



# UTILIZACION DE LA GEOESTADISTICA PARA LA MODELACION GEOLOGO- GEOTECNOLOGICA DE UN SECTOR DEL YACIMIENTO DE CIENOS CARBONATADOS MARINOS DEL SUR DE CAYO MOA GRANDE

**Idoris Alfonso Santiesteban** <sup>(1)</sup>, **Gustavo Godines Barrera** <sup>(1)</sup>, **Elmidio Estéves Cruz** <sup>(2)</sup>

(1) Empresa GEOCUBA Estudios Marinos, Punta santa Catalina S/N, Regla, Ciudad de la Habana, Cuba, email.: [idoris@emarinos.geocuba.cu](mailto:idoris@emarinos.geocuba.cu)

(2) Universidad de Pinar del Río, Martí 270, Pinar del Río, Cuba, email.: [estevez@geo.upr.edu.cu](mailto:estevez@geo.upr.edu.cu)

## RESUMEN

El empleo de la geoestadística constituye una herramienta fundamental en la caracterización de los recursos y reservas para la industria minera ya que permite buscar el mejor estimador que minimice la varianza del error de estimación. Con el objetivo de realizar el estudio y cuantificación de la variabilidad espacial de los parámetros que caracterizan tanto los Recursos como las Reservas de un sector del yacimiento de cienos carbonatados marinos situado al sur de Cayo Moa Grande, en la Provincia de Holguín, se ejecuta este análisis en 3 pasos fundamentales: 1. Preparación de las bases de datos con la información de los ensayos básicos que caracterizan la materia prima mineral y que determinan cuantitativamente las características geológicas y químicas fundamentales del yacimiento (contenido de CaCO<sub>3</sub> en su estado natural y granulometría), 2. Análisis estadístico y 3. Análisis estructural o estudio variográfico. Todo el procesamiento fue ejecutado en ILWIS el cual es un sistema integrado en formato SIG con capacidades para el procesamiento geoestadístico.

Como resultado del trabajo se evidencia la continuidad espacial en la mineralización con un determinado nivel de anisotropía geométrica, lo cual permite realizar la predicción por estimación empleando el método de Kriging adecuadamente. Sin embargo en los casos de los espesores tanto de los Recursos como de las Reservas de este sector del yacimiento, la variografía no refleja los mismos resultados, y aparece una anisotropía zonal, lo cual está condicionado a los requerimientos de la mineralización a partir de un contenido de CaCO<sub>3</sub> elevado en relación al contenido medio natural del depósito, condiciones que hacen que la variabilidad (en ubicación y espesores de la mineralización útil) sea mayor. Con estos resultados fue posible la creación de los modelos geológicos (Predicción por estimación) para el cálculo de los volúmenes de recursos y reservas).

## ABSTRACT

The use of Geostatistics constitutes a fundamental tool in the characterization of Reserve and Resource for mining industry because it allows searching the best estimator that minimizes the variance of the estimation error. In order to study and quantify the spatial variability of the parameters which characterize the reserve and resource in a sector of the marine carbonate deposits located to the south of Moa Grande cay, Holguín, the analysis is carry out in 3 fundamental steps: 1. Preparation of database with the basic laboratory information that characterize the mineral and quantify the chemistry and geological characteristics of the deposit (CaCO<sub>3</sub> in natural state and grain size), 2. Statistical analysis, and 3. Structural analysis or variography study. The whole processing has been performed in ILWIS which is an integrated system in GIS format with capabilities for geostatistical processing.

As result of the work, the spatial variability in the mineralization was evidenced with the presence of geometric anisotropy, which permitted to achieve the prediction by estimation using Kriging properly. Nevertheless, in the case of the thickness of the reserve as well as resource, variogrphy do not show the same results because of the presence of a zonal anisotropy, which is conditioned to the mineralization requirements with a high CaCO<sub>3</sub> content in relation to the natural content of the deposit, and therefore variability (in location and thickness of the useful mineral) is higher. With these results it was possible to create geological models (prediction by estimation) and calculate the volumes of reserve and resource.

## INTRODUCCIÓN



El presente trabajo forma parte del estudio del yacimiento de cienos carbonatados en el sector de Oeste II de la concepción minera Moa níckel S.A (MNSA) "Pedro Soto Alba", estudio que tuvo la finalidad de obtener la estimación de los Recursos y Reservas probadas como parte de los trabajos de perforación e interpretación geológica para la caracterización integral de un sector del yacimiento de Cienos Carbonatados Marinos situado al Sur de Cayo Moa Grande, Provincia de Holguín (Figura 1). Y sobre esta base desarrollar un proyecto de explotación de las Reservas de este sector.



**Figura 1 Ubicación del sector de estudio**

El empleo de la geoestadística constituye una herramienta fundamental en la caracterización de los recursos y reservas para la industria minera ya que permite buscar el mejor estimador que minimice la varianza del error de estimación. A diferencia de otros métodos de interpolación, el krigeaje utiliza en la estimación las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado por lo que su uso implica un análisis previo de la información con el objetivo de definir o extraer de esta información inicial un modelo que represente su continuidad espacial.

Con el objetivo de realizar el estudio y cuantificación de la variabilidad espacial de los parámetros que caracterizan tanto los Recursos como las Reservas del sector de estudio, se ejecuta este análisis en 3 pasos fundamentales: 1. Preparación de las bases de datos con la información de los ensayos básicos que caracterizan la materia prima mineral y que determinan cuantitativamente las características geológicas y químicas fundamentales del yacimiento (contenido de  $\text{CaCO}_3$  en su estado natural y granulometría), 2. Análisis estadístico y 3. Análisis estructural o estudio variográfico.

Todo el procesamiento fue ejecutado en ILWIS el cual es un sistema integrado en formato SIG con capacidades para el procesamiento geoestadístico con ventajas en cuanto a las dependencias que permite crear entre los datos de atributos (tablas) y los diferentes mapas tanto de entradas como los creados a partir de los análisis de la geoinformación. ILWIS dispone de las herramientas necesarias para la estimación 2D, desde el estudio de posibles anisotropías hasta la creación de los modelos y cálculos de volúmenes.

Por razones de confidencialidad con el cliente, en el presente trabajo no son presentados los modelos obtenidos en los análisis así como los estimados tanto de los recursos como de las reservas del sector estudiado.



## MATERIALES Y MÉTODOS

Todo el procesamiento fue ejecutado en ILWIS el cual es un sistema integrado en formato SIG con capacidades para el procesamiento geoestadístico con ventajas en cuanto a las dependencias que permite crear entre los datos de atributos (tablas) y los diferentes mapas tanto de entradas como los creados a partir de los análisis de la geoinformación. ILWIS dispone de las herramientas necesarias para la estimación 2D, desde el estudio de posibles anisotropías hasta la creación de los modelos y cálculos de volúmenes.

El procesamiento específico para la estimación de los Recursos y Reservas desarrolló los siguientes pasos de forma general:

1. Preparación de las bases de datos con la información básica primaria.
2. Corrección de los datos y eliminación de la información incompatible.
3. Creación de los compósitos de acuerdo a los parámetros tecnológicos requeridos.
4. Análisis estadístico y geoestadístico.
5. Creación de los modelos geológicos. (Predicción por estimación empleando el método de Krigging).
6. Cálculo de los volúmenes de Recursos y Reservas.

### 1. Preparación de las bases de datos con la información básica primaria.

La preparación de las bases de datos con la información básica consistió en la transcripción y compilación de los datos obtenidos de los laboratorios en formato Excel conjuntamente con los datos generales de número de pozo, ubicación geográfica y cota batimétrica de cada pozo, quedando establecidas las siguientes tablas de bases de datos básicas:

- Tabla con los identificadores de cada pozo, coordenadas y cota batimétrica.
- Tabla con los resultados de los ensayos granulométricos, de CaCO<sub>3</sub> natural y pesos volumétricos para todas las muestras de cada pozo.

### 2. Corrección de los datos y eliminación de la información incompatible.

En esta etapa de trabajo se realizó la revisión de los posibles errores humanos que pudieran existir en las bases de datos primarias, de los valores anómalos y la eliminación de las muestras duplicadas en los pozos como consecuencia de los controles internos realizados. Posterior a esto, se verificaron los intervalos de cada muestra en correspondencia con los intervalos reales de las columnas litológicas de campo, eliminando de esta manera los intervalos muestreados, que no pertenecen propiamente al material carbonatado tales como arcillas, turba, arenas densas con fragmentos de roca o coral y caliza, que conforman el piso del corte geológico.

### 3. Creación de los compósitos de acuerdo a los parámetros requeridos.

Una vez creadas las bases adecuadamente, se procedió a la determinación de los intervalos que cumplieran con las condiciones de Recurso. Teniendo en cuenta que el concepto de Recurso abarca todo el sedimento cuya concentración de CaCO<sub>3</sub> natural esté por encima de 87 % sin considerar sus otras condiciones tecnológicas. Se creó una base de datos para ello la cual conformó la base de los análisis posteriores en la determinación de los Recursos y Reservas.

A partir de la base de los Recursos, se determinaron los intervalos y pozos que cumplieran con los parámetros granulométricos de malla 100 y malla -325 para la determinación de las Reservas. Teniendo en cuenta que la minería se realiza de arriba hacia abajo hasta el piso del yacimiento (sin destape), para el análisis de las Reservas se decidió calcular en cada pozo, un compósito para el intervalo productivo, ponderando los espesores de las muestras desde abajo hacia arriba, partiendo como límite inferior, desde una muestra en profundidad que cumpla los parámetros tecnológicos y como límite superior hasta donde se cumplan las exigencias tecnológicas de la ponderación, incluyendo las intercalaciones no condicionadas. La cobertura estéril del cieno terrígeno, así como, la



de ceno carbonatado que no se considera Recurso fue incorporada solo para la evaluación de las condiciones minero-técnicas en la determinación de las Reservas, como será explicado con posterioridad en este informe.

Como resultado de los compósitos se crearon en ILWIS dos tablas de análisis: Una para Recursos y otra para Reservas, donde para cada identificador de pozo el cual constituye el link entre las tablas, aparecen los promedios ponderados de los siguientes parámetros:

1. % en Malla 100.
2. % en Malla -325.
3. % en Malla 20.
4. % de CaCO<sub>3</sub> natural.
5. Peso volumétrico.
6. Espesor del intervalo productivo.

#### 4. Análisis Estadístico y Geoestadístico:

Este análisis consistió de dos fases de trabajo:

- Análisis exploratorio de los datos (Estadística descriptiva).
- Análisis estructural o estudio variográfico.

##### 4.1 *Análisis exploratorio de los datos (Estadística descriptiva).*

Este análisis inicial se realizó para el conocimiento de las distribuciones de las muestras tanto de los datos originales como compositados, permitiendo examinar las relaciones de los datos, muestras anómalas, comparar medias y distribuciones y tener una idea inicial de variabilidad. Consistió en el cálculo de los estadígrafos de cada variable analizada y la construcción de los histogramas. Este procesamiento se llevó a cabo en *Grapher 4.0*.

##### 4.2 *Análisis estructural o estudio variográfico*

El objetivo de este estudio fue el de caracterizar la variabilidad espacial de los parámetros medidos tanto para los Recursos como para las Reservas, identificando las direcciones principales de continuidad. El análisis estructural fue llevado a cabo solamente para las muestras en las poblaciones compositadas (Recursos y Reservas) y consistió en el cálculo y modelación de los Semivariogramas experimentales. Todo el procesamiento fue realizado en ILWIS.

Para el cálculo y modelación de los Semivariogramas experimentales se realizaron los siguientes pasos:

- Creación de los mapas de puntos de las diferentes variables.
- Creación de los Semivariogramas de superficie.
- Cálculo de los Semivariogramas experimentales (omnidireccional y direccionales).
- Ajuste a los modelos teóricos.

##### *Creación de los mapas de puntos de las diferentes variables*

La creación de mapas de puntos es el primer paso para realizar un análisis estructural en ILWIS. A partir de las tablas de resultados de los compósitos realizados para cada pozo, fueron creados los mapas de puntos de las diferentes variables tanto para los Recursos como para las Reservas.

A partir de estos mapas (Malla 100, malla -325, CaCO<sub>3</sub>, potencia útil, etc.) se llevó a cabo el estudio variográfico.

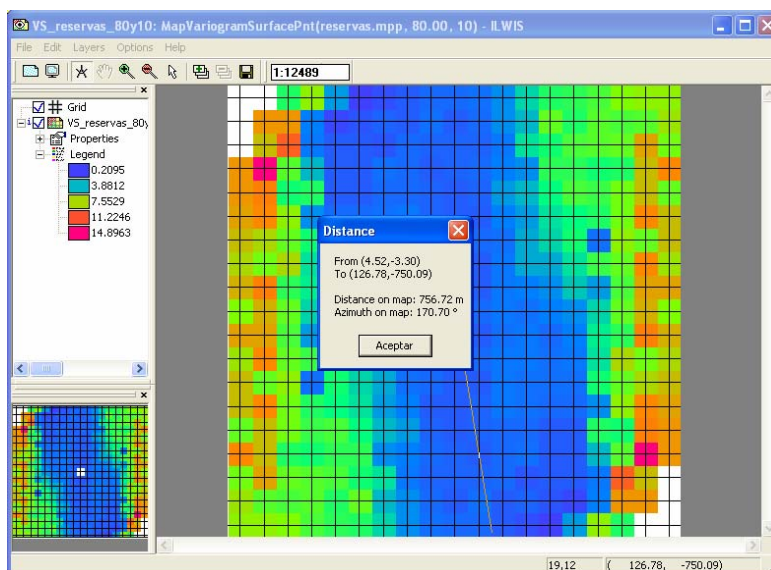
##### *Creación del Variograma de superficie*

Cuando la variabilidad bajo estudio no es la misma en todas las direcciones, estamos en presencia de anisotropía. El sistema ILWIS dispone de una herramienta (*Variograma de Superficie*), que de forma similar a la elipse de anisotropía, permite visualizar y determinar de una forma rápida, la dirección del eje de la anisotropía. En esta operación se introducen como entradas: el mapa de puntos de la variable que se analiza, el tamaño de las clases de distancias (lags) y el número de lags o intervalos.



El ángulo o dirección del eje anisotrópico obtenido a partir del Variograma de superficie es la dirección de menor variabilidad que se emplea entonces en los cálculos de los semivariogramas direccionales.

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de Variograma de Superficie calculado en ILWIS para la determinación de anisotropía. En la figura se observa la tendencia en forma de elipse (en color azul) desde el centro del mapa (blanco), de los valores del semivariograma del parámetro analizado, que indican la dirección de menor variabilidad o de rangos mayores. En la dirección perpendicular se observa claramente un aumento de la variabilidad (desde azul, a verde o rojos), acorde a la dirección de semivariogramas de rango menor.



**Figura 2** Ejemplo de Variograma de Superficie calculado en ILWIS para la determinación de anisotropía en la potencia de Reservas.

#### *Cálculo de los Semivariogramas experimentales y ajustes de modelos teóricos.*

Posterior a la determinación de anisotropías mediante el Variograma de Superficie, se realizan los cálculos de los Semivariogramas experimentales; global y en las direcciones determinadas, de máxima y mínima variación. Los semivariogramas globales se realizan como un paso previo al cálculo y modelación de los semivariogramas experimentales direccionales con el objetivo de tener una idea de los valores de varianza de las poblaciones. Los semivariogramas direccionales fueron calculados con un intervalo de clases de distancias lag de 70 m, el cual fue seleccionado sobre la base del espaciamiento promedio entre pozos. El ángulo para los semivariogramas direccionales fue determinado a partir de los Variogramas de superficie para cada variable analizada. En este análisis variográfico, luego de introducir el espaciamiento entre intervalos de clases y la dirección del eje anisotrópico, el sistema calcula los semivariogramas en la dirección de menor variación y en la ortogonal a ella (la de mayor variabilidad). A estos semivariogramas experimentales se ajustaron los modelos teóricos para la determinación de los parámetros del estimador Krigging (Tipo de modelo teórico, Rango, Meseta y Efecto de Pepita (o Nugget)).

#### **5. Creación de los modelos geológicos (Predicción por estimación empleando el método de Krigging)**

El Krigging en ILWIS es un interpolador que a partir de un mapa de puntos como fuente de entrada, retorna a un mapa raster ya con estimaciones. Las estimaciones son valores de puntos de entrada ponderados. Los factores de peso en krigging son determinados a partir del modelo de



semivariograma utilizado y la distribución de los puntos de entrada, y son calculados de forma tal que minimicen el error de la estimación en cada píxel de salida. Los valores estimados son por lo tanto una combinación de los valores de entrada y tienen un error de estimación mínimo.

El estimador empleado en la mayoría de los análisis realizados en este estudio fue el Krigging anisotrópico (variante del ordinario en presencia de semivariogramas con rangos diferentes según las direcciones). Los resultados del ajuste de los modelos matemáticos en los semivariogramas experimentales (Rango, Meseta, efecto Nugget y tipo de modelo teórico), así como, el radio anisotrópico, fueron introducidos para este estimador en cada caso, de la estimación interpolada quedaron establecidos los modelos geológicos tanto para Recursos como las Reservas.

## 6. Cálculo de los volúmenes de Recursos y Reservas.

Ya creados los modelos de los cuerpos, se procedió a realizar el cálculo de los volúmenes. El procedimiento para ello consistió inicialmente en definir los límites de los bloques de Recursos y Reservas. (De acuerdo a las leyes de corte de los parámetros tecnológicos y ajustes de las condiciones minero-técnicas).

Para la definición de los bloques se tuvieron en cuenta los siguientes criterios primarios:

1. En el caso donde el punto medio entre un pozo productivo y un no productivo estuviera por dentro del límite de la estimación geoestadística (interpolación) de la potencia del espesor útil, la frontera se escoge siguiendo las líneas de unión a la mitad entre el pozo productivo y el no productivo (ínter contorno).
2. En el caso donde el punto medio entre un pozo productivo y un no productivo estuviera por fuera del límite de la estimación geoestadística, la frontera se escoge en el propio pozo productivo (contorno interno).

Estos criterios primarios de trazado de los bloques, se complementaron y ajustaron para los Recursos con los límites estimados del cut-off en la distribución de carbonatos y para las Reservas con los límites en las distribuciones de malla 100, malla -325, cieno terrígeno y de cobertura estéril de cienos carbonatados. Se tuvo en cuenta además el cumplimiento de las condiciones minero-técnicas para cada pozo, considerando diferenciadamente el estéril carbonatado superior y el terrígeno.

Con este procedimiento se logró que los límites trazados (por las líneas de unión entre pozos productivos o por la línea de la unión de las áreas de influencia de cada pozo productivo); siempre estén dentro de los cuerpos definidos por los contornos establecidos en la estimación geoestadística realizada. Al regularizar los bloques, y tener en cuenta la extensión del área por los taludes de explotación, resulta factible no sobrepasar los contornos de las Reservas de forma general y de esta forma considerar disminuido el efecto de empobrecimiento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

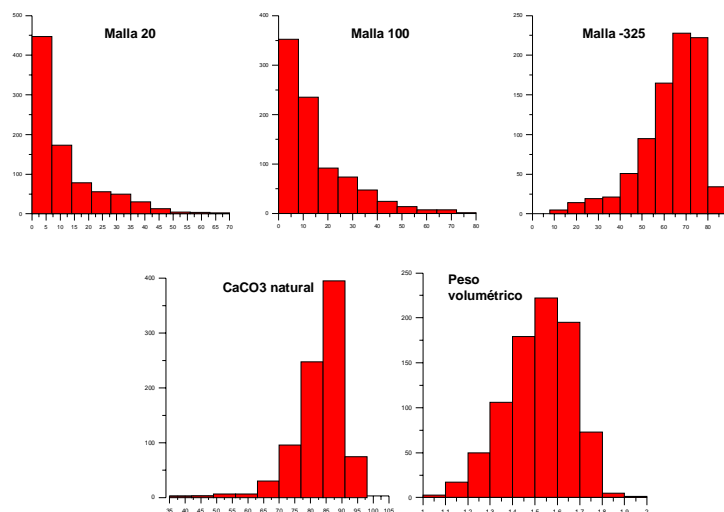
Los resultados de la estadística básica mediante el cálculo de los estadígrafos de cada variable analizada y la construcción de los histogramas nos permitió tener un conocimiento de las distribuciones de las muestras tanto de los datos originales como de los compositados, permitiendo examinar las relaciones de los datos, muestras anómalas, comparar medias y distribuciones y tener una idea inicial de variabilidad. La **Tabla I** muestra los principales estadígrafos de los distintos parámetros en las muestras originales.

**Tabla I** Estadística descriptiva de las poblaciones originales



	M 20 (%)	M 100 (%)	M -325 (%)	CaCO <sub>3</sub> Natural (%)	Peso Volumétrico (Tn/m <sup>3</sup> )
Número de datos	859	860	860	859	852
Mínimo	0,174	0,645	9	35,566	1,085
Máximo	77,357	82,766	97,462	95,944	2,359
Rango	77,183	82,120	88,462	60,377	1,274
Media	11,85	15,37	63,336	83,164	1,52
Mediana	6,643	9,15	66,284	84,574	1,533
1 <sup>er</sup> cuartil	3,903	6,305	56,688	79,802	1,427
3 <sup>er</sup> cuartil	16,04	20,83	73,497	88,431	1,624
Error Standard	0,413	0,474	0,48	0,260	0,005
Varianza	146,5	193,2	198,14	58,123	0,021
Desviación Standard	12,1	13,9	14,076	7,623	0,147
Coefficiente. de variación	1,021	0,904	0,222	0,091	0,097
Asimetría	1,825	1,85	-1,133	-1,869	-0,176
Kurtosis	3,533	3,591	1,541	6,066	0,888
Kolmogorov - Smirnov stat	0,223	0,203	0,091	0,101	0,041
Critical K-S stat, alpha=.10	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042
Critical K-S stat, alpha=.05	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046
Critical K-S stat, alpha=.01	0,055	0,055	0,055	0,055	0,056

Como se deduce de la prueba K-S ninguna de las variables se distribuye de una forma normal totalmente, las variables Malla 20 y Malla 100 son asimétricas positivas y poseen coeficientes de variación mayor y cercano a 1 respectivamente, lo cual refleja su alta variabilidad. El peso volumétrico, de menor variabilidad forma una distribución más simétrica, la media y la mediana de este parámetro toman valores próximos; algo cercanos también en los carbonatos y Malla -325 lo cual puede observarse en el gráfico de la Figura 3.



**Figura 3 Histogramas de los principales parámetros (muestras originales).**

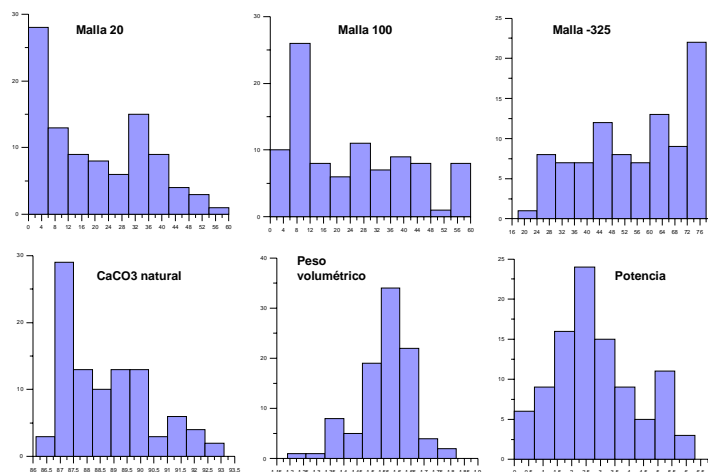


Figura 4 Histogramas de los principales parámetros de las muestras compositadas en los Recursos.

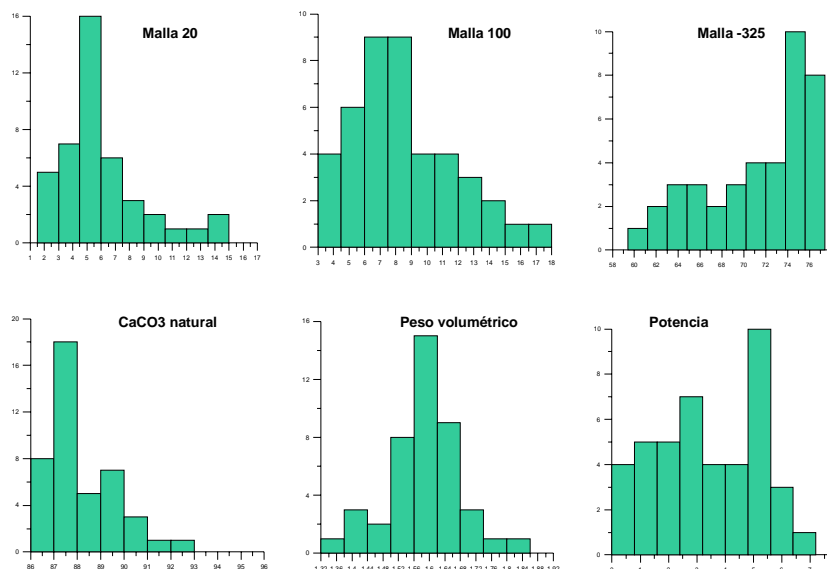


Figura 5 Histogramas de los principales parámetros de las muestras compositadas en las Reservas.

En las Tablas II y III se muestran los principales estadígrafos de los parámetros en las muestras para distribuciones ya compositadas como se refirió anteriormente, tanto para los Recursos como para las Reservas. En el caso de los Recursos disminuye considerablemente la variabilidad del  $\text{CaCO}_3$  natural lo cual se manifiesta en la disminución de la varianza y el coeficiente de variación como consecuencia del proceso de regularización. Los histogramas de Malla 20 y 100, con los mayores coeficientes de variación, muestran distribuciones con indicios de bimodalidad lo cual pudiese indicar alguna mezcla de litologías (Figura 4). En el caso de las Reservas, la variabilidad de las Mallas 20 y 100 disminuyen apreciablemente en estos compósitos, llegando incluso a tener respectivamente, varianzas de 6 y 8 con respecto a los altos valores de varianza de estas variable en los compósitos de Recursos. Los coeficientes de variación también evidencian esta disminución. De forma general la mayoría de los parámetros, a excepción de Malla -325, forman distribuciones más simétricas.

Tabla II Estadística descriptiva de las muestras compositadas en los Recursos





	M 20 (%)	M 100 (%)	M -325 (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Peso Volumétrico (Tn/m <sup>3</sup> )	Potencia (m)
Número de datos	96	96	96	97	96	99
Mínimo	1,65	3,82	21,52	86,7	1,21	0,2
Máximo	59,31	64,13	78,9	93,24	1,82	7,1
Rango	57,66	60,31	57,38	6,54	0,61	6,9
Media	19,966	24,583	55,8	88,772	1,561	2,885
Mediana	16,585	22,01	56,695	88,44	1,57	2,6
1 <sup>er</sup> cuartil	5,485	8,335	42,31	87,267	1,52	1,725
3 <sup>er</sup> cuartil	32,135	37,4	71,9	89,802	1,625	3,9
Error Standard	1,546	1,782	1,698	0,168	0,010	0,15
Varianza	229,7	305,11	277,05	2,766	0,009	2,227
Desviación Standard	15,156	17,467	16,645	1,663	0,098	1,492
Coefficiente de variación	0,759	0,710	0,298	0,018	0,063	0,517
Asimetría	0,512	0,583	-0,32	0,81	-0,757	0,511
Kurtosis	-0,978	-0,878	-1,18	-0,115	1,37	-0,339
Kolmogorov-Smirnov stat	0,182	0,159	0,107	0,121	0,14	0,098
Critical K-S stat, alpha=.10	0,123	0,123	0,123	0,123	0,123	0,122
Critical K-S stat, alpha=.05	0,137	0,137	0,137	0,136	0,137	0,135
Critical K-S stat, alpha=.01	0,164	0,164	0,164	0,163	0,164	0,162

**Tabla III** Estadística descriptiva de las muestras composadas en las Reservas

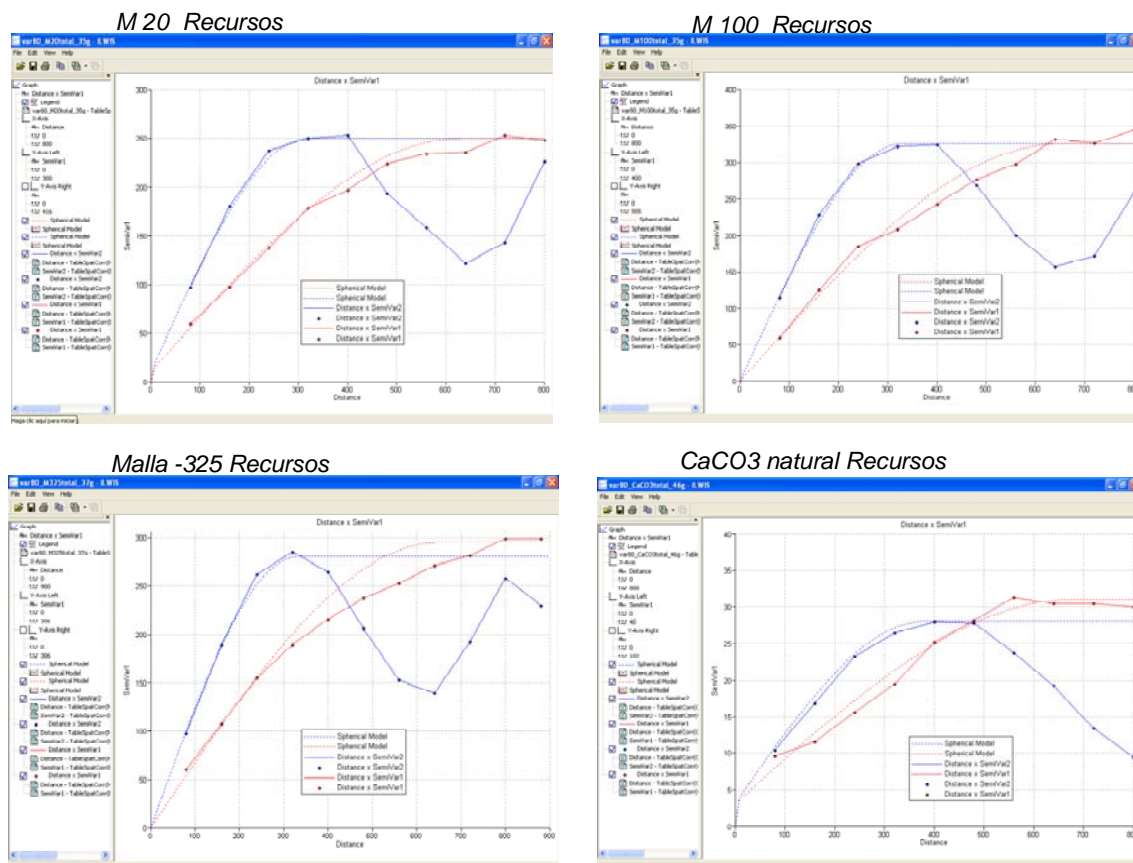
	M 20 (%)	M 100 (%)	M -325 (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Peso Volumétrico (Tn/m <sup>3</sup> )	Potencia (m)
Número de datos	43	43	42	43	43	43
Mínimo	1,65	3,82	60,88	86,7	1,33	0,5
Máximo	14,8	16,57	78,9	92,99	1,82	7,1
Rango	13,15	12,75	18,02	6,29	0,49	6,6
Media	6,015	8,503	71,657	88,135	1,58	3,445
Mediana	5,26	8,02	73,025	87,34	1,6	3,5
1 <sup>er</sup> cuartil	4,215	6,287	67,5	87,102	1,533	2,063
3 <sup>er</sup> cuartil	7,197	10,45	75,56	89,115	1,64	5,013
Error Standard	0,455	0,486	0,767	0,216	0,014	0,270
Varianza	8,935	10,162	24,765	2,015	0,008	3,143
Desviación Standard	2,989	3,187	4,976	1,419	0,094	1,773
Coefficiente de variación	0,496	0,374	0,069	0,016	0,059	0,514
Asimetría	1,328	0,77	-0,616	1,399	-0,339	-0,033
Kurtosis	1,831	0,149	-0,811	1,885	1,121	-1,049
Kolmogorov-Smirnov stat	0,153	0,122	0,171	0,224	0,122	0,12
Critical K-S stat, alpha=.10	0,183	0,183	0,185	0,183	0,183	0,183
Critical K-S stat, alpha=.05	0,203	0,203	0,205	0,203	0,203	0,203
Critical K-S stat, alpha=.01	0,244	0,244	0,246	0,244	0,244	0,244

El análisis estructural en este estudio permitió caracterizar la variabilidad espacial de los parámetros medidos tanto para los Recursos como para las Reservas, identificando las direcciones principales de continuidad. En la mayoría de los casos analizados el modelo que mejor se ajustó a la variabilidad de



los parámetros estudiados fue el modelo Esférico. En las Figuras 6 y 7 se muestran algunos Semivariogramas experimentales con sus ajustes de modelos teóricos en los análisis de Recursos y Reservas. La realización adecuada del análisis estructural es sin dudas la base que justifica una correcta estimación ya que minimiza la varianza del error de estimación. Dicho análisis en este estudio permitió caracterizar la variabilidad espacial de los parámetros medidos tanto para los Recursos como para las Reservas, identificando las direcciones principales de continuidad.

Como resultado se evidencia la continuidad espacial en la mineralización con un determinado nivel de anisotropía geométrica, lo cual permite realizar la predicción por estimación empleando el método de Kriging adecuadamente. El estimador empleado en la mayoría de los análisis realizados en este estudio fue el Kriging anisotrópico (variante del ordinario en presencia de Semivariogramas con rangos diferentes según las direcciones). Los resultados del ajuste de los modelos matemáticos en los Semivariogramas experimentales (Rango, Meseta, efecto Nugget y tipo de modelo teórico), así como, el radio anisotrópico, fueron introducidos para este estimador en cada caso. Con estos resultados fue posible la creación de los modelos geológicos (Predicción por estimación) para el cálculo de los volúmenes de recursos y reservas).



**Figura 6 Semivariogramas experimentales y ajustes de modelos teóricos de las variables analizadas en los Recursos donde se evidencia una continuidad espacial de las distribuciones y la presencia de anisotropía geométrica. En color rojo y azul aparecen los Semivariogramas en la dirección de menor y mayor variación respectivamente.**

Para el modelo de Recursos fueron confeccionados los siguientes mapas: Mapa de potencia de los Recursos, distribución de Malla 20, distribución de Malla 100, distribución de Malla -325, contenido de CaCO<sub>3</sub> peso volumétrico, distribución de la cobertura estéril de cieno carbonatado y del espesor de



cieno terrígeno. Para el modelo de Reservas por otra parte: Mapa de potencia, techo y piso del espesor útil.

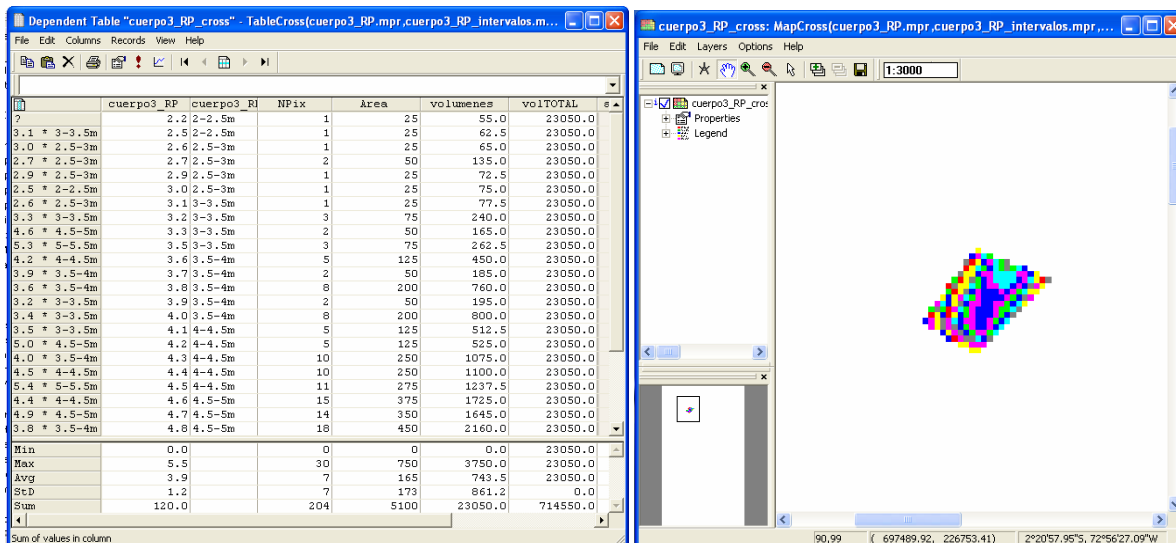
El cálculo de los volúmenes tanto Recursos como de Reservas se realizó a partir de los límites de bloques de los modelos. Dicho cálculo se realiza en ILWIS creando 2 mapas (uno de espesores propiamente y otro de clases de intervalos de espesores donde se enmarcan las áreas que ocupan los diferentes espesores por intervalos). Mediante una operación cruzada entre ambos tipos de mapas, conocida en ILWIS como operación Cross, se obtiene una tabla como resultado de la combinación de dichos mapas en la que aparecen diferenciadas las áreas con diferentes espesores para intervalos de 0.5 m. El resultado de multiplicar los espesores por el área que ocupan los píxeles de igual valor de espesor, se obtiene el volumen en metros cúbicos. Para la obtención de estos volúmenes en toneladas se utiliza esta misma operación cruzada, el resultado es la multiplicación de los mapas de espesores por el mapa de pesos volumétricos que al cruzarlos con un mapa de intervalos, permite obtener la tabla de salida de igual manera que para el cálculo de volúmenes. Este procedimiento, dada la variabilidad del peso volumétrico en contactos y cambios gradacionales es más adecuado y selectivo que la utilización de una media en la estimación.

El algoritmo del software para el cálculo de las áreas (en los mapas de intervalos) está basado en la determinación del número de píxeles que caen dentro de cada combinación de intervalos de clases de espesores y conociendo el tamaño de píxel empleado en los mapas, son convertidos en términos de metros sobre el terreno. En la figura 7 se muestra un ejemplo de la tabla y mapa de salida como resultado de la aplicación de la operación Cross en el cálculo de los volúmenes de los cuerpos de Reservas. Los estimados a partir de los modelos geotecnológicos obtenidos pueden ser considerados como una Reserva Geológica, donde fueron calculados los volúmenes de materia prima, por los límites de bloques y teniendo en cuenta las condiciones minero-técnicas del espesor útil y la cobertura estéril.

**Recursos = (Volumen x Peso Volumétrico)**

**Reservas Geológicas = (Volumen x Peso Volumétrico) + Condiciones Minero-Técnicas.**

Estas Reservas Geológicas se convierten posteriormente en Probadas cuando se incorporan los decrementos por pérdidas y rechazo ni los incrementos por dilución.



**Figura 7** Se muestran las tablas y mapas resultados de la combinación de los mapas raster de espesores de las Reservas e intervalos de clases de espesores (para los 3 Bloques). Los diferentes



colores que aparecen en los mapas de salida son las diferentes combinaciones de espesores por áreas calculadas.

## CONCLUSIONES

1. Todo el procesamiento fue realizado en ILWIS, el cual permitió realizar la caracterización integral del sector de estudio dentro del yacimiento a partir de las herramientas geoestadísticas necesarias para el análisis de variabilidad de los parámetros tecnológicos fundamentales y al mismo tiempo el manejo de toda la geo- información sobre la base de sus capacidades instaladas como Sistema de Información Geográfica.
2. Los resultados obtenidos son actualmente parte del estudio del yacimiento de cienes carbonatados en el sector de estudio Oeste II de la concepción minera Moa níckel S.A. Estudio que tuvo la finalidad de obtener la estimación de los Recursos y Reservas probadas como base de un proyecto de explotación de las reservas de este sector.
3. La realización adecuada del análisis estructural es sin dudas la base que justifica una correcta estimación ya que minimiza la varianza del error de estimación. El análisis estructural en este estudio permitió caracterizar la variabilidad espacial de los parámetros medidos tanto para los Recursos como para las Reservas, identificando las direcciones principales de continuidad.
4. Como resultado se evidenció una continuidad espacial en la mineralización con un determinado nivel de anisotropía lo cual permitió realizar la predicción por estimación empleando el método de Kriging adecuadamente.

## BIBLIOGRAFÍA

- Estevez E. Quintín J. 2000. El Kriging indicador y el control de la Ley en el yacimiento Oro Castellano. V Congreso de Geología y Minería. Matemáticas en la geología y SIG.
- Quintín J., Estévez E., Quintero A., Ramírez, R., 2000. GEOESTADÍSTICA APLICADA, CASO DE ESTUDIO, YACIMIENTO SANTA LUCIA. V Congreso de Geología y Minería. Matemáticas en la geología y SIG.
- ITC. 2003. ILWIS User' Guide. ITC (Holanda).
- ITC. 2003. ILWIS User' Reference ITC (Holanda).