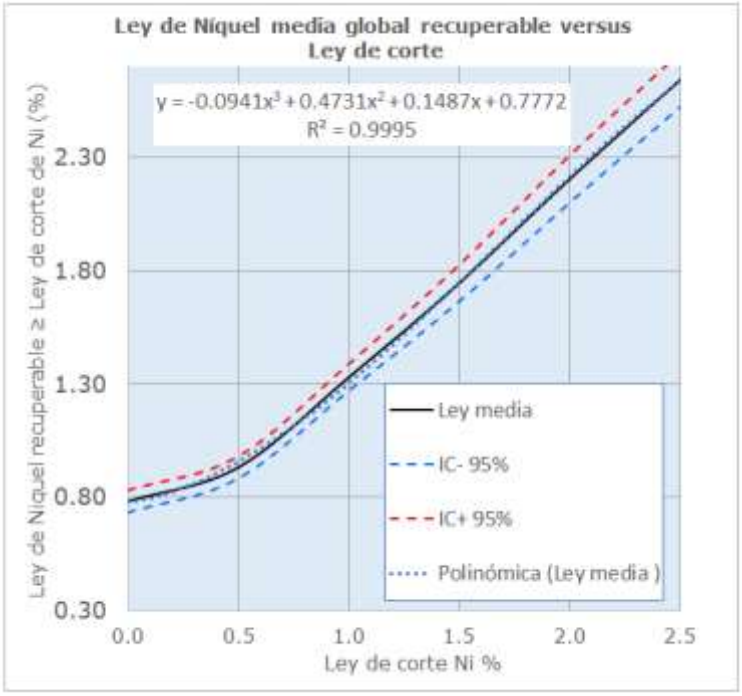


Figura 11. Curvas de la ley media de níquel recuperable e intervalos de confianza, en panel 25 m x 25 m x 1 m *versus* ley de corte de níquel.

4. DISCUSIÓN

El acotamiento de los valores de níquel para los cinco horizontes litológicos de meteorización, permitió establecer los valores de corte basados en el criterio de cambio de la pendiente y el distanciamiento de los puntos en la gráfica por encima del 98 % de probabilidad (Figura 1).

A nivel global los valores de níquel poseen una distribución estadística multimodal, específicamente bimodal del histograma del níquel para toda la corteza de meteorización (Figura 2), con asimétrica positiva, lo que sugiere la mezcla de dos o más poblaciones, exhibiendo dos máximos de frecuencia relativa; el primero asociado a bajos valores de níquel (≈ 0,5 %) y el otro a valores medios (≈ 1,0 %). Cuando los valores de níquel se analizan por horizontes de meteorización, las distribuciones de frecuencia en los ONT, OTS y las SN, se presentan más simétricas, no así para el níquel de los horizontes de los OTL y las SL, donde la asimetría positiva es más evidente, observándose en los gráficos de caja y bigote una separación entre la media y la mediana, así como una disminución de la frecuencia de clases hacia los valores altos.

El análisis de los gráficos de frontera (Figura 3) muestra que los límites entre los horizontes litológicos de meteorización en todos los casos son duros, no

existe transición en el contenido de níquel al traspasar las fronteras entre estos y, por lo tanto, se interpreta que son dominios diferentes.

El análisis estructural realizado a través de los semi-variogramas experimentales calculados (Figura 4) evidencian la existencia de continuidad espacial, tanto en el plano de los horizontes litológicos de meteorización como a través de estos. Existe isotropía en el plano de los horizontes litológicos de meteorización, dado que los alcances ajustados son similares. El alcance en la vertical es menor, evidenciando una transición más rápida a través de esa dirección.

La validación cruzada arrojó que el modelo teórico ajustado logra un grado de predictibilidad aceptable, dado que el error medio entre los valores reales y los estimados se aproxima a cero (0,01) y el coeficiente de correlación lineal es de 0,75.

La simulación gaussiana logró reproducir las características texturales de la mineralización niquelífera, estableciéndose una buena correspondencia espacial de los valores simulados de la variable, con los compósitos utilizados para simular (Figura 5). Desde el punto de vista estadístico, tanto los valores medios obtenidos como las curvas de frecuencia acumulada para níquel de la distribución de referencia (compósitos) y el níquel simulado según los horizontes litológicos de meteorización (Figura 6), son aproximadamente similares, indicando que se logra reproducir satisfactoriamente la estadística. Los semi-variogramas direccionales gaussianos simulados poseen la misma forma y alcances que las curvas teóricas ajustadas a los compósitos (Figura 7).

De acuerdo con la clasificación adoptada basada en los valores medios de probabilidad mineral obtenidos para cada panel de 25 m x 25 m x 1 m, la mayor probabilidad mineral recuperable se alcanza para valores de la ley de corte de níquel inferiores o iguales a 1 % de níquel (Figura 8). Para valores superiores a este existe un predominio de paneles con valores de probabilidad mineral inferiores a 0,50, evidenciando una disminución apreciable del grado de confianza y de la continuidad de la mineralización niquelífera a partir del valor de corte de níquel de 1,0 %. Un valor de probabilidad mineral recuperable óptimo se obtendría para algún valor de corte de la ley de níquel ubicado entre los valores de corte de 1,0 %-1,5 % de níquel.

A medida que el valor de corte de níquel se incrementa, la probabilidad mineral estimada de los recursos recuperables disminuye. Cuando se utiliza un valor de corte de níquel igual a 0 %, la probabilidad mineral recuperable se maximiza, existe un predominio casi absoluto de los paneles con alta probabilidad mineral, dado que se consideran como recursos recuperables,

todos los paneles. Cuando la ley de corte de níquel es igual a 2,5 %, la probabilidad de los recursos recuperables se minimiza, existiendo un predominio de paneles no minerales. El escenario medio de probabilidad mineral recuperable se alcanza cuando para la ley de corte igual a 1,0 % de níquel.

Más arriba, en la Tabla 2, se presentan las cifras estimadas de los recursos recuperables globales obtenidos por leyes de corte, calculados con un nivel de significación del 95 % de probabilidad para un panel de dimensiones 25 m x 25 m x 1 m. De acuerdo con las cifras obtenidas, el tonelaje mineral recuperable para el panel oscila entre 195 tm y 737 tm, con error entre 0 tm y 59 tm. Para la cantidad de metal, los valores medios obtenidos oscilan entre 516 tm a 550 tm por porcentaje de níquel, con un error entre 35 tm a 173 tm por porcentaje. Por su parte, para la ley media de níquel se estimaron valores de níquel entre 0,46 % y 3,16 %, con errores entre 0,05 % y 0,12 %.

Según se observa en los gráficos de las Figuras 9, 10 y 11, la incertidumbre, tanto del tonelaje, la cantidad de metal y la ley media recuperables, se incrementan gradualmente desde el valor de corte 0 % de níquel al valor de corte de 2,5 % de níquel. A juzgar por el incremento de la amplitud de los intervalos de confianza obtenidos a partir de los errores medios computados, esto se debe al decrecimiento drástico de la cantidad de paneles con leyes altas simuladas (iguales o superiores a 1,5 % de níquel), que influye en que los valores de probabilidad t de Student se incrementen en el cálculo del error, como consecuencia de la baja proporción de compósitos con altas leyes usados como datos primarios en el proceso de simulación. Todo esto implica un alto riesgo con un impacto negativo para la minería.

El ajuste polinomial realizado a las curvas experimentales del tonelaje, la de cantidad de metal y la ley media, recuperables, es significativo, dado los valores obtenidos del coeficiente de determinación, R2 en todos los casos supera el valor de 0,88, lo que significa que los modelos ajustados explican suficientemente la variación de los parámetros estimados, de utilidad para realizar predicciones para otros valores de corte de la ley de níquel.

Previamente, en el yacimiento San Felipe se realizaron estimados globales determinísticos por métodos de estimación no lineales, para determinar los recursos recuperables. Primeramente, por Rodríguez et al. (2001) y, posteriormente, por Horton y Lipton (2002); estos últimos autores recomendaron utilizar la simulación condicional geoestadística en una o varias áreas del yacimiento, para estudiar las relaciones entre esas unidades de selección minera, el método de minado y la tasa de producción.

Es por ello que la metodología y los resultados de la presente investigación constituyen una novedad en la aplicación de la simulación condicional geoestadística a la determinación del potencial de los recursos recuperables en el yacimiento San Felipe.

5. CONCLUSIONES

- La aplicación de la Simulación Secuencial Gaussiana (SGS) con cambio de soporte demuestra ser efectiva para predecir recursos recuperables en el depósito San Felipe, reproduciendo fielmente la estadística (histogramas), continuidad espacial (variogramas) y heterogeneidad geológica de la mineralización niquelífera. Los 100 escenarios equiprobables permitieron cuantificar incertidumbre, un avance frente a estudios previos basados en estimación tradicional determinística.

- Al variar la ley de corte sobre un determinado soporte de estimación, se produce un efecto en los recursos recuperables: a medida que se incrementa la ley de corte, el tonelaje disminuye; contrariamente sucede con la ley media de níquel, la cual se incrementa, no obstante, la incertidumbre probabilística se acrecienta, por lo tanto:

- La ley de corte incide directamente en los parámetros mineros; al aumentarla, el tonelaje disminuye porque solo se seleccionan bloques de alta ley, mientras que la ley media crece por el efecto de truncamiento estadístico. Sin embargo, la incertidumbre se amplifica en leyes altas (>1,5 % Ni) debido a la menor densidad de datos y la heterogeneidad geológica.

- El tonelaje y metal recuperable disminuyen al incrementar la ley de corte (de 737 t a 195 t y de 550 t·% a 516 t·% para cortes de 0 % a 2,5 % Ni, respectivamente). La ley media aumenta (de 0,78 % Ni a 2,64% Ni), pero con mayor incertidumbre (error medio crece de ±0,05% a ±0,12% Ni). Esto refleja la escasez de datos de alta ley y selectividad requerida.

- Por ende, para maximizar el beneficio económico recomendamos una ley de corte entre 1,0 % y 1,5 % Ni, donde se equilibran tonelaje recuperable, ley media y riesgo operativo, dada la incertidumbre obtenida.

- Consideramos que los resultados alcanzados podrían ser mejorados con un mayor nivel de información geológica. La densidad de la red de exploración actual en el sector caso de estudio y en las zonas perspectivas del depósito San Felipe es 100 m x 100 m, lo que resulta insuficiente para captar las estructuras de la mineralización niquelífera

y variabilidad de la ley a pequeña escala, lo cual impide que, a escala local, se obtengan recursos recuperables con mayor grado de certidumbre. Se recomienda incrementar la densidad de la red de exploración, sobre todo, en zonas menos densamente perforadas.

- Estudios futuros deberán ser realizados para incorporar la información de los semi-variogramas por horizonte (no solo globales) para refinar la simulación. Los resultados obtenidos definen los recursos que pueden ser recuperados en el sector objeto de investigación en el momento de la explotación minera. La metodología desarrollada en el presente trabajo es transferible a otros depósitos lateríticos con características geológicas similares, por lo que recomendamos su empleo futuro.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a *Commercial Caribbean Nickel S.A.,* concesionaria del depósito de Níquel de San Felipe, por permitirnos utilizar la información correspondiente del área caso de estudio para la realización del presente trabajo y a la Oficina Nacional de Recursos Minerales por el apoyo brindado para llevar a buen término su publicación.

7. REFERENCIAS

Artica, C. (2023). Comparison of two quantitative mineral resource classification methods – a case study from a large copper porphyry-skarn deposit. *Mineral Resource Estimation Conference 2023*. Perth, Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 166-178. Publication Series No 2/2023, ISBN 978-1-922395-14-6. Consultado: 17/02/2025. Disponible en: https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/mineral-resource-estimation-conference-proceedings-2023/comparison-of-two-quantitative-mineral-resource-classification-methods--a-case-study-from-a-large-copper-porphyry-skarn-deposit/.

Chang-Rodríguez, A. y Rojas-Purón, A. L. (2018). Movilidad geoquímica y grado de meteorización del yacimiento San Felipe, Camagüey, Cuba. *Minería y Geología*, *34*(2), 122-135. Consultado: 17/02/2025. Disponible en: https://www.redalyc.org/journal/2235/223554994001/html/.

Chica-Olmo, M. (1987). *Análisis Geoestadístico en el Estudio de la Explotación de Recursos Minerales*. (Tesis doctoral, España).

Cobas-Botey, R. M. (2017). *Modelo geológico descriptivo de las lateritas ferroniquelíferas del depósito San Felipe, Camagüey, Cuba*. (Tesis doctoral, Universidad de Moa).

Cobas-Botey, R. M., Formell-Cortina, F. Y., Leyva-Rodríguez, C. A. (2017). Modelo geológico descriptivo del yacimiento laterítico San Felipe, Camaguey, Cuba. *Minería y Geología*, *33*(3), 251-265. Consultado: 17/02/2024. Disponible en: https://www.redalyc.org/journal/2235/223551846001/html/.

Deutsch, C. V. y Journel, A. G. (1998). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. S.l.: Oxford University Press. Applied geostatistics series, ISBN 978-0-19-510015-0. Consultado: 17/02/2025. Disponible en: https://books.google.com.cu/books?id=CNd6QgAACAAJ.

Gallardo, T., Chang, A., Tauler, E. Y Proenza, J. (2010). El yacimiento de San Felipe (Camagüey, Cuba): un ejemplo de lateritas niquelíferas tipo arcilla. *Macla*, *13*, 87-88.

Kapageridis, I., Apostolikas, A. Y., Kamaris, G. (2021). Contact Profile Analysis of Resource Estimation Domains: A Case Study on a Laterite Nickel Deposit. *Materials Proceedings*, *5*(1), 89. Consultado: 26/05/2025. Disponible en: https://www.mdpi.com/2673-4605/5/1/89.

Murphy, M., Parker, H., Ross, A. y AUDET, M. A. (2005). Ore-Thickness and Nickel Grade Resource Confidence at the Koniambo Nickel Laterite (A Conditional Simulation Voyage of Discovery). En: O. Leuangthong y C. V. Deutsch (eds.), *Geostatistics Banff 2004*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 469-478. ISBN 978-1-4020-3610-1. Consultado: 17/02/2025. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3610-1_47.

Neufeld, C. y Leuangthong, O. (2005). The Calculation of Recoverable Reserves. Centre for Computational Geostatistics Department of Civil and Environmental Engineering University of Alberta, no. 301. Consultado: 26/05/2025. Disponible en: https://www.ccgalberta.com/ccgresources/report07/2005-301-recoverable_reserves.pdf.

Remy, N., Boucher, A. y Wu, J. (2009). Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide. *Mathematical Geosciences*, *41*(3), 353-356. ISSN 1874-8953. DOI 10.1007/s11004-009-9217-5.

Remy, N., Boucher, A., Wu, J., Ting, L., Maharaja, A. y Gupta, R. (2011). *SGeMS*. C++. 1 septiembre 2011. S.l.: Advanced Resources & Risk

Technology, LLC. Consultado: 26/05/2025. Disponible en: http://www.ar2tech.com.

Richmond, A. (2013). Conditional Simulation of a Nickel Laterite Deposit using Unfolding. *APCOM 2013*. S.l.: s.n., pp. 6. Consultado: 17/02/2024. Disponible en: https://martlet.com.au/wp-content/uploads/2020/08/2013_APCOM_Richmond_Conditional_Simulation_of_nickel_laterite_deposit_using_unfolding.pdf.

Rodríguez, C., Rivers, C., Parianos, J., Mwasinga, P., Potter, S. y Coombes, J. (2001). Mineral Resource Estimate of the San Felipe deposit. Technical Report. S.l.: bhpbillinton. 1966/009633/06. ONRM.

Rodríguez-Catalá, A. y Rodríguez-Infante, A. (2021). Sistema de fallas del yacimiento laterítico niquelífero San Felipe, Camagüey, Cuba. *Minería y Geología*, *37*(2), 162-180. ISSN 1993-8012. Consultado: 28/02/2024. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1993-80122021000200162&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

Rossi, M. E. y Deutsch, C. (2014). *Mineral Resource Estimation*. Springer Dordrecht Heidelberg New York London. ISBN 978-1-4020-5716-8. Consultado: 26/05/2025. Disponible en: www.springer.com.

Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. (2006). *Applied mineral inventory estimation*. Cambridge University Press.

Sterk, R., De Jong, K., Partington, G., Kerkvliet, S. y Van De Ven, M. (2019). Domaining in Mineral Resource Estimation: A Stock-Take of 2019 Common Practice. *Kenex*. 25 noviembre 2019. pp. 13. Consultado: 19/02/2025. Disponible en: https://kenex.com.au/company/publications/.

Webster, R. y Oliver, M. A. (2007). Cross-Validation. *Geostatistics for Environmental Scientists*. Second Edition. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-02858-2. Consultado: 19/02/2025. Disponible en: www.wiley.com.

Yamamoto, J. K. (1999). Quantification of uncertainty in ore-reserve estimation: Applications to Chapada copper deposit, State of Goiás, Brazil. *Natural Resources Research*, *8*(2), 153-163.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

JAAT: conceptualización y procesamiento geoestadístico, redactor principal del manuscrito. ACP: supervisor, diseño de la investigación, redacción final. EEC: supervisor, diseño de la investigación; revisor del procesamiento y corredactor de la información geoestadística y de las figuras, gráficos y tablas. RMCB: corredactora de parte geológica del depósito "San Felipe", revisión de la terminología empleada.

ORCID

JAAT, https://orcid.org/0000-000106879-4626

ACP, https://orcid.org/0000-0002-6841-8086

EEC, https://orcid.org/0000-0001-7311-8382

RMCB, https://orcid.org/0009-0004-1178-3781

Recibido:29/05/2025

Aceptado:15/07/2015