



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**SIMULACIÓN DE UNIDADES LITOLÓGICAS EN EL YACIMIENTO MANSA MINA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**ALVARO OMAR DE LA QUINTANA QUEZADA**

**PROFESOR GUÍA:**

**XAVIER EMERY**

**PROFESOR CO-GUÍA:**

**EDUARDO MAGRI VARELA**

**PROFESOR INTEGRANTE:**

**JULIAN ORTIZ CABRERA**

**SANTIAGO DE CHILE**

**AGOSTO 2008**

## **RESUMEN.**

Realizar una estimación precisa de los recursos minerales de un yacimiento es fundamental para el éxito de un proyecto minero, debido a los altos montos de inversión involucrados. La estimación se realiza a partir de información obtenida en una toma de muestras y la posterior aplicación de técnicas geoestadísticas de kriging o de simulación, que permiten crear escenarios plausibles dada la información disponible del yacimiento.

Los métodos de simulación geoestadística buscan cuantificar la incertidumbre en las leyes de los minerales y en los volúmenes de las distintas unidades geológicas que posee el yacimiento. Esta memoria se enfoca en determinar la incertidumbre en los contactos de las unidades geológicas que existen en el yacimiento Mansa Mina, mediante métodos de simulación de variables categóricas. Específicamente, se utilizan los métodos de simulación secuencial de indicadores y simulación plurigaussiana, con los cuales es posible generar realizaciones de las distintas unidades geológicas que posee el yacimiento Mansa Mina (brecha, stockwork C5, C1 y estéril), con el objetivo de determinar un rango entre los escenarios más optimistas y más pesimistas para cada unidad geológica.

Se define una zona de interés y una grilla de prueba en la que se realizan todas las simulaciones de las distintas unidades geológicas. Dado que los escenarios posibles de generar son numerosos, se debe realizar una etapa de validación que permita estudiar la calidad de los modelos generados. Se comparan ambos modelos para establecer cuál de los dos proporciona los mejores resultados en las estimaciones y en los contactos litológicos.

Se cuenta con un modelo litológico del yacimiento Mansa Mina propuesto por Codelco, el que es comparado con los modelos simulados, obteniendo una diferencia importante de volúmenes y tonelajes para cada una de las unidades litológicas. Esto se debe principalmente a la existencia de un sector que el modelo de Codelco estima como unidad estéril, mientras que las simulaciones realizadas lo identifican parcialmente como mineral.

Como recomendación se establece que se debe refinar el modelo geológico en las zonas del yacimiento en donde la diferencia encontrada es notable.

## **ABSTRACT.**

Making an accurate estimate of mineral resources of a deposit is essential to the success of a mining project, due to high amounts of investment involved. The estimate is based on information obtained from a sampling and the subsequent implementation of geostatistical techniques of kriging or simulation, that create plausible scenarios consistent with the information available reservoir.

Geostatistical simulation methods seek to quantify the uncertainty in the mineral grades and volumes of the different geological units which form the ore body. This memory focuses on determining the uncertainty in the contacts of the geological units that exist in the Mansa Mina deposit. Specifically, sequential indicator and plurigaussian simulation are used, in order to generate outcomes of the various geological units in the Mansa Mina deposit (breccia, stockworks C5, C1 and sterile), with the objective of generating ranks between the most optimistic and most pessimistic scenarios for each geological unit.

An area of interest is defined and a test grid in which all the simulations of geological units are carried out. Because the possible scenarios to generate are numerous, a validation stage must be performed to study the quality of generated models. We compare both simulation models to establish which of the two provides the best results in the estimates and in the geological contacts.

A lithological model of the Mansa Mina deposit proposed by Codelco is compared with the models derived from simulations, getting an important difference in volumes and tonnages for each of lithological units. This is mainly due to the existence of a sector that the Codelco model considers as barren, but that the simulations identify partly as ore.

As recommendation states that the geological model must be refined in the areas of the ore body where the differences found are remarkable.

## **AGRADECIMIENTOS.**

Gracias a cada uno de mis familiares en especial a mi padre y hermanos, por ayudarme y quererme tanto en cada una de las etapas que he cursado. En especial a mi polola Loreto por tenerme tanta paciencia y apoyarme en todo este tiempo que hemos pasado juntos. Agradezco en forma particular a mi madre, que lamentablemente no está hoy conmigo, pero estaría muy feliz de verme alcanzar este logro en mi vida.

Gracias a todos los profesores del departamento de Ingeniería en Minas, que gracias a sus enseñanzas he llegado a donde estoy en éste momento, en especial al profesor Xavier Emery por su excelente disposición en mi último semestre dedicado a la realización de esta memoria.

Gracias a todos mis amigos de la vida, en especial a los muchachos del departamento de Minas que me han ofrecido ayuda en todo momento de la carrera. También agradecer a toda la gente que he conocido en la universidad, que me ayudo o me hizo más grato el paso de este largo proceso.

Gracias a FONDEF, el cual a través del proyecto D04I-1055 "Modelamiento de la incertidumbre en geología y leyes y su impacto en la selectividad de explotaciones mineras", hizo posible la realización de esta memoria. Gracias también a las contrapartes industriales de este proyecto, Codelco Chile y Gemcom Software International.

# **ÍNDICE**

1.- INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.- Introducción .....	1
1.2.- Motivación .....	2
1.3.- Objetivos .....	3
1.3.1.- Objetivo General .....	3
1.3.2.- Objetivos Específicos .....	3
1.4.- Alcances .....	4
1.5.- Resumen por capítulos .....	5
2.- ANÁLISIS DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS .....	6
2.1.- Kriging .....	6
2.1.1.- Codificación en indicadores .....	6
2.1.2.- Kriging de indicadores .....	7
2.2.- Simulación Geoestadística .....	8
2.2.1.- Simulación de unidades geológicas .....	8
3.- METODOLOGÍA .....	11
4.- CASO BASE .....	13
4.1.- Estudio Exploratorio de Datos .....	13
4.2.- Estadísticas Básicas .....	16
4.3.- Zona de Interés .....	17
4.4.- Grilla .....	19
4.5.- Análisis Variográfico .....	19
4.6.- Kriging de Indicadores .....	25
5.- SIMULACIÓN SECUENCIAL DE INDICADORES .....	29
5.1.- Simulación Secuencial de indicadores .....	29
5.2.- Validación de la Simulación Secuencial de Indicadores .....	32

6.- SIMULACIÓN PLURIGAUSIANA .....	34
6.1.- Inferencia de parámetros del modelo Plurigaussiano .....	34
6.1.1.- Bandera de truncación.....	34
6.1.2.- Umbrales.....	35
6.1.3.- Definición de variogramas.....	35
6.2.- Simulación Plurigaussiana .....	38
6.3.- Validación de las Simulaciones Plurigaussianas.....	41
7.- COMPARACIÓN DE MODELOS PROPUESTOS CONTRA EL MODELO CODELCO .....	42
7.1.- Estadísticas Modelo Codelco.....	42
7.2.- Elección Modelo Simulación.....	44
7.3.- Comparación modelo de simulación secuencial de indicadores en contra del modelo de Codelco	46
8.- CONCLUSIONES .....	53
9.- BIBLIOGRAFÍA .....	55
10.-ANEXOS .....	57
10.1.- Análisis variográfico .....	57
10.2.- Detalle de Simulación Secuencial de Indicadores .....	59
10.3.- Gráficos Validación Simulación Secuencial de Indicadores .....	63
10.4.- Detalle de Simulación Plurigaussiana .....	65
10.6.- Gráficos Validación Simulación Plurigaussiana.....	69

# **1.- INTRODUCCIÓN**

## **1.1.- Introducción**

En cualquier tipo de proyecto minero, uno de los puntos vitales es la información que se tenga del yacimiento. Esto es debido a los altos montos de inversión y nivel de riesgos que alcanzan éstos. Por lo tanto es fundamental contar con información geológica precisa y certera para poder evaluar económicamente el proyecto.

Para la evaluación de recursos geológicos, se utilizan datos provenientes de sondajes o pozos de tronadura y a estos se les pueden aplicar distintas técnicas de geoestadística, como por ejemplo la interpolación por kriging o técnicas de simulación que permiten crear distintos escenarios consistentes con la información que se tiene del yacimiento.

Uno de los principales beneficios que tiene el utilizar la simulación geoestadística es que al permitir construir distintos escenarios plausibles, y con esto se puede estimar la incertidumbre que se tiene. Esto sirve ya que se puede obtener los márgenes entre el escenario más pesimista y el más optimista.

La incertidumbre de los yacimientos viene principalmente de dos fuentes:

1. Volúmenes de las distintas unidades geológicas.
2. Leyes de especie de interés.

En esta memoria solamente abarca el primer punto, que está asociado a la búsqueda de los límites entre las diferentes unidades geológicas.

Para determinar la incertidumbre asociada a los contactos que tienen las distintas unidades geológicas se utiliza la simulación de variables categóricas, por métodos como secuencial de indicadores o plurigaussiana truncada, que tiene como fin determinar las unidades geológicas espacialmente por medio de modelos numéricos.

El presente trabajo dentro del marco del proyecto FONDEF D04I-1055 "Modelamiento de la incertidumbre en geología y leyes y su impacto en la selectividad de explotaciones mineras", pretende lograr cuantificar la incertidumbre existente en las distintas unidades geológicas y el efecto que produce en el volumen de mineral.

## **1.2.- Motivación**

En la estimación de recursos de un yacimiento es importante tener un modelo de leyes del mineral que se desea extraer, pero también es una información vital lograr tener un modelo geológico del yacimiento ya que es indispensable para estimar bien las leyes.

Al tener un modelo geológico de un yacimiento, aparte de conocer tópicos fundamentales como es el tipo de mineral a extraer, es decir, la leyes de minerales de mena, también se tiene la necesidad de saber las ubicaciones en el espacio donde existen mayores problemas, debido a minerales con efectos adversos para la minería como es el caso del arsénico, que presenta problemas de contaminación al medio ambiente.

Dentro de este ámbito cabe señalar que en el yacimiento Mansa Mina existe una litología específica del tipo brecha que contiene altas leyes de arsénico y de cobre. Además de estas leyes, el yacimiento tiene una geometría complicada por lo tanto es importante cuantificar su incertidumbre.

El modelo geológico del yacimiento puede construirse con kriging de indicadores, pero este tipo de método genera sólo un valor determinístico para las unidades geológicas y no incorpora un punto clave dentro de los modelos como es la incertidumbre. Para esto existe un campo en la geoestadística como son las simulaciones de variables categóricas que, aparte de dar un valor posible para cada unidad, también entrega un rango de incertidumbre para la presencia de las distintas unidades geológicas.

## **1.3- Objetivos**

### **1.3.1.- Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo de título es cuantificar la incertidumbre en el volumen y tonelaje de las unidades litológicas del yacimiento Mansa Mina utilizando simulación geoestadística.

### **1.3.2.- Objetivos Específicos**

Aplicar métodos de simulación geoestadística de variables categóricas, siendo los utilizados los siguientes:

- Método de Simulación secuencial de Indicadores.
- Método de Simulación Plurigausiana.

Reproducir a través de la simulación los contactos geológicos entre las distintas litologías.

Comparar los resultados obtenidos con el modelo propuesto por Codelco para el yacimiento Mansa Mina.

#### **1.4.- Alcances**

La metodología será aplicada a datos reales provenientes de campañas de sondajes del yacimiento Mansa Mina y también se utilizará el modelo geológico que se dispone a la fecha (2007).

Las unidades geológicas del yacimiento Mansa Mina han sido clasificadas según tipo de litología, mineralización, alteración y leyes. A continuación se presenta una descripción de las distintas unidades geológicas que se considerarán.

- Brechas: Rocas constituidas principalmente por clastos, matriz y cemento, que presentan alta ley de Cobre (leyes que varían entre 3 a 5%), arsénico y plata. Por lo general presenta una ley de cobre sobre el 2,5% y de arsénico sobre las 2000 partes por millón (ppm).
- C5: Es representada por una unidad de mineralización diseminada del tipo "stockwork". Presenta por lo general una ley de cobre sobre el 0,5%.
- C1: Otra unidad de característica de mineralización diseminada pero más débil, que por lo general tiene una ley de cobre sobre el 0.1%.
- Estéril: Unidad litológica que presenta una ley de cobre inferior al 0,1%.

## **1.5.- Resumen por capítulos**

El capítulo 2 contiene los antecedentes bibliográficos en los que se apoya el desarrollo de este trabajo. En él, se presenta distintos métodos de estimación geoestadística, mostrando sus ventajas y debilidades.

Luego, el capítulo 3 presenta la metodología aplicada para desarrollar el trabajo. Se detalla cuales son los pasos a seguir para obtener las distintas simulaciones de variables categóricas, como también el estudio previo del yacimiento.

En el capítulo 4 se presenta el estudio exploratorio de datos y la definición de conceptos que se usan a lo largo de todo el trabajo, como es el caso de la zona de interés y la grilla de prueba que es en donde se realizan todas las simulaciones y estimaciones.

En los capítulos 5 y 6 se presentan los casos de simulación secuencial de indicadores y simulación plurigaussiana respectivamente, desplegando las estadísticas básicas generadas por estos métodos y la validación de éstos.

Luego, en el capítulo 7 se compara los modelos obtenidos en las simulaciones con el modelo propuesto por Codelco para el yacimiento Mansa Mina, enfocándose específicamente en las diferencias que existen entre los volúmenes y tonelajes de ellos.

Las conclusiones obtenidas y recomendaciones al respecto, se explicitan en el capítulo 8, en tanto que el capítulo 9 entrega la bibliografía utilizada.

## **2.- ANÁLISIS DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS**

Una de las principales aplicaciones de la geoestadística es la evaluación de recursos minerales y se realiza a partir de la información que se tiene de una toma de muestras que puede ser una campaña de sondajes o de los mismos pozos de tronadura.

Para este tipo de evaluación existen varios métodos para poder hacer una estimación de un sector del espacio determinado del que se tenga información. Dentro de estos métodos existe uno que es ampliamente utilizado que es el kriging, y otro como es la simulación geoestadística.

### **2.1.- Kriging**

Este método permite estimar valores puntuales o de bloques a partir de los valores observados en datos circundantes, tomando en cuenta su configuración geométrica y la estructura espacial de la variable en estudio.

El kriging se basa en la interpretación de la variable regionalizada como una realización de una función aleatoria, de la que se tiene un modelo de variograma. Se trata de buscar el mejor estimador lineal ponderado, esto quiere decir, que tenga varianza del error mínima y sesgo nulo. [6]

#### **2.1.1.- Codificación en indicadores**

El uso de los indicadores es una estrategia que permite estimar la distribución espacial de leyes a distintas leyes de corte. La distribución se transforma a una distribución binaria.

La función indicador  $I(x, z_c)$  está definida para una ubicación  $x$  y una ley de corte  $z_c$ , como una función binaria que toma valores 0 ó 1 bajo las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} I(x, z_c) &= 0 & Z(x) &\leq z_c \\ I(x, z_c) &= 1 & Z(x) &> z_c \end{aligned}$$

En donde  $Z(x)$  denota el valor de ley en el sitio  $x$ .

La función indicador por definición forma una distribución de Bernoulli, y es sabida las propiedades como son la media y la varianza de esta distribución estadística:

$$m = p$$
$$\sigma^2 = p(1 - p)$$

Donde  $p$  es la proporción de "unos" que se tiene en la distribución.

Luego de esta transformación es fácil el cálculo de variogramas experimentales, dando origen a los variogramas de indicador.

Una variante de la utilización de leyes de corte son las variables categóricas, en donde se usa el mismo procedimiento mostrado anteriormente pero con la variante que se muestra a continuación:

Para toda  $UG_i \rightarrow i = 0,1,2,3,\dots$

$$I(x, UG_i) = 0 \quad UG(x) \neq UG_i$$

$$I(x, UG_i) = 1 \quad UG(x) = UG_i$$

### 2.1.2.- Kriging de indicadores

El Kriging de indicadores es un kriging en donde previamente se tienen los valores transformados a binarios y se utiliza un apropiado variograma de indicador como la función estructural del kriging. El estimador del kriging de indicadores a menudo se encuentra entre el intervalo  $[0,1]$ , y puede ser interpretado como probabilidad (probabilidad que la ley esté sobre un indicador específico), o como proporción (proporción de un sector que esté por sobre una ley de corte específica).

Además se utiliza este método para la caracterización de la variabilidad espacial de variables categóricas, como por ejemplo la presencia o ausencia de una litología específica, alteración, tipo de suelo, etc.

## **2.2.- Simulación Geoestadística**

La simulación sirve para caracterizar la distribución de valores de una variable regionalizada. Nos permite construir mapas de valores que reproducen la variabilidad real de la variable en estudio, y representan escenarios plausibles. Para que esto sea posible se necesita construir una función regionalizada ficticia que reproduzca la estructura de la variable real, para la cual es necesario conocer la esperanza, covarianza, distribución marginal y distribución bivariable de la función en estudio.

El uso de las simulaciones geoestadísticas es principalmente para la medición de la incertidumbre que aprecia en qué tan distintos son los escenarios simulados, o para un análisis de riesgo debido a que se pueden observar escenarios tanto optimistas como pesimistas.

### **2.2.1.- Simulación de unidades geológicas**

Para la simulación geoestadística de unidades geológicas se pueden codificar mediante una variable categórica. Dentro de los métodos que permiten hacer esto, están los siguientes:

- Simulación secuencial de indicadores [1, 3, 4, 5, 9, 10, 13]
- Simulación Plurigaussiana [2, 7, 8, 11, 12]

#### **2.2.1.1.- Simulación secuencial de indicadores**

Este método permite simular variables categóricas, similar al caso de simulación secuencial Gaussiana, es decir, que simula el valor del indicador secuencialmente un punto tras otro, en donde cada simulación depende de todos los valores indicadores simulados anteriormente y los datos disponibles originalmente.[1, 9]

En el punto a simular se requiere construir una función de distribución de probabilidad generalmente utilizando el kriging de indicadores. La continuidad espacial que tienen las distintas unidades geológicas está descrita por las covarianzas o variogramas de indicadores.

Una de las desventajas que presenta este método es el excesivo tiempo de cálculo, ya que al punto que se quiere simular requiere de un kriging de muchos indicadores para determinar su distribución de probabilidad. Otra desventaja importante es no tener control en los contactos que tienen las distintas unidades geológicas.

### 2.2.1.2.- Simulación Plurigaussiana

Es un método de simulación que consiste en la truncación de dos o más funciones aleatorias Gaussianas, las cuales pueden o no estar correlacionadas entre sí. Es una extensión del método de Gaussiana truncada que permite simular unidades geológicas que tengan diferente anisotropía o tener mayor flexibilidad en cuanto a transiciones de las distintas unidades geológicas.

El modelo plurigaussiano es definido por:

- Número de funciones Gaussianas a utilizar
- Matrices de covarianzas simples y cruzadas, las cuales definen completamente el modelo de las funciones Gaussianas
- Definir la jerarquía de las categorías y contactos geológicos
- Umbrales de truncación, que definen las proporciones del espacio ocupadas por cada unidad geológica.

Para aplicar este método se requiere seguir pasos específicos para obtener los parámetros mostrados anteriormente, y estos son los siguientes

#### **1. Determinación de los umbrales de truncación**

Se necesita seleccionar la partición del espacio multi-Gaussiano para la definición de las unidades geológicas. Esta truncación se basa en el conocimiento del yacimiento, ya que esto nos permite saber la jerarquía entre los contactos.

En el caso de dos funciones aleatorias Gaussianas se representa usualmente en la forma de una bandera, en que cada eje corresponde a una función Gaussiana.

#### **2. Determinar las proporciones de las unidades geológicas**

A partir de la regla de truncación (bandera), estas proporciones permiten estimar los umbrales de corte.

### **3. Ajuste Variográfico**

Para proceder al cálculo del modelo variográfico de indicadores se utiliza los umbrales de corte y los modelos variográficos de las funciones aleatorias Gaussianas. El ajuste variográfico se realiza mediante la comparación de variogramas experimentales de indicadores contra los modelos obtenidos. Esta comparación tiene por objetivo encontrar el modelo que mejor se ajuste a los variogramas experimentales. Para esto se necesita cambiar los parámetros de los variogramas (alcance y mesetas) de las funciones Gaussianas.

Luego de que se han definido los parámetros se procede al condicionamiento de los datos mediante un procedimiento iterativo (muestreador de Gibbs) que convierte los datos categóricos en datos de las funciones Gaussianas, para poder generar la simulación condicional.

### **3.- METODOLOGÍA**

La metodología a usar para el proyecto comienza por un estudio exploratorio de la base de datos del yacimiento Mansa Mina que se utiliza como datos condicionantes para la simulación. Esto consiste en verificar la base de datos observando que a cada ubicación le corresponda una sola unidad geológica. Se deben construir histogramas además de desplegar mapas de ubicación de todas las muestras en planta y en proyecciones verticales.

Luego se procede a seleccionar una zona de interés dentro del yacimiento, con el objetivo de que contenga una gran cantidad de datos y que sea representativa a todo el yacimiento en estudio. En esta zona se realiza nuevos histogramas y mapas de planta y perfil.

En la zona de interés se realiza una transformación de los datos en indicadores. Luego se hace un análisis variográfico de los datos de indicador para encontrar las direcciones principales de anisotropía con el fin de ser usadas para las simulaciones como para el kriging de indicador. Dentro de la zona de interés se crea una grilla donde se tiene un volumen y tonelaje específico. La grilla tiene dimensiones acordes para una comparación, de volumen y tonelaje, de todos los métodos, tanto de simulación como por el método de kriging de indicadores.

Se desarrollan los distintos variogramas de indicador que son usados para efectuar un kriging de indicador donde se muestra histograma y estadísticas básicas. También se exponen mapas de probabilidad de aparición para cada litología, acompañados de tablas en las que se indica los volúmenes y tonelajes aproximados que genera este método.

Se sigue con la simulación secuencial de indicadores, que es realizada en base al software U-Mine, donde se establece un radio de búsqueda y cantidad de datos mínimos y máximos para la simulación. Luego se procede a realizar histograma y estadísticas acerca de los volúmenes y tonelajes mínimos y máximos de cada unidad litológica, también se muestran planta del promedio de las simulaciones para cada litología. Se efectúa una validación de las simulaciones donde se muestra los errores medios cometidos en la estimación.

En el caso de la simulación Plurigaussiana se tiene que definir la proporción de cada unidad geológica y la bandera de contacto entre ellas. Luego de esto se procede al modelamiento de los variogramas de indicadores conjuntos para luego proceder a la simulación. Al igual que el caso de la simulación secuencial se despliegan estadísticas acerca de mínimos y máximos en volumen y tonelaje

como la muestra de plantas de los promedios generados por la simulación de cada litología. También se procede al proceso de validación de las simulaciones.

Como último paso se hace la comparación de los modelos generados por las simulaciones versus el modelo propuesto por Codelco. Para esto se generan histogramas y estadísticas, como también el cálculo de volumen y tonelaje de cada unidad geológica del modelo de Codelco.

## **4.- CASO BASE**

### **4.1.- Estudio Exploratorio de Datos**

La base de datos que se revisa en todo el estudio consta de 53499 datos, que comprende un área de 1100 [m] x 2200[m] aproximadamente y se extiende por unos 1000 metros en la vertical.

Como convención se le asignan a cada unidad geológica un código y color único que se toma en cuenta durante todo el trabajo de memoria, y la designación es la siguiente:

- Código 0: Unidad Estéril, color rojo
- Código 1: Unidad Brecha, color azul
- Código 2: Unidad C1, color amarillo
- Código 3: Unidad C5, color verde.

Se despliegan los mapas de las litologías en las siguientes figuras, en las que se muestra los perfiles y la planta para observar la ubicación espacial de los datos del yacimiento.

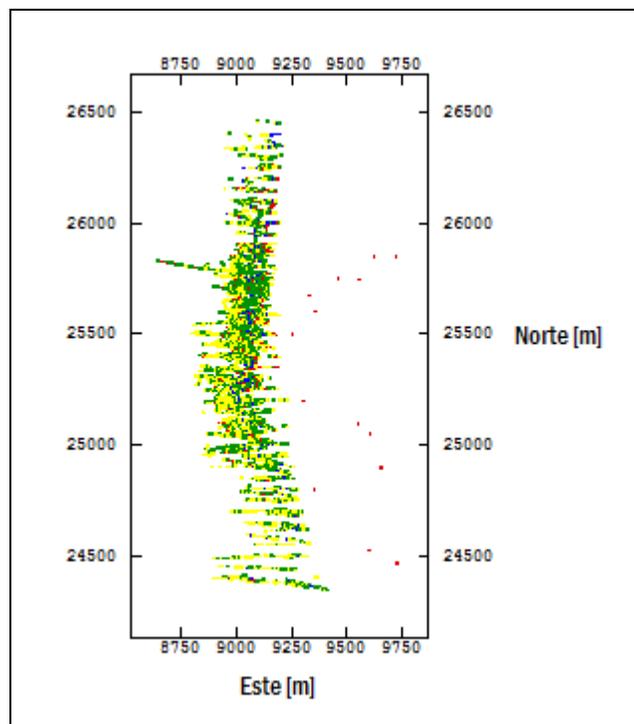


Imagen N°1 Planta del Yacimiento Mansa Mina

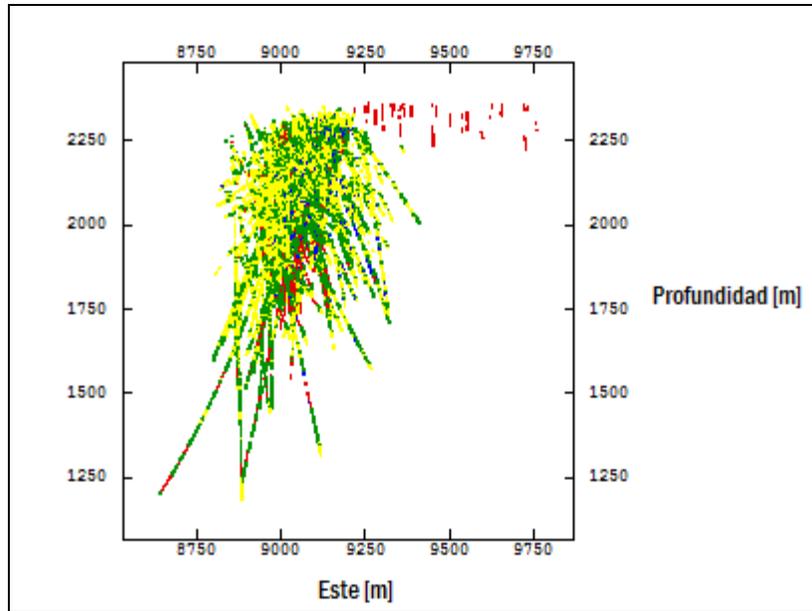


Imagen N°2 Perfil del Yacimiento Mansa Mina

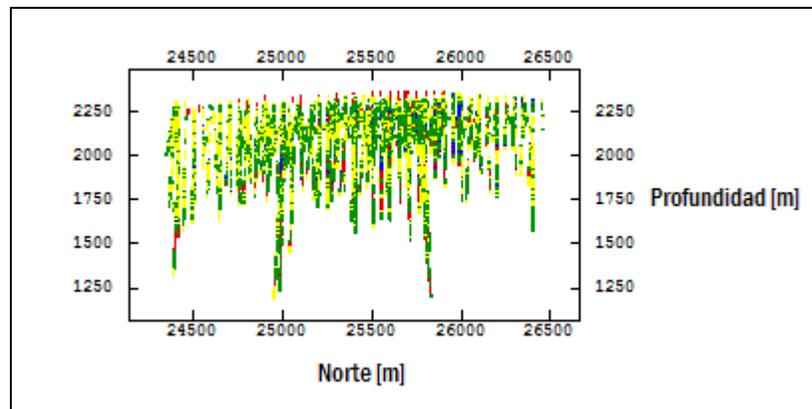


Imagen N°3 Perfil del Yacimiento Mansa Mina



Imagen N°4 Leyenda de unidades geológicas

De las imágenes 1 y 2 se desprende que los sondajes realizados de la coordenada 9250 hacia el Este existen sólo datos con catalogación de estéril. También, entre las cotas 1750 y 1250 existen

solamente unos pocos sondeos, lo que se debe tomar en consideración para la elección de la zona de interés.

## **4.2.- Estadísticas Básicas**

Se realiza un estudio preliminar con el fin de detectar la existencia de datos aberrantes o que no existiera código de unidad geológica que pudiese afectar el posterior trabajo. En este, no se detecta ni datos aberrantes, duplicados o sin códigos, por lo que se puede trabajar sin problemas de este tipo.

La distribución de las distintas categorías geológicas se muestra en la figura siguiente:

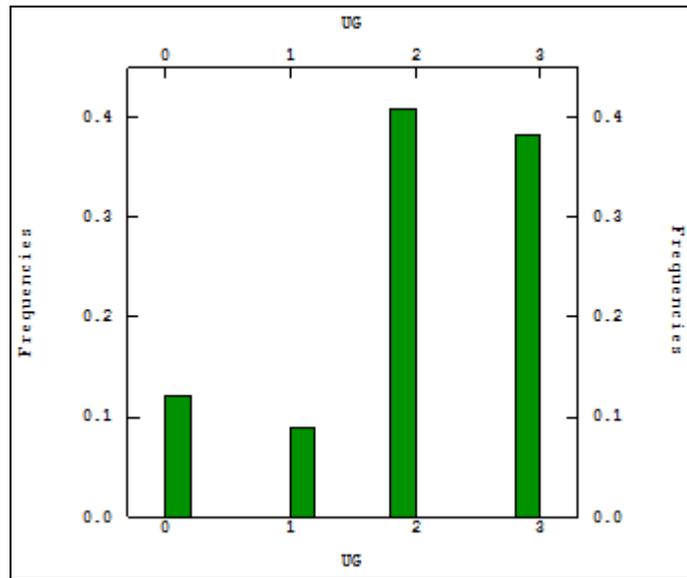


Imagen N°5 Histograma de las unidades litológicas del yacimiento Mansa Mina

El detalle de la cantidad de datos por cada unidad geológica se da a conocer en la siguiente tabla:

<b>Unidad Geológica</b>	<b>Datos</b>	<b>Porcentaje [%]</b>
Estéril	6483	12,12
Brecha	4795	8,96
C1	21833	40,81
C5	20388	38,11
<b>Total</b>	<b>53499</b>	<b>100</b>

Tabla N°1 Detalle de unidad geológica del yacimiento Mansa Mina

Se desprende de la tabla N°1 que existe una importante cantidad de sondajes realizados en zonas donde existe alta presencia de las unidades C1 y C5, esto se debe a que son éstas las unidades geológicas que tienen mayores leyes de cobre al igual que la unidad brecha. Por su parte, la unidad

estéril tiene un porcentaje considerable de datos de sondajes, esto se debe a zonas que exclusivamente contienen datos de esta unidad como se aprecian en las imágenes N°1 y N°2

### **4.3.- Zona de Interés**

Con el fin de realizar el estudio en un dominio más restringido, se necesita encontrar una zona dentro del yacimiento que aporte datos suficientes para poder hacer una estimación acorde al depósito. Se centra la búsqueda de esta zona en el centro del yacimiento, ya que es en este lugar donde se encuentran las zonas con mayor cantidad de sondajes realizados.

La zona elegida en cuestión se define en los siguientes límites:

- Dirección Este: Entre 8.950 y 9.200 metros
- Dirección Norte: Entre 25.700 y 26.150 metros
- Profundidad: Entre 2.100 y 2.300 metros

En la siguiente figura se muestra una vista isométrica de la zona elegida con el fin de mostrar la ubicación espacial de los sondajes y las distintas unidades geológicas que poseen:

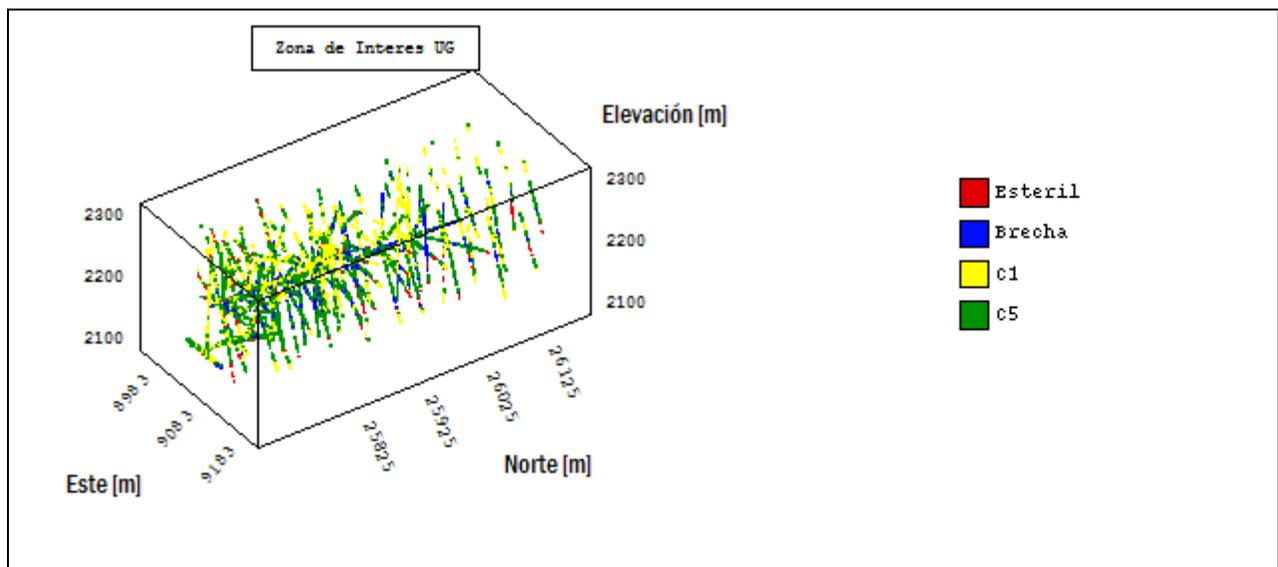


Imagen N°6 Vista isométrica de la zona de interés

La zona de interés está compuesta por 8924 datos y se despliega el histograma que corresponde a esta selección:

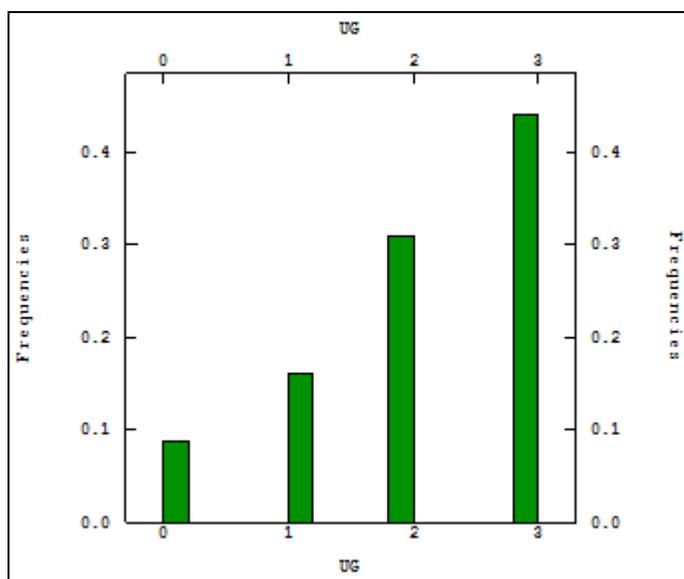


Imagen N°7 Histograma de las unidades geológicas de la zona de interés

El detalle de los datos por unidad geológica se muestra a continuación en la tabla que sigue:

Unidad Geológica	Datos	Porcentaje [%]
Estéril	790	8,85
Brecha	1429	16,01
C1	2766	31,00
C5	3939	44,14
<b>Total</b>	<b>8924</b>	<b>100</b>

Tabla N°2 Detalle de unidad geológica en la zona de interés

En la zona de interés se aprecia claramente que existe una predominancia de la unidad C5, que está por sobre el 40% del total de los datos seleccionados. Por otro lado, el porcentaje menor que se tiene en la zona es de la unidad estéril, esto es debido a que se selecciona un sector bastante mineralizado y con pocos datos que son clasificados como esta unidad.

#### **4.4.- Grilla**

Se requiere para hacer una estimación parcial de la zona de interés la creación de una grilla de estudio, con el fin de estandarizar todos los resultados obtenidos de los diferentes métodos de estimación o simulación. Para esto, dentro de la zona de interés se crea una grilla que consta de 120.000 sectores y las dimensiones de cada bloque son 1[m] x 2[m] x 2[m].

Los vértices de la grilla están dados por lo siguientes puntos en el espacio:

- Dirección Este: Entre 8.950 y 9.150 metros
- Dirección Norte: Entre 25.700 y 25890 metros
- Profundidad: Entre 2.200 y 2.212 metros

En la dirección Este se tiene un incremento de 1 metro por cada bloque, para el caso de la dirección Norte esta consta de un incremento de 2 metros y por último consta de 6 bancos en la vertical con un incremento entre ellos de 2 metros cada uno.

#### **4.5.- Análisis Variográfico**

Antes de comenzar el análisis variográfico se necesita hacer una nueva codificación de cada unidad geológica. Con el fin de obtener variables de indicadores, como se explica en el capítulo de análisis bibliográfico, se representa en una nueva variable que es de codificación binaria para representar la presencia de una unidad específica en un lugar preciso de la zona de interés.

A partir del análisis de los mapas variográficos, que se encuentra en el anexo, se determina que la anisotropía encontrada se puede representar con 3 variogramas, uno en la dirección Este, otro en la dirección Norte y por último un variograma en la dirección vertical.

Luego se procede a construir los variogramas experimentales de indicadores para cada unidad litológica, con el objetivo de encontrar la continuidad espacial de cada una de ellas. Para esto se definen los siguientes parámetros:

	Acimut	Tolerancia Angular	Dip	Numero de pasos	Separación de paso
<b>Dirección 1</b>	0°	22,5°	0°	20	10
<b>Dirección 2</b>	90°	22,5°	0°	20	10
<b>Dirección 3</b>	0°	15°	90°	20	10

Tabla N°3 Parámetros de cálculo de variogramas experimentales

Se generan los siguientes gráficos de variogramas experimentales.

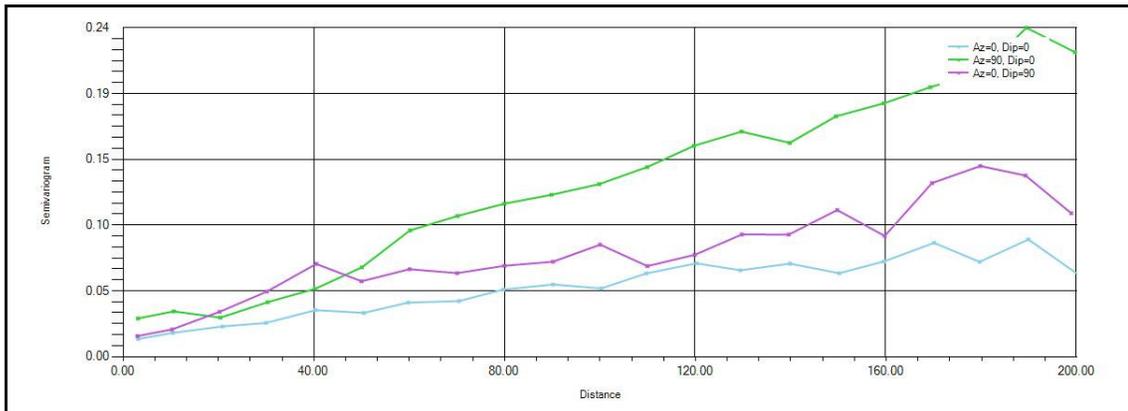


Imagen N°8 Variograma de indicador experimental Estéril

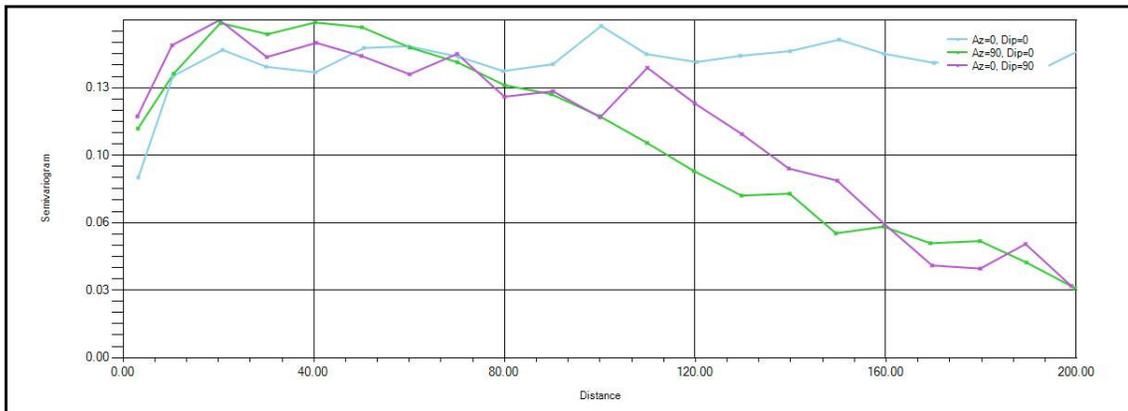


Imagen N°9 Variograma de indicador experimental Brecha

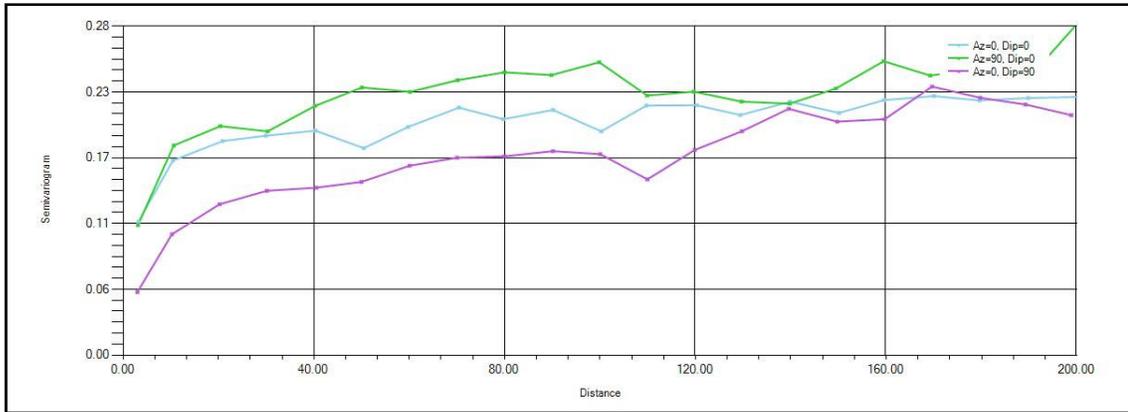


Imagen N°10 Variograma de indicador experimental C1

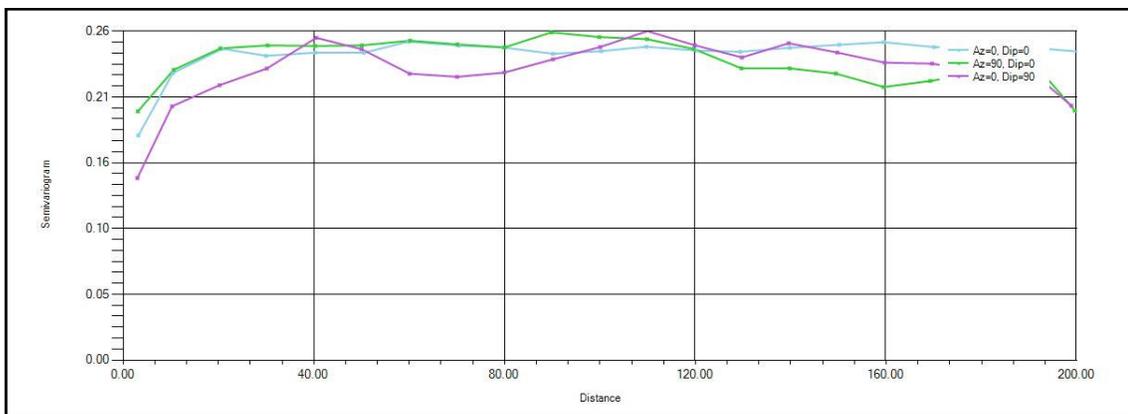


Imagen N°11 Variograma de indicador experimental C5

Se procede al modelamiento de los variogramas experimentales de cada unidad litológica. Para esto se usan modelos anidados de variogramas esféricos y exponenciales. Con esto se nos permite crear el modelo que será utilizado tanto en el kriging de indicadores como en las simulaciones secuenciales.

A continuación se muestran las figuras de los distintos variogramas ya modelados, en donde la línea punteada es el variograma experimental de indicador y la línea continua es el modelo que se propone para cada indicador:

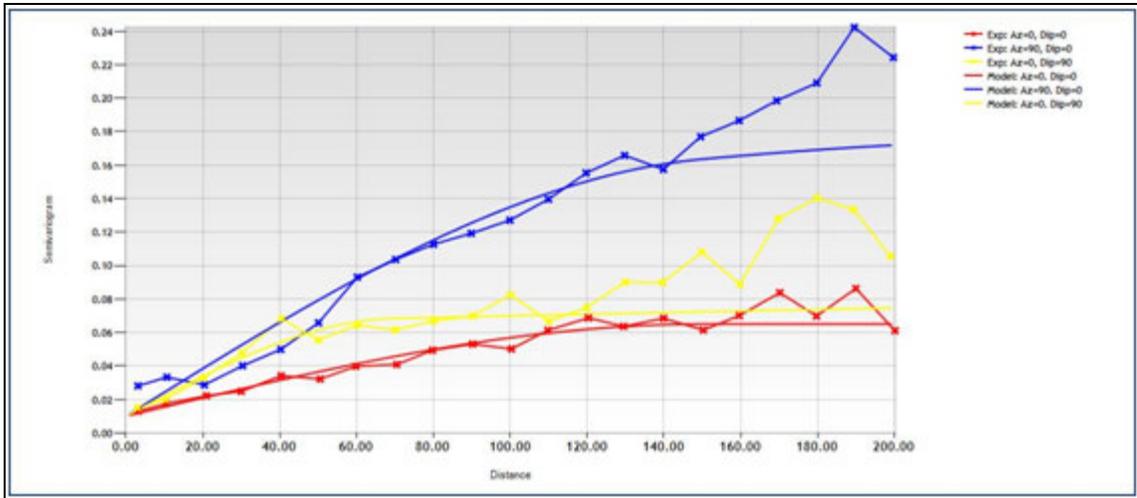


Imagen N°12 Variograma de indicador modelado Estéril

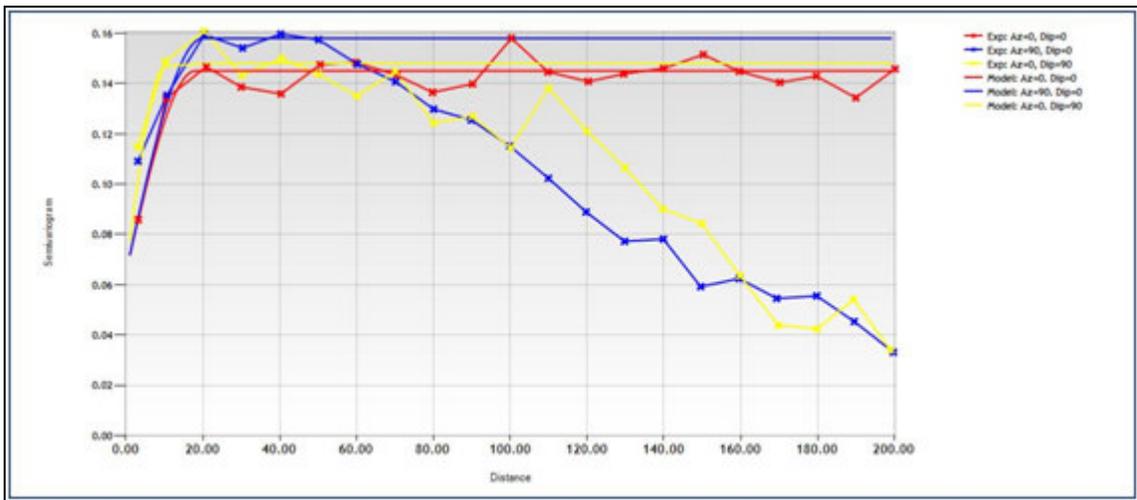


Imagen N°13 Variograma de indicador modelado Brecha

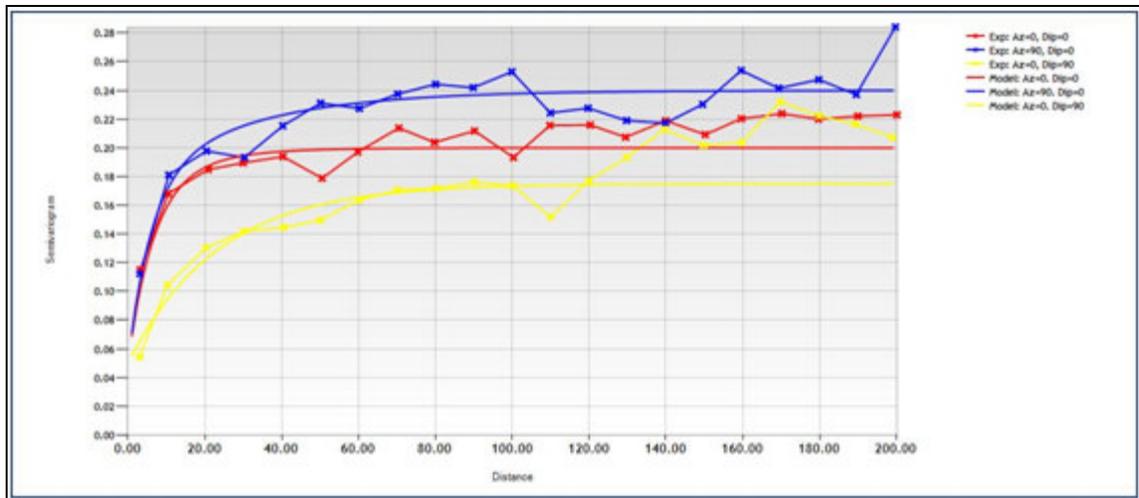


Imagen N°14 Variograma de indicador modelado C1

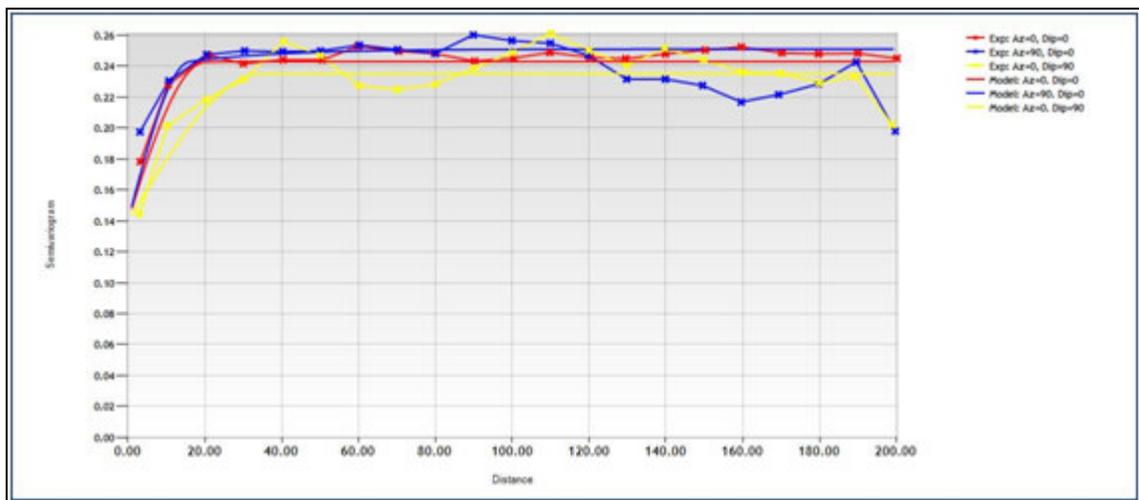


Imagen N°15 Variograma de indicador modelado C5

Los modelos a utilizar en las simulaciones son las siguientes:

$$\gamma_{esteril}(h) = 0.01 + 0.06 \operatorname{esf}(168, 200, 40 \text{ m}) + 0.015 \cdot \operatorname{esf}(\infty, 200, 80 \text{ m}) + 0.14 \cdot \operatorname{esf}(\infty, 300, \infty \text{ m})$$

$$\gamma_{brecha}(h) = 0.06 + 0.085 \exp(15, 25, 13 \text{ m}) + 0.005 \cdot \exp(\infty, 25, 13 \text{ m}) + 0.01 \cdot \operatorname{esf}(\infty, 25, \infty \text{ m})$$

$$\gamma_{C1}(h) = 0.05 + 0.125 \exp(20, 18, 70 \text{ m}) + 0.025 \cdot \exp(50, 90, \infty \text{ m}) + 0.04 \cdot \exp(\infty, 90, \infty \text{ m})$$

$$\gamma_{C5}(h) = 0.14 + 0.095 \exp(20, 16, 35 \text{ m}) + 0.008 \cdot \exp(20, 70, \infty \text{ m}) + 0.008 \cdot \operatorname{esf}(\infty, 70, \infty \text{ m})$$

Se aprecia en los distintos variogramas modelados el corto alcance que tienen las unidades brecha, C1 y C5 en todas las direcciones en estudio. Esto quiere decir que a cortas distancias se alcanza una alta variabilidad entre los datos. Para el caso de la unidad estéril se tiene un amplio alcance y es distinto para cada dirección preferencial.

#### **4.6.- Kriging de Indicadores**

La primera estimación que se obtiene tanto para los volúmenes y tonelajes de cada unidad litológica se da gracias al kriging de indicadores. El kriging de indicadores entrega una nueva variable que estima la probabilidad que en cierto punto de la grilla ocurra una categoría definida.

La estimación del kriging de indicador se realiza con los datos codificados en indicadores en la zona de interés y los variogramas modelados que se realizaron. Esto se efectúa en forma independiente para cada unidad geológica y se realiza en el espacio determinado por la grilla de prueba.

Se utiliza el software U-Mine para realizar esta metodología utilizando kriging ordinario y con radio de búsqueda de 100 metros en cada dirección.

Con el fin de mostrar representativamente, se despliegan las siguientes imágenes que nos muestran una planta con la probabilidad de existencia de cada unidad geológica estudiada. La leyenda muestra que en los colores más cálidos se encuentran los bloques con mayor probabilidad de ocurrencia de la unidad litológica específica, y al contrario en las ubicaciones que se encuentran los colores más fríos se encuentra una menor probabilidad de encontrar dicha unidad.

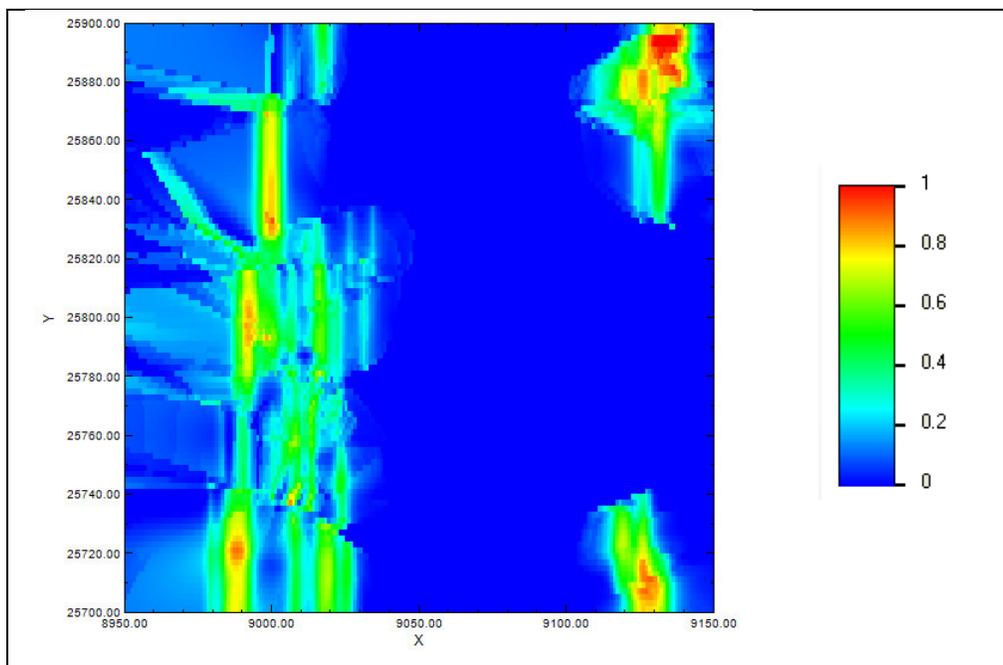


Imagen N°16 Kriging Indicador Estéril Banco 2201

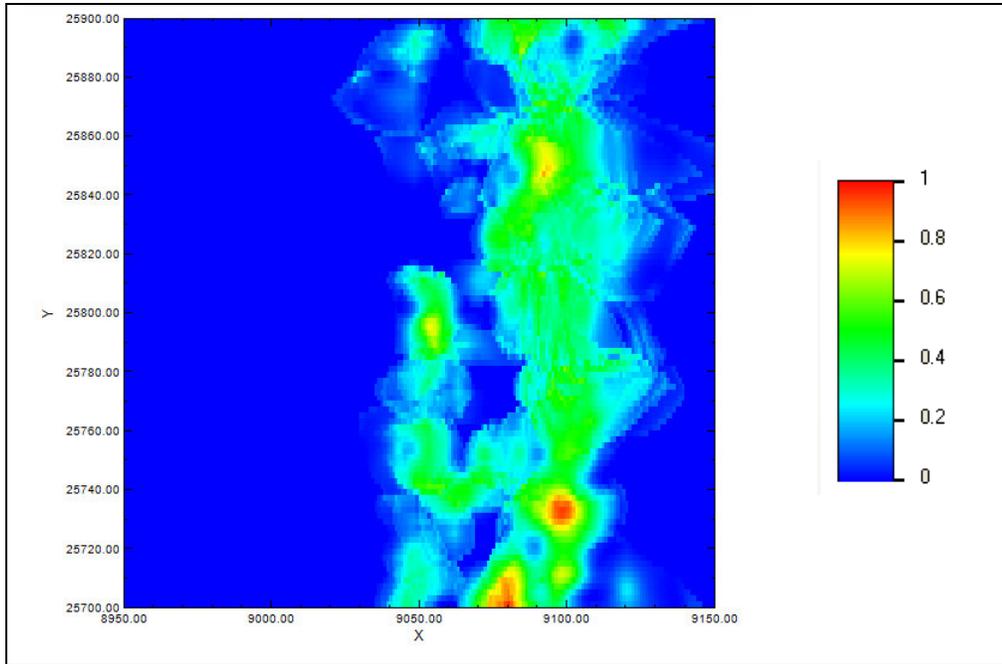


Imagen N°17 Kriging Indicador Brecha Banco 2201

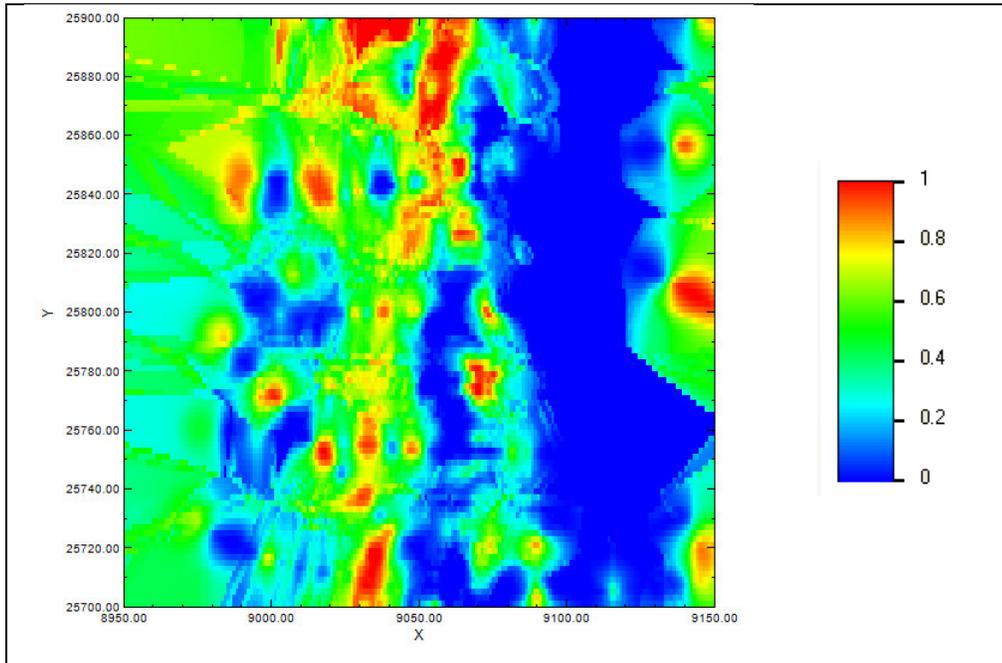


Imagen N°18 Kriging Indicador C1 Banco 2201

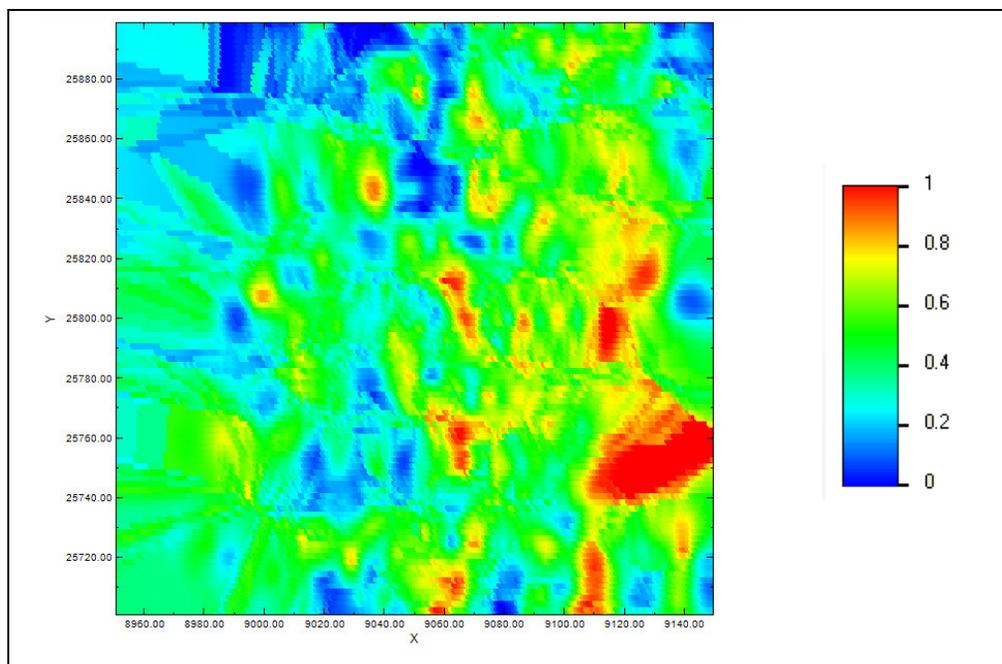


Imagen N°19 Kriging Indicador C5 Banco 2201

El kriging de indicadores entrega como datos de salida para cada unidad geológica un número en el rango [0, 1] para cada bloque de la grilla de prueba, si el valor estimado sale de este rango, se corrige al límite más cercano. Para determinar los volúmenes y tonelajes que entrega este método se tiene que efectuar un promedio de cada kriging de indicador independiente sobre cada punto de la grilla de prueba, lo que estima la proporción del espacio ocupada por cada unidad geológica.

Para todos los cálculos posteriores de tonelajes se considera una densidad de roca constante de 2,7 [Ton/m<sup>3</sup>].

A continuación se presenta una tabla donde expone las distintas proporciones, los volúmenes y tonelajes que se tiene para cada unidad geológica.

<b>Unidad Geológica</b>	<b>Proporciones</b>	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tonelaje [Ton]</b>
<b>Estéril</b>	10,76%	51.648	139.450
<b>Brecha</b>	11,44%	54.912	148.262
<b>C1</b>	32,81%	157.488	425.218
<b>C5</b>	44,33%	212.784	574.517
<b>Total</b>	<b>99,34%</b>	<b>476.832</b>	<b>1.287.446</b>

Tabla N°4 Volúmenes y tonelajes entregados por kriging de indicadores

De la tabla anterior se desprende que la suma de las proporciones no alcanza el 100% como se podría esperar. Esto se debe a que cada proporción de unidad geológica se calcula independientemente de otra por construcción del kriging de indicadores.

## **5.- SIMULACIÓN SECUENCIAL DE INDICADORES**

### **5.1.- Simulación Secuencial de indicadores**

Las simulaciones se aplican a la grilla de prueba ubicada dentro de la zona de interés, utilizando para ello el software U-Mine. Se condiciona las simulaciones con los datos de sondajes que existen dentro de la zona de interés.

El modelo variográfico utilizado en este caso es el mismo que se utilizó para el kriging de indicadores, por lo que no será mostrado nuevamente.

Se realizan 200 simulaciones, teniendo un radio de búsqueda de datos de 100 metros en todas las direcciones. A continuación se despliegan las estadísticas básicas de las 200 realizaciones para cada una de las unidades litológicas.

	Mínimo			Máximo			Media		
	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tonelaje [Ton]	Porcentaje	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tonelaje [Ton]	Porcentaje	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tonelaje [Ton]	Porcentaje
<b>Esteril</b>	32.028	86.476	6,67%	77.112	208.202	16,07%	47.788	129.028	9,96%
<b>Brecha</b>	58.276	157.345	12,14%	97.244	262.559	20,26%	76.752	207.230	15,99%
<b>C1</b>	93.624	252.785	19,51%	150.724	406.955	31,40%	122.112	329.702	25,44%
<b>C5</b>	385.024	1.039.565	41,90%	265.856	717.811	55,39%	233.348	630.040	48,61%

Tabla N°5 Estadísticas básicas simulación secuencial de indicadores

Se puede desprender de las estadísticas básicas que existe en la mayoría de las unidades geológicas 10 puntos porcentuales de diferencia entre el mínimo y el máximo entre todas las simulaciones, lo que es un amplio rango de escenarios posibles.

Se desea encontrar un intervalo de confianza del 95% de probabilidad, con el objetivo de saber entre qué valores se registran los mínimos y máximos de cada unidad litológica.

Para esto se debe considerar la distribución experimental que se genera a partir de los 200 valores simulados que se obtiene de la simulación secuencial de indicadores. De la distribución experimental se consideran los cuantiles 2,5% y 97,5% que permiten construir el intervalo de confianza requerido para todas las unidades geológicas en estudio.

A continuación se presenta en la tabla N°6 donde se muestra los mínimos y máximos con un 95% de confianza.

	Volumen [m <sup>3</sup> ]			Tonelaje [Ton]			Porcentaje		
	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo
Esteril	35.600	<b>47.788</b>	65.098	96.120	<b>129.028</b>	175.763	7,42%	<b>9,96%</b>	13,56%
Brecha	63.145	<b>76.752</b>	91.762	170.492	<b>207.230</b>	247.758	13,16%	<b>15,99%</b>	19,12%
C1	99.921	<b>122.112</b>	139.826	269.786	<b>329.702</b>	377.530	20,82%	<b>25,44%</b>	29,13%
C5	211.087	<b>233.348</b>	255.317	569.935	<b>630.040</b>	689.355	43,98%	<b>48,61%</b>	53,19%

Tabla N°6 Intervalo de confianza de 95% para simulación secuencial de indicadores

De las estadísticas anteriormente expuestas, se puede desprender que bajo el concepto del intervalo de confianza la existencia de un 43% de la unidad C5. Esta unidad es una de las unidades que presenta mayores leyes de cobre y alcanza este porcentaje incluso en el peor escenario.

En base a todas las simulaciones realizadas, se construye mapas de la grilla en donde se muestra la probabilidad de aparición de cada unidad geológica.

Los colores cálidos representan una mayor probabilidad de aparición de la unidad específica de cada planta, y el caso contrario es lo que pasa con los colores fríos que representa una menor probabilidad de aparición de la unidad.

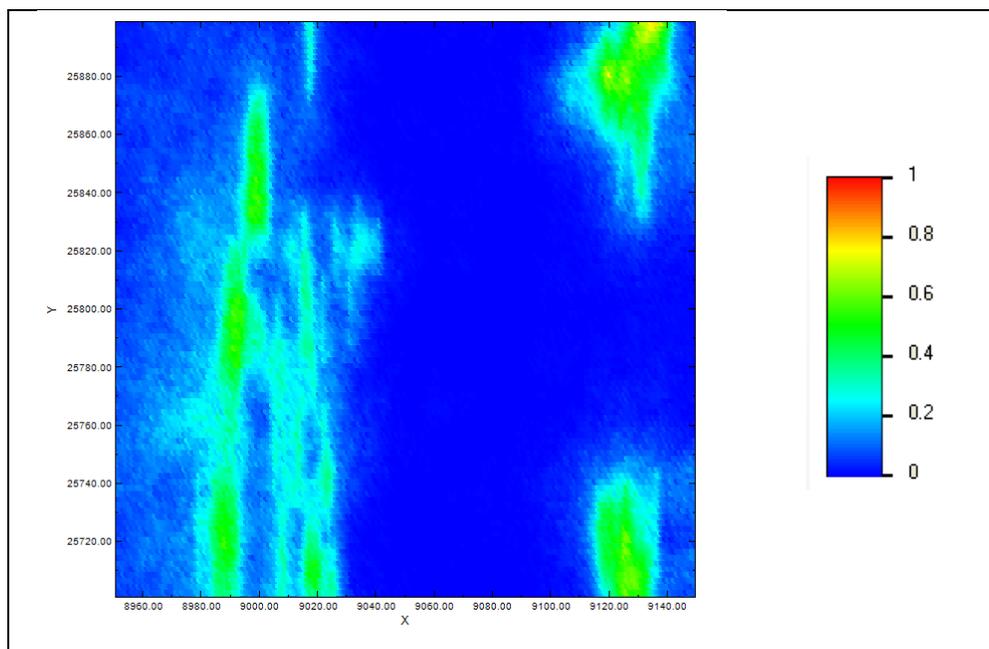


Imagen N°20 Promedio Simulaciones Secuencial Unidad Estéril banco 2201

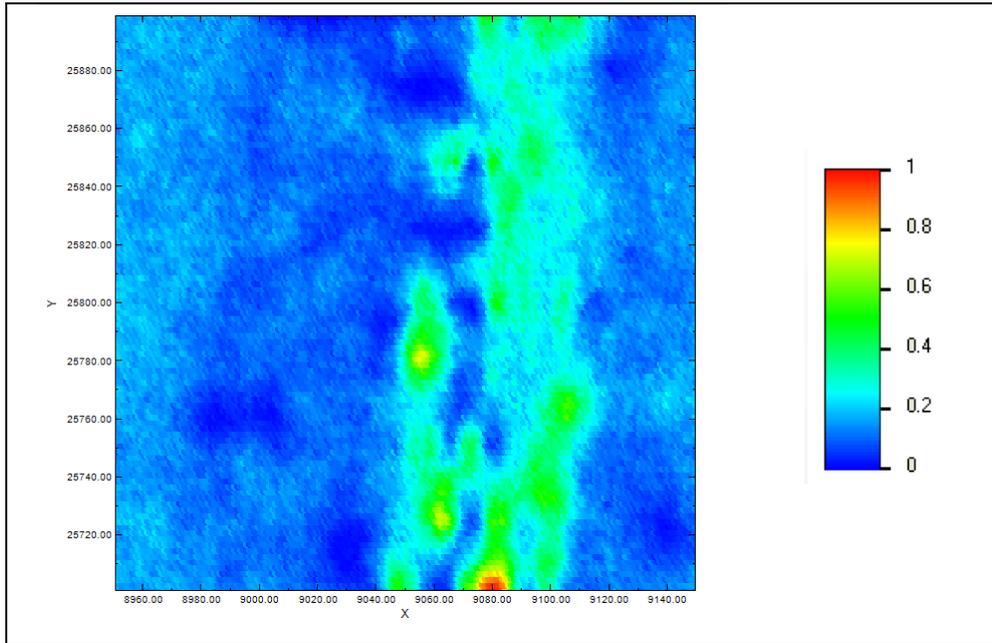


Imagen N°21 Promedio Simulaciones Secuencial Unidad Brecha banco 2201

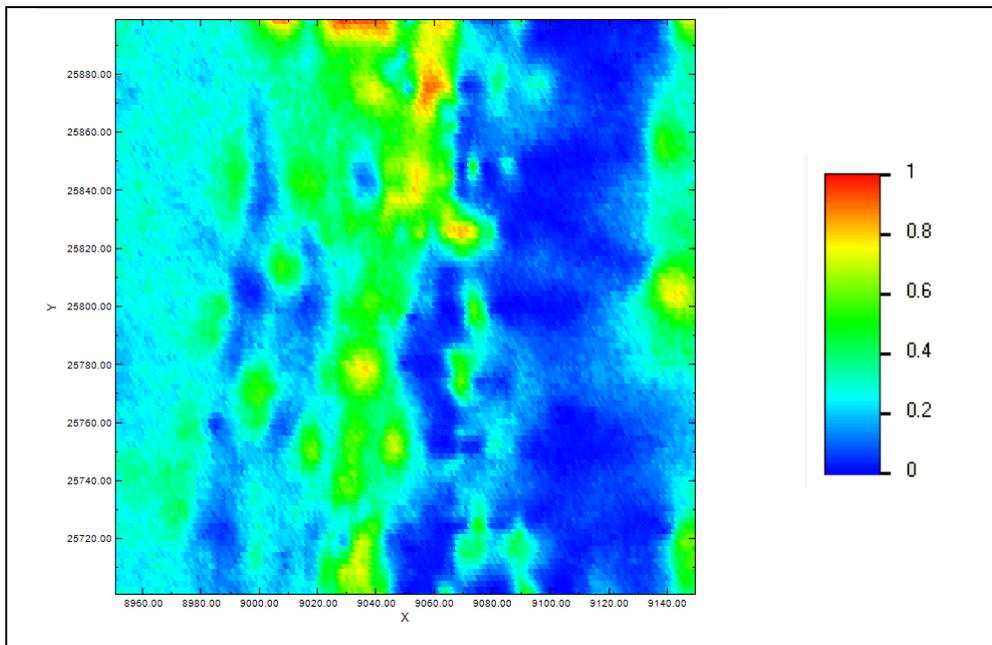


Imagen N°22 Promedio Simulaciones Secuencial Unidad C1 banco 2201

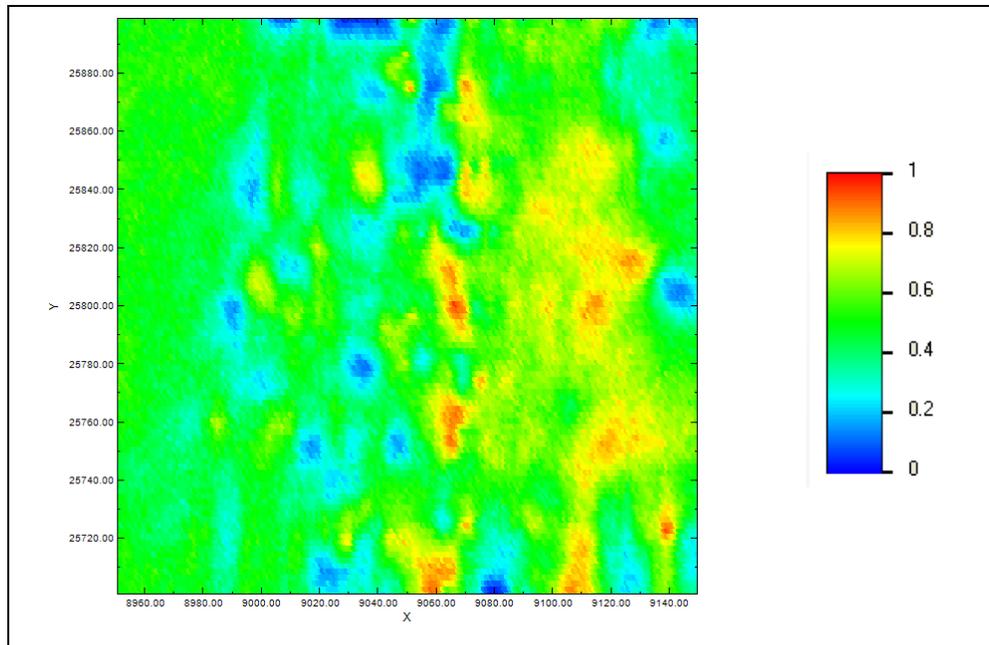


Imagen N°23 Promedio Simulaciones Secuencial Unidad C5 banco 2201

Al observar las distintas imágenes de los promedios de la simulación secuencial de indicadores entrega una clara señal de la ubicación de las distintas unidades geológicas en el dominio de la grilla de prueba.

## **5.2.- Validación de la Simulación Secuencial de Indicadores**

Para estudiar la calidad de los escenarios creados por las simulaciones se utiliza los datos de sondajes. La metodología a utilizar para la validación es la conocida con el nombre de jack-knife, esta consiste en dividir en dos grupos los sondajes utilizados en las simulaciones, para luego estimar los datos de un grupo a partir del otro grupo.

En este caso, los datos a utilizar son los que se encuentran en la zona de interés, en el cual los grupos son divididos desde la coordenada 25800 metros hacia Norte, y el otro grupo será de los sondajes que se encuentren al Sur de esta coordenada.

Lo que se realiza es simular con los datos que se encuentran al norte de la coordenada 25800 metros como datos condicionantes, y se realiza las simulaciones en las ubicaciones que se tiene en los sondajes al sur de esta misma coordenada.

Luego se procede a comparar los resultados obtenidos de las simulaciones versus los datos reales que se tienen en los sondeos. Posteriormente se realiza un estudio de los errores cometidos y determinar si las simulaciones fueron satisfactorias, en cuanto a la precisión y sesgo condicional.

Se presenta a continuación la definición de los distintos tipos de errores medios que estudian en la validación de la simulación secuencial.

$$\text{Error Medio} = \text{promedio}_\alpha \{ \text{indicador real dato } \alpha - \text{promedio indicadores simulados dato } \alpha \}$$

$$\text{Error Absoluto Medio} = \text{promedio}_\alpha \{ | \text{indicador real dato } \alpha - \text{promedio simulado dato } \alpha | \}$$

$$\text{Error Cuadrático Medio} = \text{promedio}_\alpha \{ [ \text{indicador real dato } \alpha - \text{promedio simulado dato } \alpha ]^2 \}$$

A continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos de los distintos errores. Además se adjuntan en el capítulo de anexos los histogramas de los valores del error.

	Simulación Secuencial de Indicadores		
	Error Medio	Error Absoluto Medio	Error Cuadrático Medio
<b>Esteril</b>	-0,04351	0,18197	0,05385
<b>Brecha</b>	-0,02482	0,24458	0,11287
<b>C1</b>	-0,00428	0,38197	0,19370
<b>C5</b>	0,03402	0,49611	0,25195

Tabla N°7 Estudio de validación de simulaciones secuencial de indicadores

Se aprecia que para todas las unidades geológicas los errores son cercanos a 0 por lo que se concluye que las simulaciones hacen estimaciones sin sesgo.

## **6.- SIMULACIÓN PLURIGAUSIANA**

El segundo caso de simulación se realiza con los mismos datos de sondaje pero con otro método de simulación. Los escenarios a simular se realizan en la misma grilla de prueba.

Como primer paso para poder realizar este tipo de simulaciones, se requiere definir el modo de truncación, el cual se realiza gráficamente con un tipo de bandera que influye en los contactos entre las distintas unidades geológicas y en sus jerarquías. También se requiere la definición de los umbrales que tiene directa influencia en las proporciones del espacio ocupada por las distintas unidades geológicas y, por último, se necesita la definición de los variogramas de las funciones Gaussianas que influye en los variogramas simples y cruzados de los indicadores de cada unidad geológica.

### **6.1.- Inferencia de parámetros del modelo Plurigaussiano**

#### **6.1.1.- Bandera de truncación**

Para el caso de la bandera de truncación, lo primero que se analiza son los sondajes de exploración, que dan una idea de los posibles contactos que existen entre las distintas unidades geológicas. Por esto se propone una bandera de truncación de la siguiente forma, que se representa en la siguiente figura:

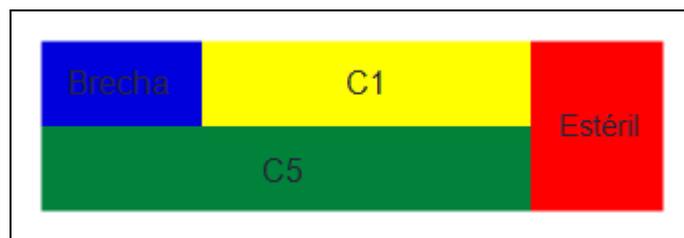


Imagen N°24 Bandera de Truncación

En donde cada eje corresponde a una función aleatoria Gaussiana, en este caso el eje de las abscisas representa a la primera Gaussiana y el eje de las ordenadas representa la segunda Gaussiana.

Como ya se describió anteriormente, la bandera indica los contactos que tienen las unidades geológicas. En este caso se puede apreciar que las unidades C1 y C5 tienen contacto con todas las

unidades restantes, en cambio, las unidades brecha y estéril sólo tienen contacto con las unidades C1 y C5.

### 6.1.2.- Umbrales

Los umbrales se definen a partir de los puntos que cortan las distintas Gaussianas. En el caso de estudio se tiene dos funciones Gaussianas. La primera Gaussiana, como se aprecia en la imagen N°24, es la que define las proporciones que se tiene entre las unidades brecha, C1 y estéril, por lo que tiene 2 umbrales. La segunda Gaussiana queda representada por la definición de la unidad C5 en contra del resto de las unidades geológicas.

La definición de los umbrales se hace por medio del software U-Mine, utilizando como datos de ingreso las proporciones de las distintas unidades geológicas.

Las siguientes tablas muestran los umbrales definidos y las proporciones de las unidades geológicas:

<b>Gaussianas</b>	<b>Umbrales</b>	
1 <sup>era</sup> Gaussiana	-0,312	1,341
2 <sup>da</sup> Gaussiana	-0,031	-

Tabla N°8 Definición de umbrales

<b>Unidad Geológica</b>	<b>Proporción</b>
Estéril	8,99%
Brecha	19,33%
C1	27,27%
C5	44,42%

Tabla N°9 Proporciones ocupadas por las distintas unidades en el modelo plurigaussiano

### 6.1.3.- Definición de variogramas

Los variogramas utilizados por la simulación plurigaussiana son los variogramas de indicador de las distintas unidades geológicas modelados por las dos funciones Gaussianas, por lo que se debe

modelar los distintos variogramas de indicadores simultáneamente por las variables gaussianas. Esto genera los resultados ilustrados en las siguientes imágenes:

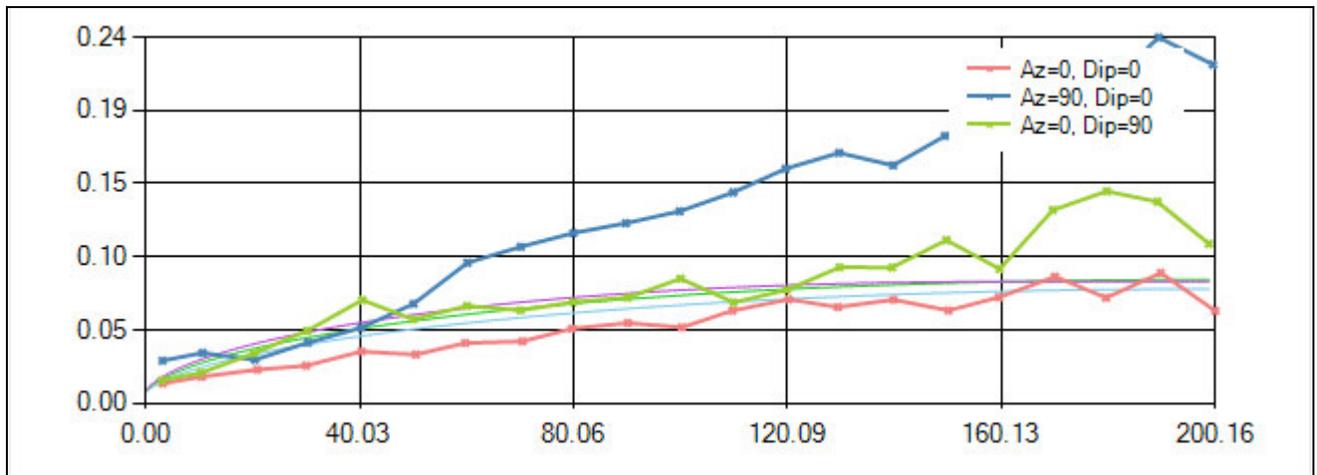


Imagen N°25 Variograma Modelado Unidad Estéril Simulación Plurigaussiana

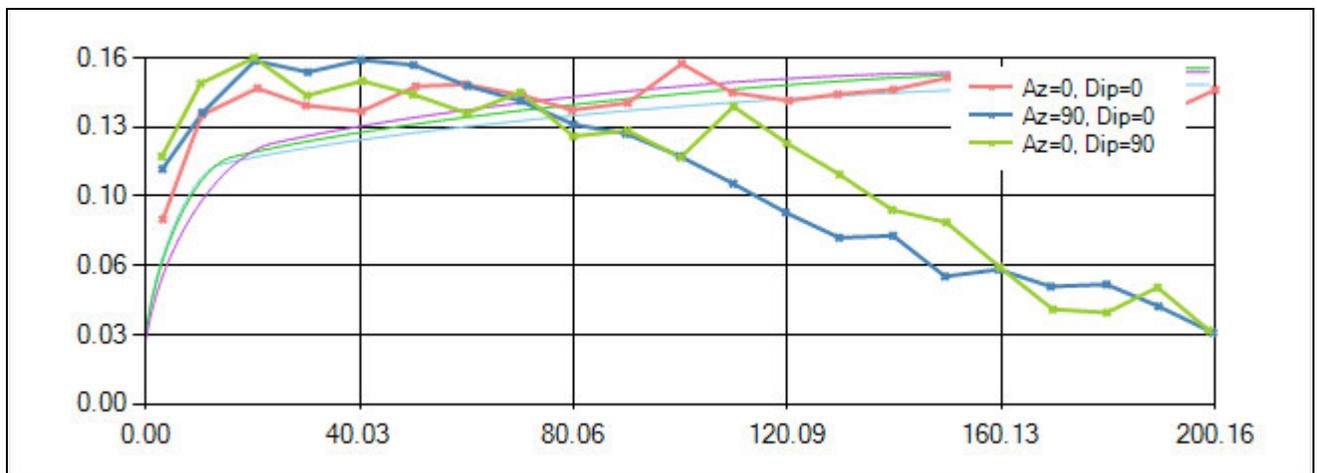


Imagen N°26 Variograma Modelado Unidad Brecha Simulación Plurigaussiana

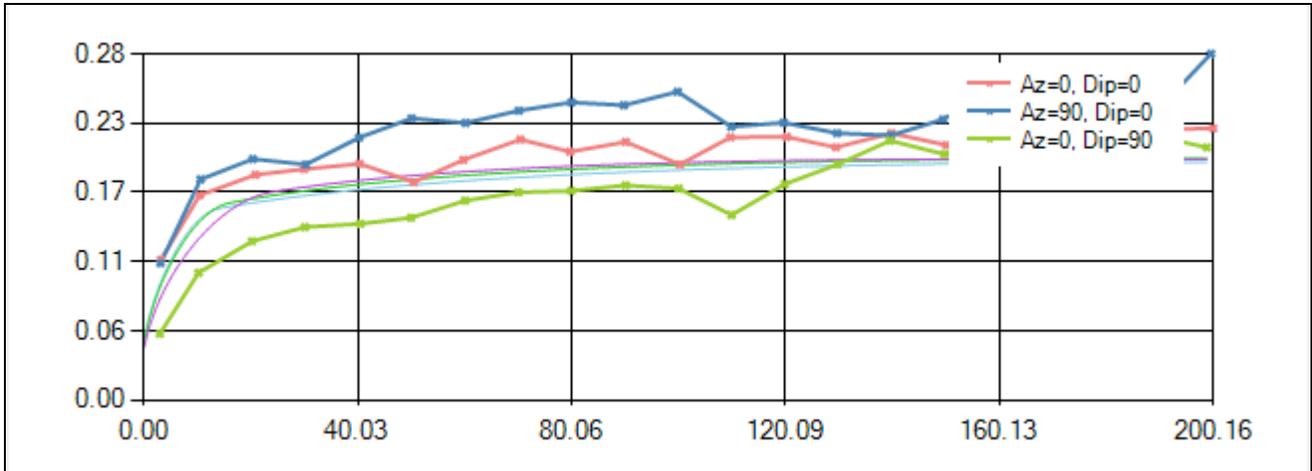


Imagen N°27 Variograma Modelado Unidad C1 Simulación Plurigaussiana

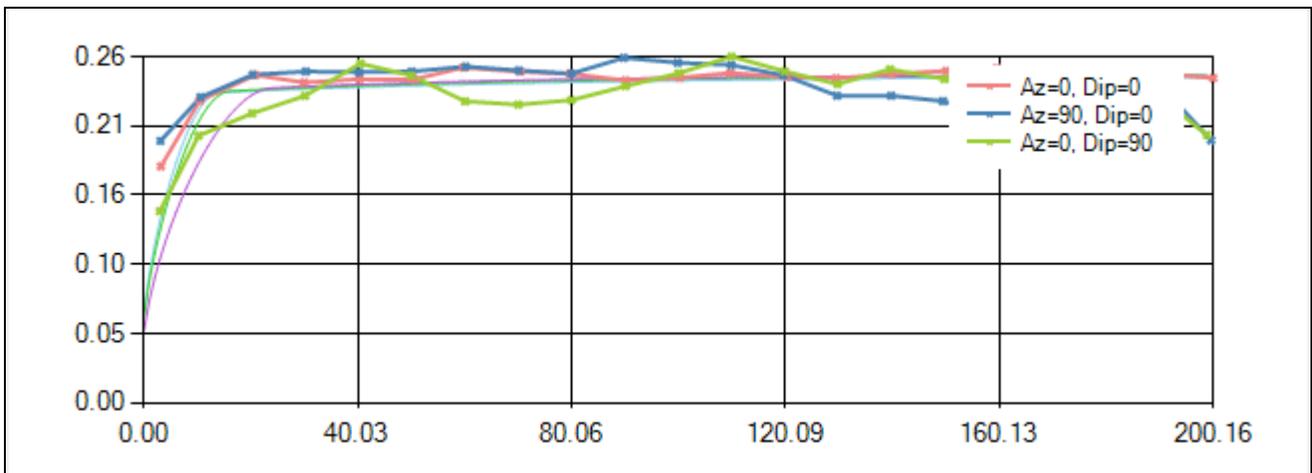


Imagen N°28 Variograma Modelado Unidad C5 Simulación Plurigaussiana

El modelo de los variogramas es el siguiente:

$$\gamma_{1^{era} \text{ Gaussiana}}(h) = 0.8 \cdot \text{esf}(200, 200, 160 \text{ m}) + 0.15 \cdot \text{esf}(\infty, 200, 160 \text{ m}) + 0.05 \cdot \text{esf}(\infty, 200, \infty \text{ m})$$

$$\gamma_{2^{da} \text{ Gaussiana}}(h) = 1 \cdot \text{esf}(15, 17, 25 \text{ m})$$

Cabe destacar la dificultad que existe en la modelación de los variogramas para la simulación plurigaussiana, esto es debido a que se realiza en forma simultánea para las distintas unidades geológicas. Es por esto que los variogramas modelados no reproducen a la perfección a los variogramas experimentales.

## **6.2.- Simulación Plurigaussiana**

Se realizan 200 simulaciones, teniendo un radio de búsqueda de datos de 100 metros en todas las direcciones. A continuación se despliegan las estadísticas básicas de las 200 realizaciones para cada una de las unidades litológicas.

	Mínimo			Maximo			Media		
	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tonelaje [Ton]	Porcentaje	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tonelaje [Ton]	Porcentaje	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tonelaje [Ton]	Porcentaje
<b>Esteril</b>	10.124	27.335	2,11%	54.416	146.923	11,34%	25.584	69.077	5,33%
<b>Brecha</b>	48.176	130.075	10,04%	97.112	262.202	20,23%	67.228	181.516	14,01%
<b>C1</b>	149.348	403.240	31,11%	206.220	556.794	42,96%	180.940	488.538	37,70%
<b>C5</b>	186.532	503.636	38,86%	239.796	647.449	49,96%	206.248	556.870	42,97%

Tabla N°10 Estadísticas básicas simulación plurigaussiana

Se desprende de las estadísticas de las simulaciones plurigaussianas que existe un amplio rango entre los distintos escenarios. Para este método de simulaciones, todas las unidades geológicas tienen una diferencia de aproximadamente 10% entre el escenario más optimista y más pesimista para dicha unidad. Las estimaciones calculadas para este tipo de simulaciones tienen por sobre el 39% en todo escenario posible la cantidad de unidad C5 y por otro lado se tiene que el escenario donde se encuentra el máximo de unidad estéril, que es la unidad que no aporta valor al yacimiento solo del 11%.

Se desea encontrar un intervalo de confianza del 95% de probabilidad, con el objetivo de saber entre qué valores se registran los mínimos y máximos de cada unidad litológica.

Para esto se debe considerar la distribución experimental que se genera a partir de los 200 valores simulados que se obtiene de la simulación plurigaussiana. De la distribución experimental se consideran los cuantiles 2,5% y 97,5% que permiten construir el intervalo de confianza requerido para todas las unidades geológicas en estudio.

A continuación se presenta en la tabla N°11 donde se muestra los mínimos y máximos con un 95% de confianza.

	Volumen [m <sup>3</sup> ]			Tonelaje [Ton]			Porcentaje		
	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo
Esteril	12.099	<b>25.584</b>	46.033	32.666	<b>69.076</b>	124.288	2,52%	<b>5,33%</b>	9,59%
Brecha	52.994	<b>67.228</b>	87.158	143.084	<b>181.515</b>	235.327	11,04%	<b>14,01%</b>	18,16%
C1	161.455	<b>180.939</b>	202.994	435.929	<b>488.536</b>	548.084	33,64%	<b>37,70%</b>	42,29%
C5	190.399	<b>206.249</b>	223.071	514.076	<b>556.873</b>	602.293	39,67%	<b>42,97%</b>	46,47%

Tabla N°11 Intervalo de confianza de 95% para simulación plurigaussiana

De la tabla anterior se puede inferir que existe un bajo porcentaje de existencia de la unidad estéril en la grilla de prueba, ya que es menor al 10% en todos sus casos. Y las unidades con mayor porcentaje de existencia son el C5, que tiene una media por sobre el 40%, y la unidad C1 que tiene sobre un 35% en la media.

Se realiza un promedio de las simulaciones por unidad geológica, con lo cual se efectúan mapas mostrando las zonas con mayor probabilidad de aparición de la unidad litológica. A continuación se muestran las imágenes de una planta de la grilla, con una leyenda en donde los colores cálidos muestran una mayor probabilidad de existencia, y por otra parte los colores fríos indican una menor probabilidad de aparición.

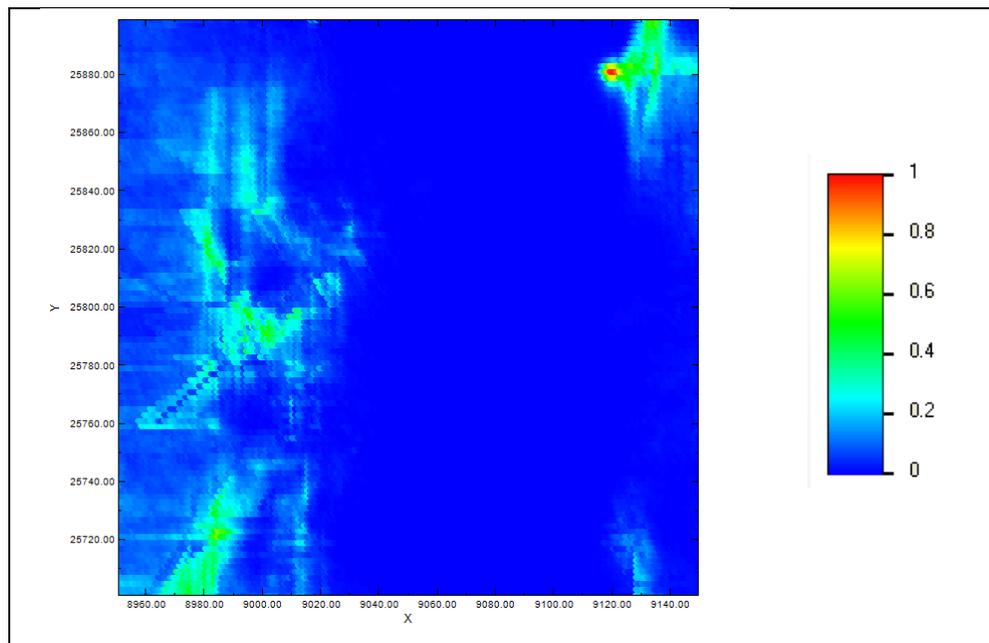


Imagen N°29 Promedio Simulaciones Plurigaussiana Unidad Estéril banco 2201

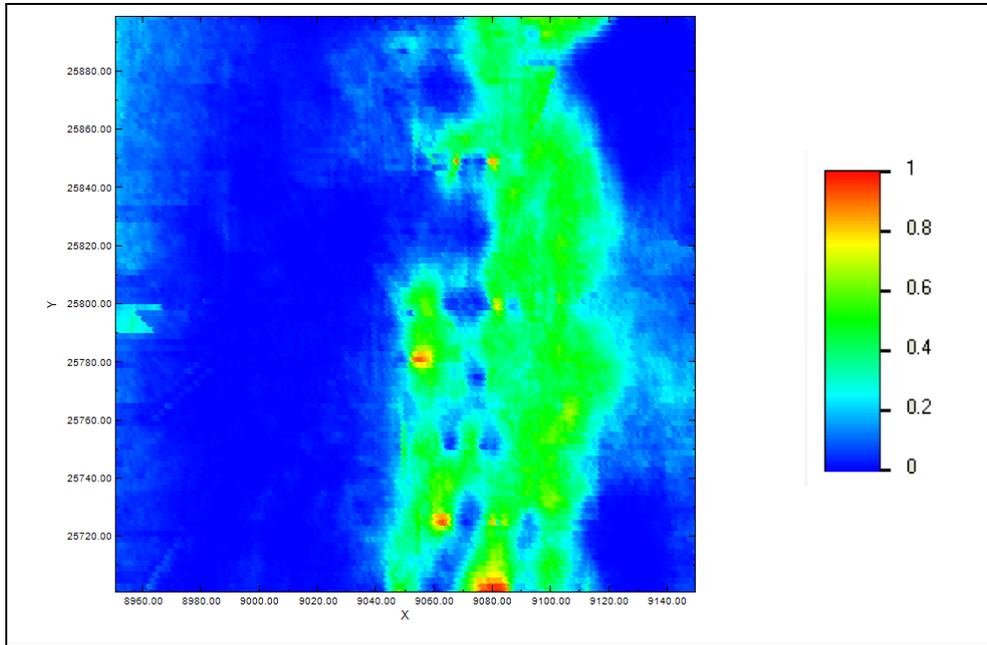


Imagen N°30 Promedio Simulaciones Plurigaussiana Unidad Brecha banco 2201

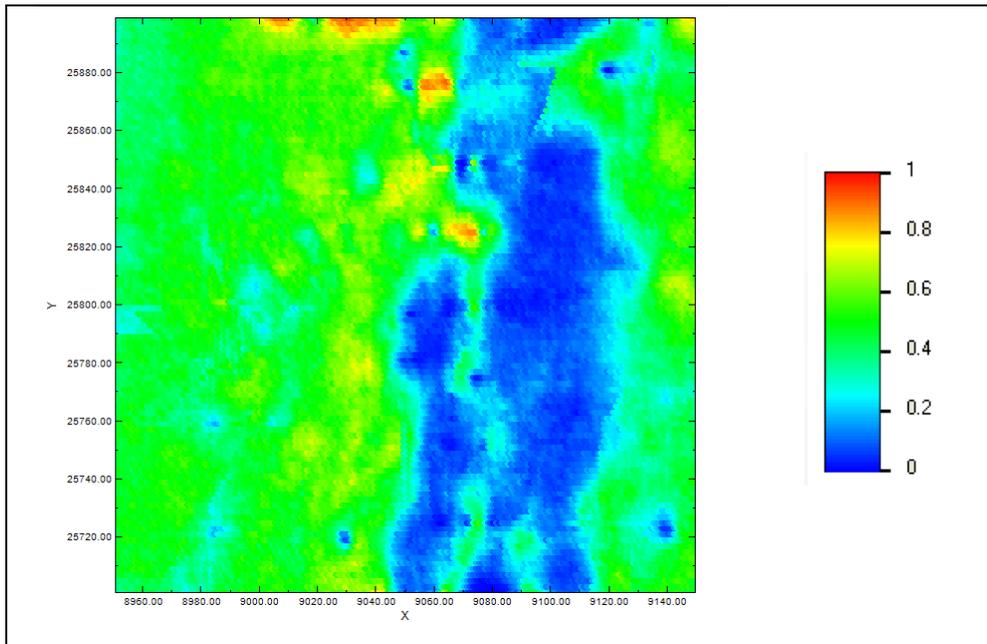


Imagen N°31 Promedio Simulaciones Plurigaussiana Unidad C1 banco 2201

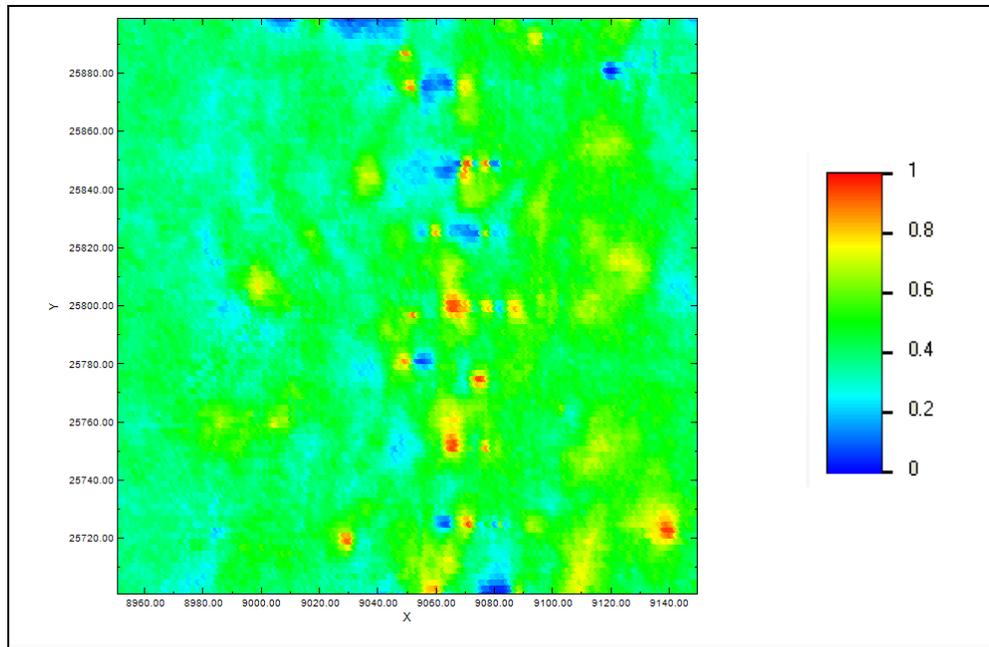


Imagen N°32 Promedio Simulaciones Plurigaussiana Unidad C5 banco 2201

### **6.3.- Validación de las Simulaciones Plurigaussianas**

De la misma manera que se efectúa la validación de la simulación secuencial de indicadores se realiza esta validación. Con lo cual se muestra a continuación una tabla con los errores medios que se cometen al realizar las simulaciones plurigaussianas.

	Simulación Plurigaussiana		
	Error Medio	Error Absoluto Medio	Error Cuadrático Medio
<b>Esteril</b>	-0,01661	0,17685	0,08624
<b>Brecha</b>	-0,02458	0,23342	0,10774
<b>C1</b>	-0,06502	0,42131	0,20297
<b>C5</b>	0,10620	0,49109	0,26014

Tabla N°12 Estudio de validación de simulaciones plurigaussianas

Se aprecia que para todas las unidades geológicas los errores son cercanos a 0, excepto la unidad C5 que tiene un error medio por sobre 0,1. Por lo que se puede concluir que las simulaciones para las unidades Estéril, Brecha y C1 se hacen sin sesgo, no diciendo lo mismo de la unidad C5.

## **7.- COMPARACIÓN DE MODELOS PROPUESTOS CONTRA EL MODELO CODELCO**

### **7.1.- Estadísticas Modelo Codelco**

En este capítulo se hace la comparación de los modelos creados en contra del modelo propuesto por Codelco para el yacimiento Mansa Mina.

Lo primero que se realiza es observar la nueva base de datos otorgada por Codelco donde está modelado todo el yacimiento de Mansa Mina. La base de datos consta de 6.555.803 bloques, por lo que es necesario hacer un filtro para extraer sólo a los bloques que corresponden a la grilla de prueba utilizada en el trabajo.

El modelo de bloques realizado por Codelco está definido por una malla irregular de bloques de los cuales no se tiene las dimensiones exactas de cada bloque, sino que va cambiando dependiendo del tipo de geología que se encuentra o el sector que esté describiendo.

Se presenta a continuación una figura de planta del sector de la grilla en el modelo Codelco para tener una idea de la distribución espacial que ha generado la empresa en las ubicaciones donde realizamos el estudio.

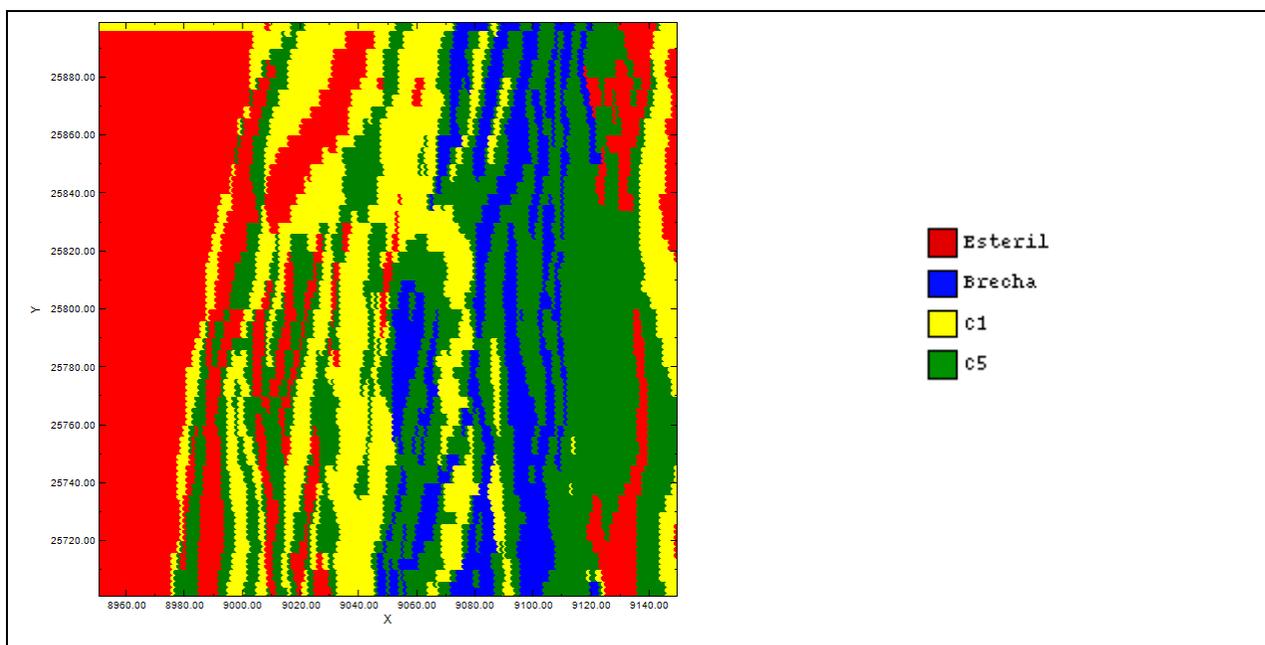


Imagen N°33 Planta grilla del modelo de Codelco banco 2201

De la imagen que se genera al desplegar los datos del modelo hecho por Codelco se aprecia claramente que de la coordenada 8980 hacia el Oeste no existe un claro estudio de la zona y lo declaran como zona de estéril en toda de la grilla.

De la coordenada 9000 hacia el Este se puede apreciar zonas bastante bien definidas como es el caso específico de entre las coordenadas 9050 y 9130 Este, donde existe una gran zona de unidad C5, la cual está siendo cruzada por vetas de brecha. Al Oeste de esta zona existe un sector donde es predominante la unidad C1, siendo cruzada por vetas de estéril y C5.

Se realiza un histograma de los datos que corresponden a la grilla y una tabla donde se detalla cada porcentaje de las unidades geológicas, en la cual también se muestran los volúmenes y tonelajes que se tiene en esta zona.

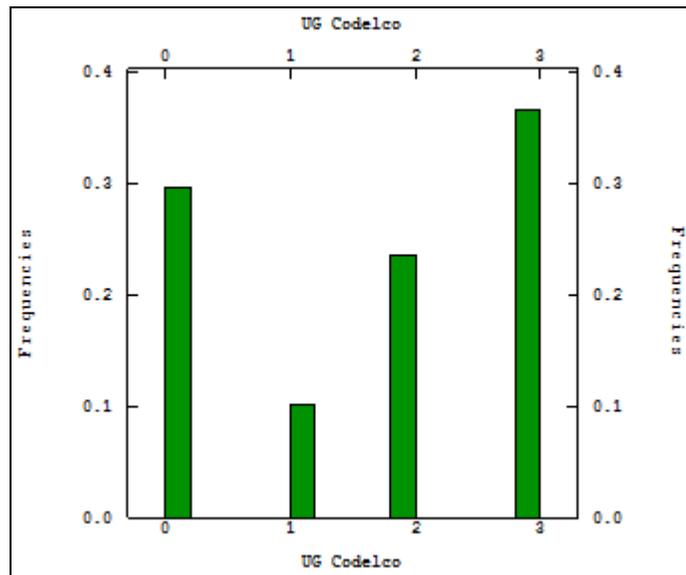


Imagen N°34 Histograma Modelo Codelco

	Número de Bloques	Proporciones	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tonelaje [Ton]
<b>Estéril</b>	35.604	29,67%	142.416	384.523
<b>Brecha</b>	12.114	10,10%	48.456	130.831
<b>C1</b>	28.308	23,59%	113.232	305.726
<b>C5</b>	43.974	36,65%	175.896	474.919
<b>Total</b>	<b>120.000</b>	<b>100%</b>	<b>480.000</b>	<b>1.296.000</b>

Tabla N°13 Estadísticas Básicas Modelo Codelco

## 7.2.- Elección Modelo Simulación

Para elegir un modelo de simulación por sobre otro, se procede a comparar las principales características de ellos, esto es las validaciones realizadas y los contactos entre las litologías.

Con el fin de contrastar los contactos de las distintas litologías de los dos métodos de simulación, se presenta a continuación imágenes de realizaciones efectuadas por la simulación secuencial de indicadores y la simulación plurigaussiana.

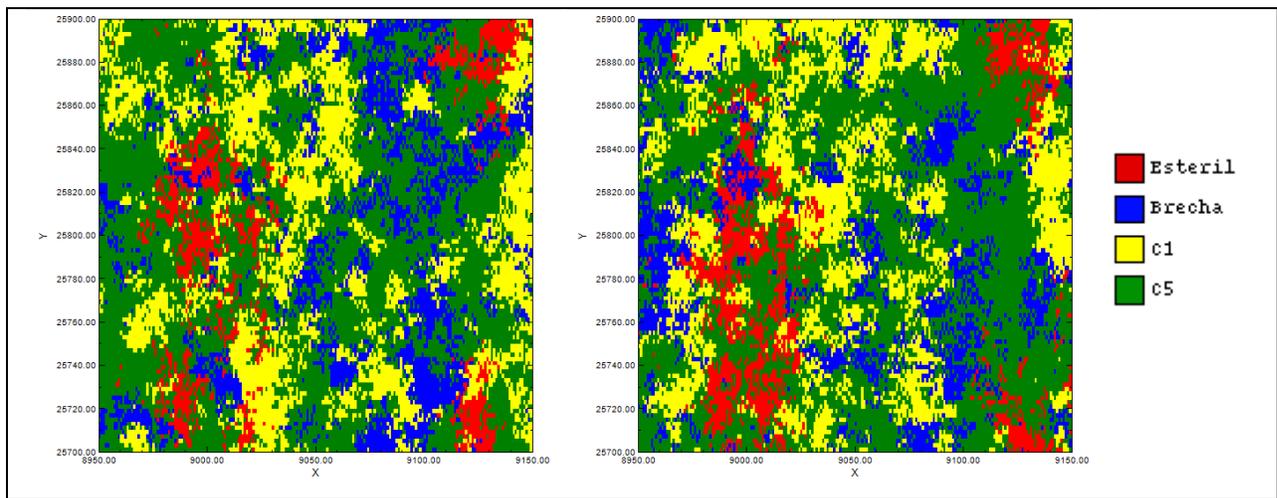


Imagen N°35 Realizaciones Simulación Secuencial de Indicadores

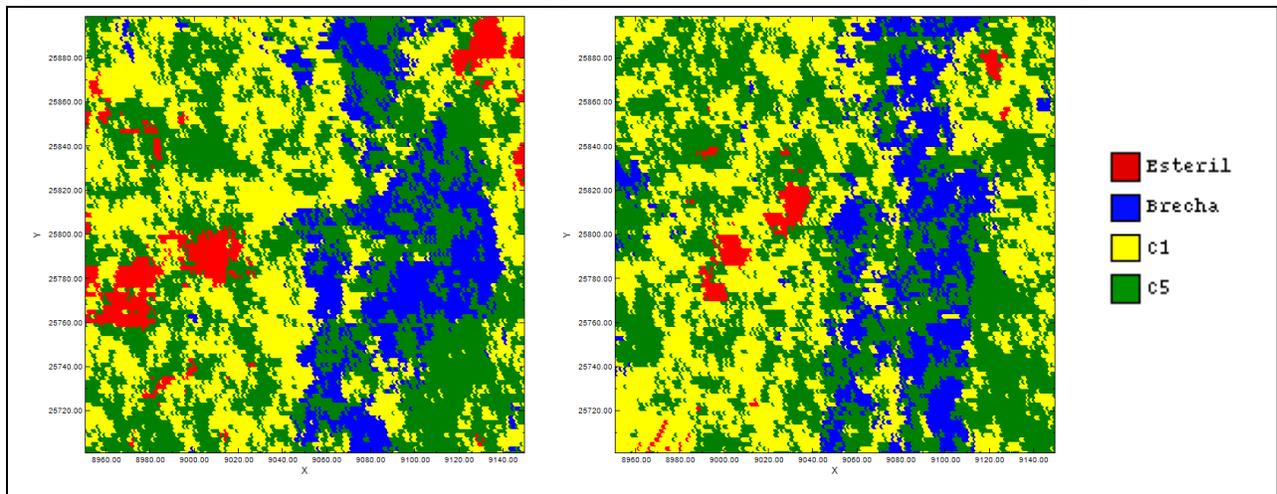


Imagen N°36 Realizaciones Simulación Plurigaussiana

Al realizar una comparación de las imágenes N°35 y N°36 en contra de la imagen N°34, se puede decir que existe una concordancia en la ubicación de las distintas unidades litológicas, como por ejemplo la presencia de la unidad brecha (color azul) que se ubica preferencialmente en el sector derecho de las imágenes de planta.

Al comparar la forma de los cuerpos de las diferentes litologías, se observa en la imagen N°34 que presenta el modelo geológico de Codelco, las unidades litológicas en forma de vetas bastante bien definidas. Para los modelos realizados por las simulaciones existe también la presencia de vetas pero con un menor grado de definición, esto es debido las imágenes de las simulaciones corresponden a realizaciones particulares de los modelos propuestos.

Otro tópico que es relevante en las imágenes de las realizaciones es el contacto que existe entre las distintas unidades litológicas. En el caso de la simulación secuencial de indicadores no existe ninguna restricción en el contacto entre ellas, por lo que existen contactos entre la unidad estéril y brecha (color rojo y color azul respectivamente), este tipo de contactos no existe en el modelo geológico propuesto por Codelco. Este tipo de contacto entre estas dos unidades no existe en el modelo plurigaussiano debido a la bandera utilizada, pero no se puede controlar en el modelo secuencial de indicadores.

Una característica importante para la comparación de los modelos de simulación es también las validaciones que se hacen de ellos, con el fin de escoger el modelo (simulación secuencial o plurigaussiana) que presente un error de estimación más cercano al valor 0.

Para esto se expone una tabla comparativa con los errores de cada modelo para hacer un símil entre las dos validaciones realizadas.

	Simulación Secuencial de Indicadores			Simulación Plurigaussiana		
	Error Medio	Error Absoluto Medio	Error Cuadrático Medio	Error Medio	Error Absoluto Medio	Error Cuadrático Medio
Esteril	-0,04351	0,18197	0,05385	-0,01661	0,17685	0,08624
Brecha	-0,02482	0,24458	0,11287	-0,02458	0,23342	0,10774
C1	-0,00428	0,38197	0,19370	-0,06502	0,42131	0,20297
C5	0,03402	0,49611	0,25195	0,10620	0,49109	0,26014

Tabla N°14 Comparación de validaciones de simulación secuencial de indicadores y simulación plurigaussiana

De la tabla se puede comparar las estadísticas de los errores en cada modelo. El punto de comparación que se tiene en los dos modelos es el error cometido con una de las unidades más importantes en el estudio como es la unidad C5, que en el método de simulación secuencial es del orden del 0,03 y en el método plurigaussiano se inclina por sobre el valor 0,10. Pasa algo similar si es que se

compara los errores cometidos en la unidad C1, ya que en el método plurigaussiano es una unidad de magnitud superior al método secuencial.

Luego de efectuar esta comparación entre los dos modelos de simulación cabe destacar las limitaciones que tiene cada uno de estos. Como primer punto se tiene la incapacidad del método secuencial de indicadores de tener una jerarquía de las distintas unidades geológicas, es decir, que no hace distinción si existe una restricción de característica geológica en el contacto de las distintas unidades dentro del yacimiento. Por otro lado, el modelo de simulación plurigaussiano tiene la limitación en la generación del modelo variográfico, ya que existe la condición de tener que modelar todos los variogramas de indicadores con solamente dos variables Gaussianas, y para el caso específico del estudio, se hace imposible hacer un perfecto modelo variográfico.

Por todo esto se estima conveniente usar el modelo de simulación secuencial de indicadores como punto de comparación en contra del modelo propuesto por Codelco, ya que al tener mayor error de estimación en la unidad C5, que contiene mayor cantidad de cobre, y la incapacidad de hacer un modelo variográfico óptimo en la simulación plurigaussiana, uno debe aceptar el modelo generado por la simulación secuencial.

### **7.3.- Comparación modelo de simulación secuencial de indicadores en contra del modelo de Codelco**

La comparación del modelo generado por las simulaciones secuenciales de indicadores versus el modelo generado por Codelco se hace de dos formas distintas: 1) de manera gráfica, esto quiere decir comparando dentro de la grilla las ubicaciones espaciales de cada unidad geológica, 2) cuantitativamente haciendo una comparación entre los volúmenes y tonelajes de los dos modelos en cuestión.

Como primera consideración en la etapa de comparación gráfica de los modelos se tiene en cuenta que en las próximas imágenes se muestran un par de plantas de la zona de interés. La imagen de la izquierda corresponde al modelo de Codelco, en donde está representada la unidad geológica en estudio por el color azul y el resto de la grilla donde existen otras unidades, el color rojo. En tanto, la imagen de la derecha representa la probabilidad de aparición del modelo de simulación secuencial de indicadores.

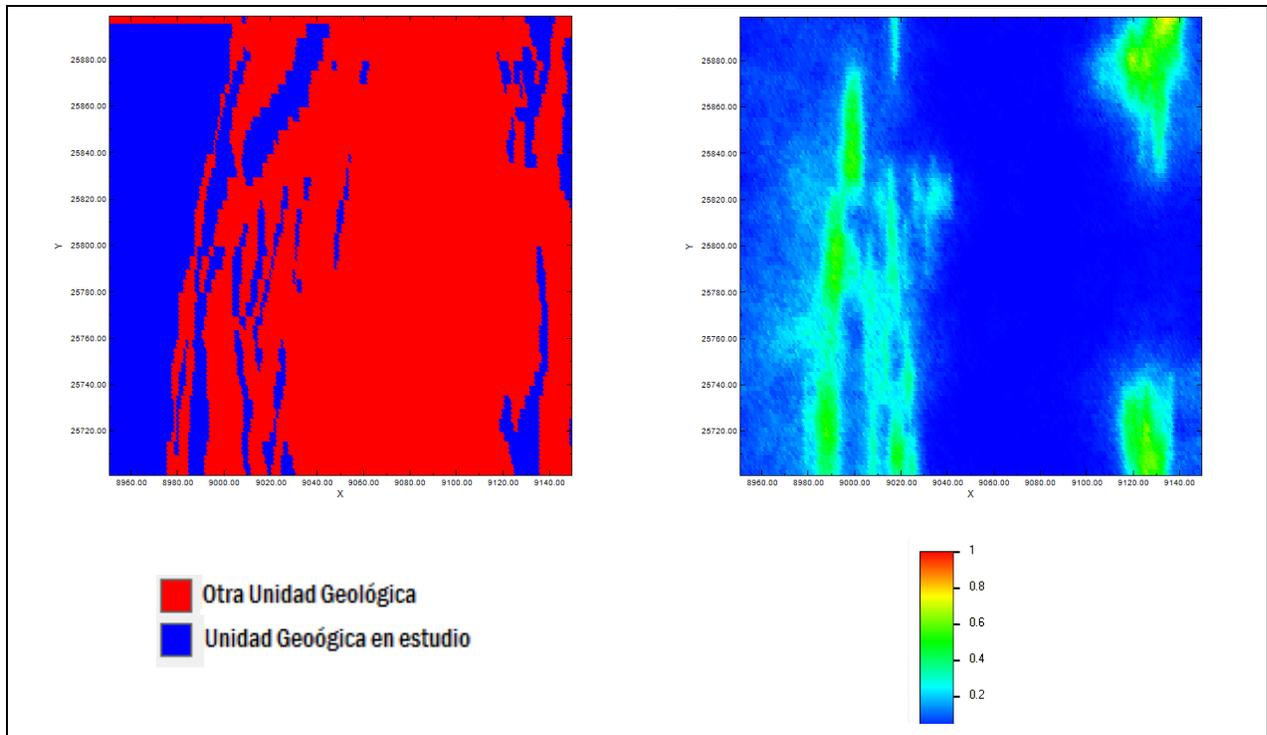


Imagen N°37 Comparación del modelo de Codelco v/s modelo de simulación secuencial para la unidad estéril banco 2201

Comenzando con la comparación gráfica de la unidad estéril existe una relación entre las probabilidades de aparición y el modelo de Codelco, salvo el sector del extremo Oeste de la grilla en donde se tiene un sector completo que tiene presencia de estéril, por lo que cabe pensar que no existe un estudio acabado de esa zona por parte del modelo de Codelco.

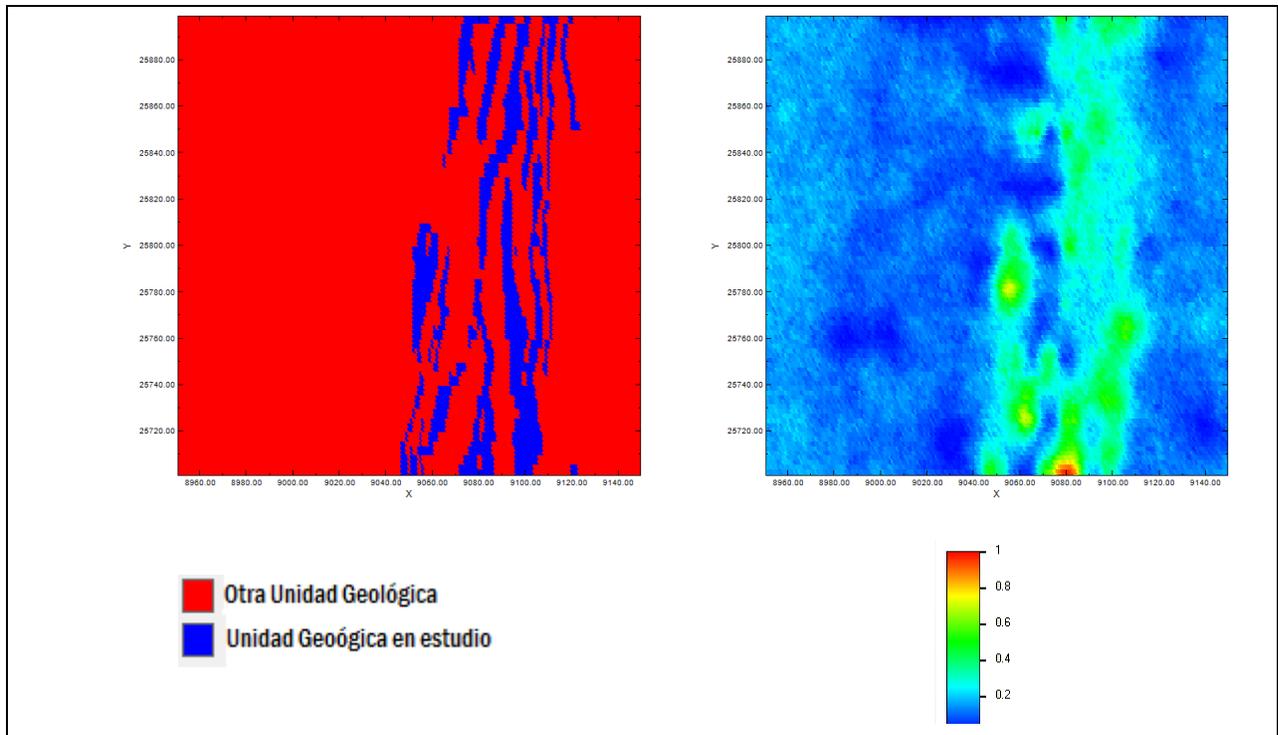


Imagen N°38 Comparación del modelo de Codelco v/s modelo de simulación secuencial para la unidad brecha banco 2201

Para el caso de la unidad brecha, el modelo hecho a través de la simulación secuencial indica una zona clara en donde existe una mayor probabilidad de presencia de brecha, y efectivamente el modelo de Codelco avala esto al tener en esta zona exclusiva la presencia de brecha. Cabe recalcar que en el modelo secuencial también existe presencia mínima de unidad de brecha en gran parte del yacimiento, pero no se hace efectivo en el modelo de Codelco.

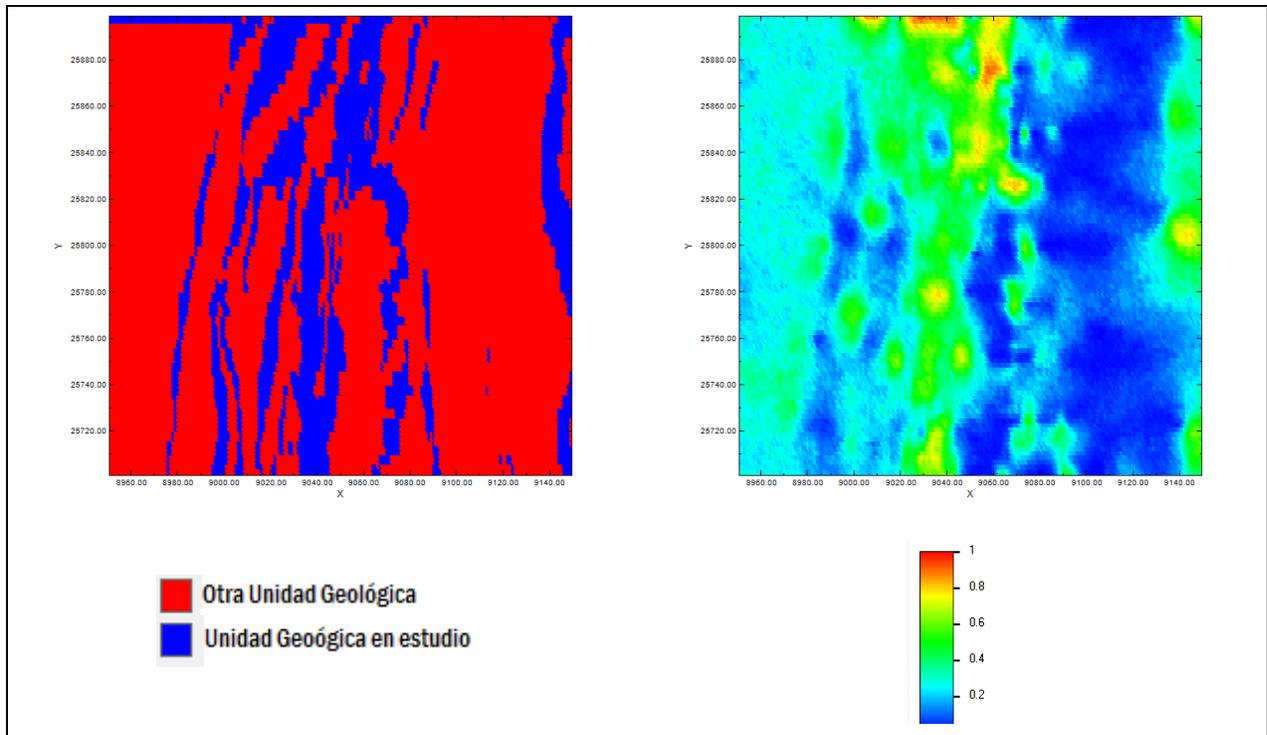


Imagen N°39 Comparación del modelo de Codelco v/s modelo de simulación secuencial para la unidad C1 banco 2201

Para la unidad C1, se presenta en dos grandes zonas en el modelo generado por Codelco, en la zona central de la grilla donde existe presencia geológica en forma de vetas y en el extremo de dirección Este existe la presencia de una franja de esta misma unidad. En el modelo generado por la simulación existen estas mismas dos zonas que son claramente identificables, salvo que en las simulaciones no existe una identificación clara de las vetas de la unidad.

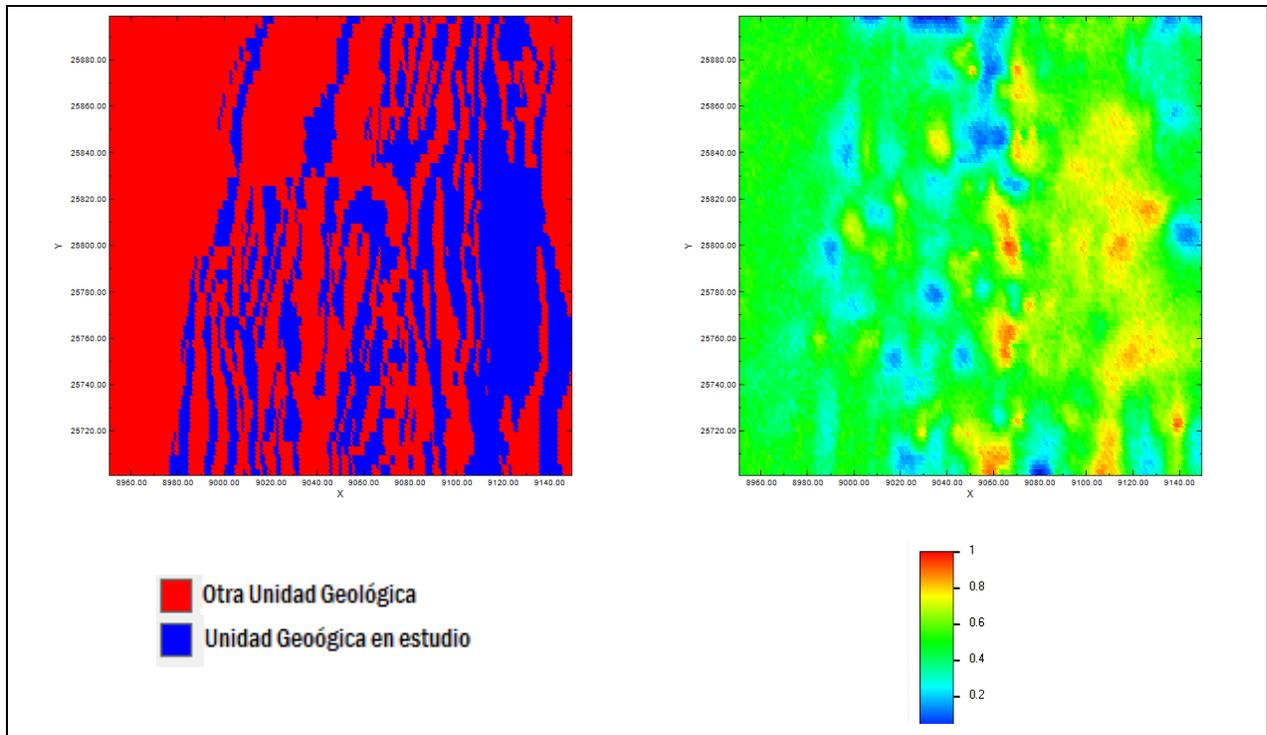


Imagen N°40 Comparación del modelo de Codelco v/s modelo de simulación secuencial para la unidad C5 banco 2201

La unidad C5 para el modelo de Codelco es la que tiene mayor preponderancia ya que está presente en la mayor parte de la grilla de prueba. Para el modelo de simulación existe una alta probabilidad de existencia a lo largo de toda la grilla, inclusive en el sector Oeste, lo que representa una incongruencia entre estos dos modelos, ya que para el caso del modelo de Codelco no existe esta unidad en ese sector en específico.

Primeramente se realiza una tabla comparativa entre los porcentajes estimados por la simulación secuencial y el modelo realizado por Codelco, incluyendo también el rango de mínimo o máximo de las simulaciones para establecer si se adecuan al rango del modelo de Codelco. A continuación se muestra la tabla comparativa:

	PORCENTAJE			
	Simulación Secuencial de Indicadores			Modelo Codelco
	Mínimo	Media	Máximo	
<b>Esteril</b>	6,83%	<b>9,96%</b>	13,08%	29,66%
<b>Brecha</b>	12,81%	<b>15,99%</b>	19,17%	10,10%
<b>C1</b>	21,05%	<b>25,44%</b>	29,83%	23,59%
<b>C5</b>	43,70%	<b>48,61%</b>	53,53%	36,65%

Tabla N°15 Tabla Comparativa de porcentaje entre modelo secuencial y modelo de Codelco

Se considera de la tabla anteriormente expuesta, que es aquella que resume en gran parte el tema de la comparación de volúmenes y tonelajes, ya que de esta tabla se extraen estas medidas. Como primer punto se puede ver que la unidad que más se ajusta al rango de las simulaciones, es la unidad C1 ya que solamente tiene 2 puntos porcentuales por debajo de la media, por lo que se considera que cabe dentro de las posibilidades del yacimiento simulado. Como una segunda acotación hay que tener en cuenta lo que sucede con la unidad estéril que está por sobre todo el rango de estimación que se tiene. Un factor clave de porque pasa esto es debido a lo que ocurre en la zona oeste de la grilla de prueba, donde existen pocos datos condicionantes y donde el modelo de simulaciones puede estar completamente incorrecto, ya que lo que se predice es que existen por lo menos tres unidades geológicas en esa zona (estéril, C1 y C5). Con esto expuesto se explica el porqué de la baja existencia de la unidad C5 en el modelo propuesto por Codelco.

Para la unidad brecha, el modelo propuesto por las simulaciones es un poco más optimista que el modelo de Codelco, ya que estima unos 5 puntos porcentuales por sobre lo que se puede extraer del modelo de Codelco.

A continuación se expone las tablas de volúmenes y tonelajes para una comparación entre los dos métodos expuestos:

	VOLUMEN [M <sup>3</sup> ]			
	Simulación Secuencial de Indicadores			Modelo Codelco
	Mínimo	Media	Máximo	
<b>Esteril</b>	32.798	<b>47.789</b>	62.779	142.368
<b>Brecha</b>	61.504	<b>76.751</b>	91.997	48.480
<b>C1</b>	101.046	<b>122.112</b>	143.178	113.232
<b>C5</b>	209.752	<b>233.348</b>	256.945	175.920

Tabla N°16 Tabla Comparativa de volumen entre modelo secuencial y modelo de Codelco

	TONELAJE [TON]			
	Simulación Secuencial de Indicadores			Modelo Codelco
	Mínimo	Media	Máximo	
<b>Esteril</b>	88.555	<b>129.030</b>	169.504	384.394
<b>Brecha</b>	166.061	<b>207.227</b>	248.393	130.896
<b>C1</b>	272.825	<b>329.703</b>	386.580	305.726
<b>C5</b>	566.331	<b>630.041</b>	693.751	474.984

Tabla N°17 Tabla Comparativa de tonelaje entre modelo secuencial y modelo de Codelco

Si bien siguen siendo los mismos porcentajes de diferencia entre las distintas unidades geológicas, al apreciar la cantidad de mineral que puede estar mal catalogado de unidad, quizás se deba hacer un nuevo modelo considerando las grandes diferencias de tonelaje y volumen de cada unidad geológica.

## **8.- CONCLUSIONES**

El problema de las simulaciones condicionales en cuanto a la reproducción de las variables categóricas en el espacio, se presenta principalmente en zonas donde, debido a la presencia de pocos datos condicionantes, la simulación se apoya en la media global de los datos para compensar la carencia de información. Cuando esta media global es inadecuada localmente (promedio de derivas o valores promedios variables en el espacio), se obtiene estimaciones distorsionadas que no reflejan el real comportamiento de las variables categóricas.

Al realizar un estudio de variables categóricas se debe confiar plenamente en la calidad de los datos con los que se trabaja y esto depende en gran parte de la experiencia del equipo de geólogos que hace el estudio del yacimiento, ya que son ellos los que estudian las distintas muestras y las encasillan en una unidad litológica determinada.

Debido a la geología del yacimiento en estudio, es decir, vetas y vetillas de distintas unidades litológicas cruzadas entre sí, los datos condicionantes no muestran continuidad a lo largo de los sondajes de estudio. Esto se ve influido en el modelamiento de los distintos variogramas de indicadores, ya que se puede apreciar claramente que tienen un bajo alcance, lo que se traduce en una alta variabilidad de las unidades en pocos metros de estudio.

Las estimaciones para variables categóricas se pueden realizar bajo distintos métodos, que en este estudio abarca principalmente dos en particular, que son el kriging de indicadores y las simulaciones para variables categóricas. Una ventaja fundamental de las simulaciones con respecto al kriging es la posibilidad que da este de generar tantos escenarios posibles como uno quiera y así poder extraer de éstos estadísticas sobre la incertidumbre y el riesgo, a través de estimaciones de máximos y mínimos posibles en las simulaciones.

La validación de las simulaciones es parte fundamental para la aprobación de los métodos de simulación realizado. Aunque se tenga una validación sin sesgo ya que el promedio de los errores es cercano a cero, por otra parte se tiene una desviación estándar según la cual no es precisa la estimación. Esto es perfectamente explicable debido a los variogramas utilizados, su bajo alcance y alta variabilidad.

Para el caso de la simulación secuencial de indicadores se tiene a favor de su utilización el hecho de que se modela cada variograma de indicador de forma independiente uno del otro, por lo que el modelo variográfico es una buena representación de la distribución espacial del yacimiento. Este mismo punto es criticable para la simulación plurigaussiana, ya que en este caso de estudio falta flexibilidad para poder modelar perfectamente los variogramas de indicadores.

A través de los distintos métodos de simulación utilizados en este trabajo cabe resaltar los contactos litológicos de las diferentes unidades geológicas. Un ejemplo de la posible jerarquización que tienen las litologías es el expuesto en la bandera de truncación del modelo plurigaussiano, que es un modelo perfectamente aplicable en el yacimiento Mansa Mina.

La simulación secuencial de indicadores nos entrega una incertidumbre de aproximadamente 10 puntos porcentuales en cada unidad geológica en estudio, por lo que se debe tener en consideración al realizar un estudio de factibilidad económica del yacimiento Mansa Mina, debido a que es un rango amplio en cada unidad geológica y puede que influya demasiado en las grandes sumas de dinero que se invierte en la industria minera.

El modelo geológico propuesto por Codelco abarca la mayor parte del yacimiento Mansa Mina, y al hacer un estudio en una ubicación en particular de este yacimiento, se encuentran diferencias apreciables con las simulaciones. Esto se debe principalmente a que el modelo geológico de Codelco hace un estudio más detallado en la zona que ocupa la brecha, esto es en el centro del yacimiento, y cuando se efectúan estimaciones al oeste de este sector se aprecia que no están bien definidas las zonas de la periferia.

Es debido a esto que se recomienda hacer un estudio más exhaustivo de la zona que se ubica al oeste de la brecha, ya que de las estimaciones calculadas por las simulaciones, esta zona podría contener un gran volumen y con esto un gran tonelaje de mineral.

## **9.- BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Alabert, F., 1987. Stochastic imaging of spatial distributions using hard and soft information. Master thesis, Stanford University, Department of Applied Earth Sciences, 198 p.
- [2] Armstrong, M., Galli, A., LeLoc'h, G., Geffroy, F., and Eschard, R., 2003, Plurigaussian simulation in geosciences, Berlin: Springer.
- [3] Chilès, J.P. and Delfiner, P., 1999, Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty, Wiley, New York, 695 p.
- [4] Deutsch, CV., Journel, AG., 1998, GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, 2<sup>nd</sup> Edition. Oxford University Press, New York, 369 p.
- [5] Deutsch, CV., 2006, A sequential indicator simulation program for categorical variables with point and block data: BlockSIS, Computers & Geosciences 32.
- [6] Emery, X., 2000, Geoestadística Lineal, Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile, 221 p.
- [7] Emery, X., 2007, Simulation of Geological domains using the plurigaussian model: New developments and computer programs, Computers & Geosciences 33, 1189 – 1201 p.
- [8] Galli, A., Beucher, H., Le Loc'h, G., Doligez, B., and Heresim Group, 1994, The Pros and Cons of the Truncated Gaussian Method, Geostatistical Simulations, Kluivier, Dordrechk, 217 p

- [9] Goovaerts, P., 1997, Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press, New York, 480 p.
- [10] Journel, AG. and Gómez-Hernández, J., 1993, Stochastic Imaging of the Wilmington Clastic Sequence, SPE 19857.
- [11] Lantuéjoul, C., 2002, Geostatistical Simulation: models and algorithms, Springer, Berlin, 256 p
- [12] Skvortsova, T., Armstrong, M., Beucher, H., Forkes, J., Thwaites, A. and Turner, R., 2000, Applying Plurigaussian Simulations to a Granite-Hosted Orebody, Geostats 2000 Cape Town, Volume 2, 904-911 p.
- [13] Soares, A., 1998, Sequential Indicator Simulation with Correction for Local Probabilities, Mathematical Geology, Vol. 30, No 6.

## **10.-ANEXOS**

### **10.1.- Análisis variográfico**

Con la finalidad de detectar direcciones de anisotropía se calculó mapas variográficos en tres secciones, una horizontal y dos verticales en direcciones norte y este. Los mapas obtenidos se presentan en las imágenes que siguen a continuación, donde se puede ver que si bien en la sección horizontal se muestra una anisotropía clara, en las secciones verticales se puede observar bandas que indican que la continuidad espacial de las distintas unidades geológicas no es la misma que en la horizontal

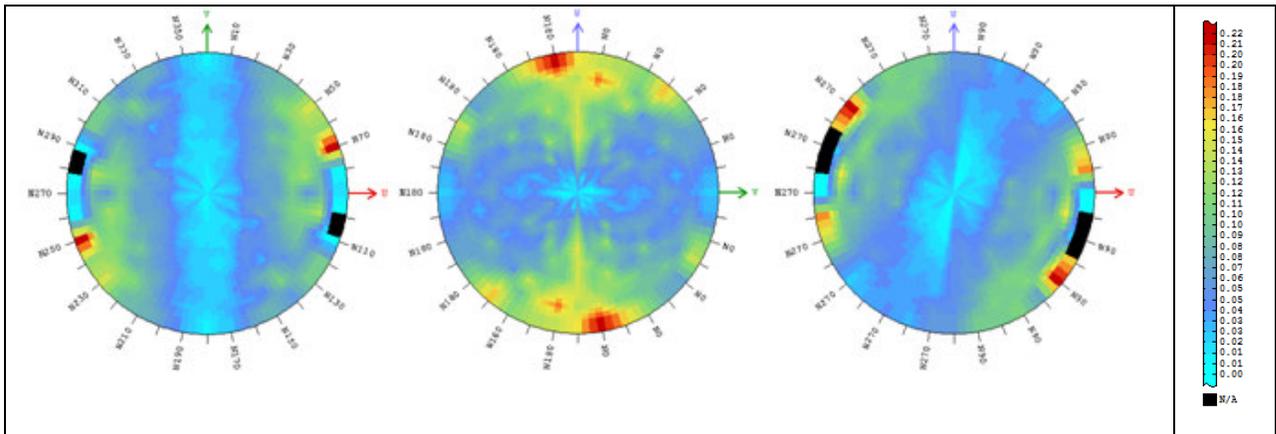


Imagen N°41 Mapa Variográfico Unidad Estéril de izquierda a derecha: secciones horizontal, vertical norte, vertical este

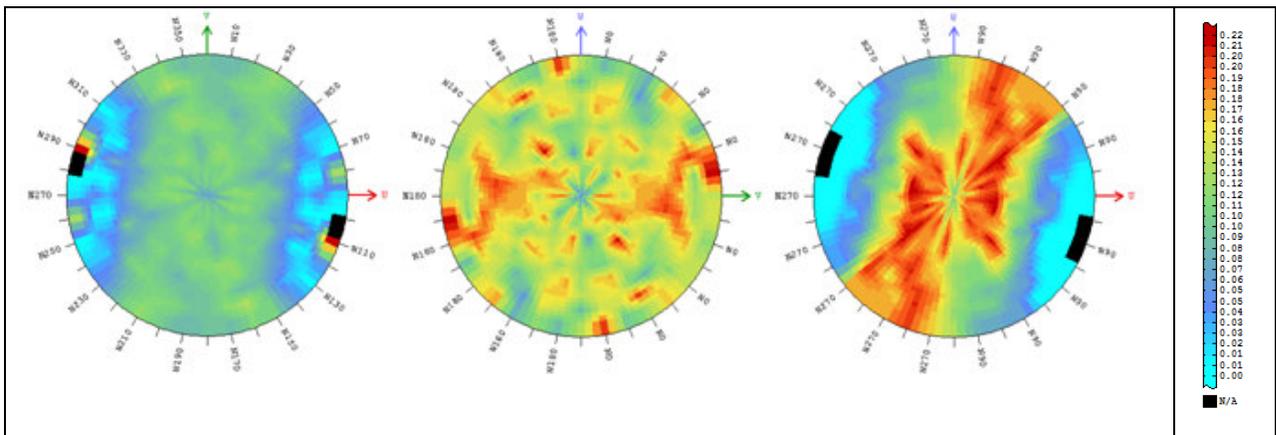


Imagen N°42 Mapa Variográfico Unidad Brecha de izquierda a derecha: secciones horizontal, vertical norte, vertical este

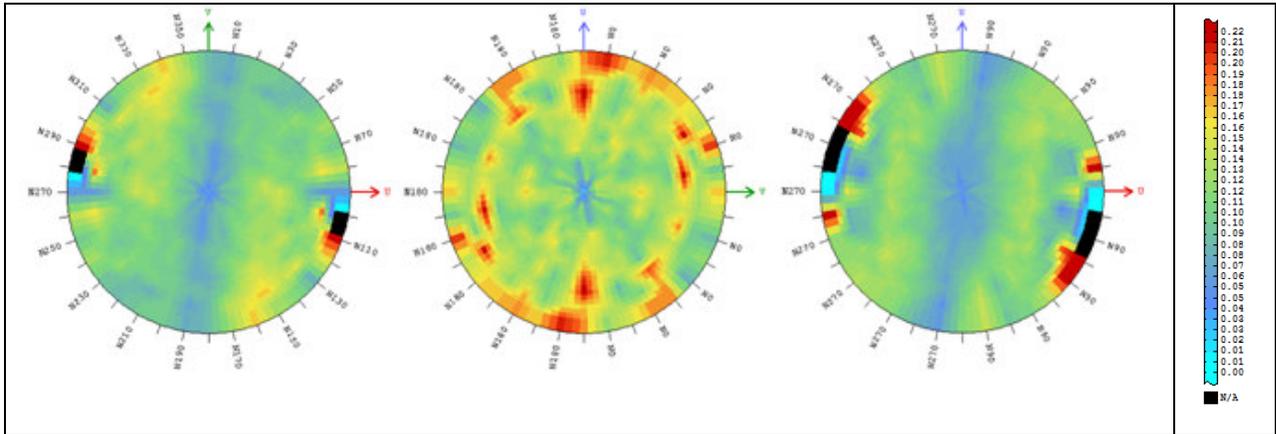


Imagen N°43 Mapa Variográfico Unidad C1 de izquierda a derecha: secciones horizontal, vertical norte, vertical este

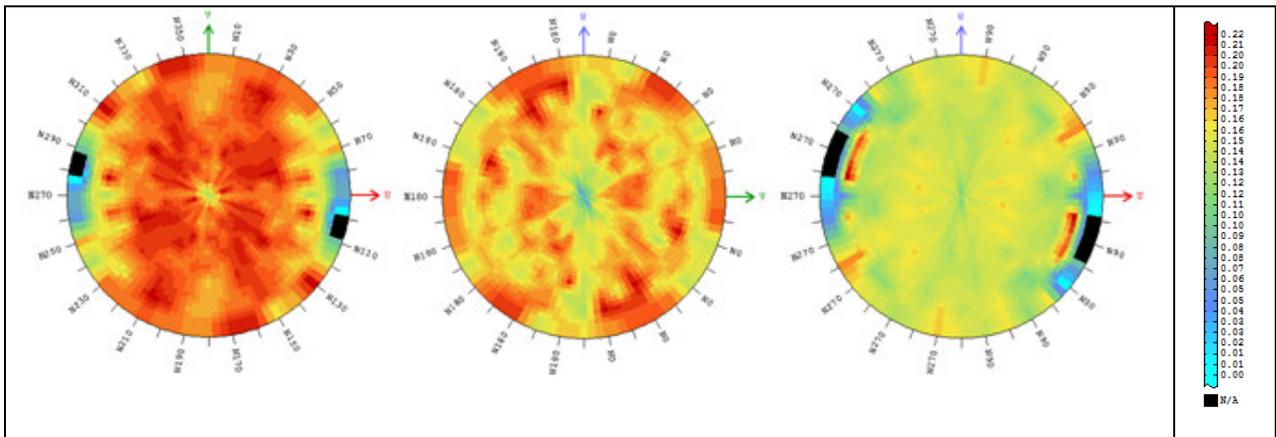


Imagen N°44 Mapa Variográfico Unida C5 de izquierda a derecha: secciones horizontal, vertical norte, vertical este

De las imágenes anteriormente expuestas se puede concluir que en las direcciones horizontales, Este y Norte existe anisotropía, por lo que se efectuará los variogramas correspondientes a estas direcciones por separado. Y en la dirección vertical al plano tampoco se ve expresamente una dirección preferencial, por lo que los ejes que se utilizan para los variogramas posteriores serán en dirección Este, Norte y Profundidad, todos ortogonales entre sí.

## 10.2.- Detalle de Simulación Secuencial de Indicadores

Volumen de las unidades geológicas Esteril, Brecha, C1 y C5 para cada simulación								
Simulacion	Numero de Bloques				Porcentaje [%]			
	Esteril	Brecha	C1	C5	Estéril	Brecha	C1	C5
1	10.598	18.117	32.985	58.300	8,83%	15,10%	27,49%	48,58%
2	13.568	15.995	29.882	60.555	11,31%	13,33%	24,90%	50,46%
3	13.901	20.805	27.954	57.340	11,58%	17,34%	23,30%	47,78%
4	13.049	18.359	30.909	57.683	10,87%	15,30%	25,76%	48,07%
5	12.807	21.557	26.610	59.026	10,67%	17,96%	22,18%	49,19%
6	11.847	22.717	31.178	54.258	9,87%	18,93%	25,98%	45,22%
7	10.921	17.715	34.955	56.409	9,10%	14,76%	29,13%	47,01%
8	10.315	21.434	27.939	60.312	8,60%	17,86%	23,28%	50,26%
9	13.467	17.027	31.500	58.006	11,22%	14,19%	26,25%	48,34%
10	12.285	19.383	34.565	53.767	10,24%	16,15%	28,80%	44,81%
11	10.831	18.710	32.504	57.955	9,03%	15,59%	27,09%	48,30%
12	9.292	18.189	31.704	60.815	7,74%	15,16%	26,42%	50,68%
13	11.509	19.731	31.367	57.393	9,59%	16,44%	26,14%	47,83%
14	12.310	19.839	30.668	57.183	10,26%	16,53%	25,56%	47,65%
15	11.253	20.347	25.812	62.588	9,38%	16,96%	21,51%	52,16%
16	12.253	18.371	28.210	61.166	10,21%	15,31%	23,51%	50,97%
17	9.625	17.973	34.229	58.173	8,02%	14,98%	28,52%	48,48%
18	12.506	21.288	27.303	58.903	10,42%	17,74%	22,75%	49,09%
19	16.367	18.259	31.178	54.196	13,64%	15,22%	25,98%	45,16%
20	10.376	21.857	31.657	56.110	8,65%	18,21%	26,38%	46,76%
21	11.589	21.029	32.644	54.738	9,66%	17,52%	27,20%	45,62%
22	9.591	23.003	33.148	54.258	7,99%	19,17%	27,62%	45,22%
23	10.208	21.569	27.935	60.288	8,51%	17,97%	23,28%	50,24%
24	12.734	20.552	29.782	56.932	10,61%	17,13%	24,82%	47,44%
25	11.196	19.790	28.908	60.106	9,33%	16,49%	24,09%	50,09%
26	13.017	16.901	32.187	57.895	10,85%	14,08%	26,82%	48,25%
27	10.395	19.170	32.784	57.651	8,66%	15,98%	27,32%	48,04%
28	9.058	23.033	28.112	59.797	7,55%	19,19%	23,43%	49,83%
29	9.982	18.788	33.416	57.814	8,32%	15,66%	27,85%	48,18%
30	12.753	18.918	35.760	52.569	10,63%	15,77%	29,80%	43,81%
31	14.284	19.905	25.523	60.288	11,90%	16,59%	21,27%	50,24%
32	12.762	17.484	29.489	60.265	10,64%	14,57%	24,57%	50,22%
33	13.745	18.378	27.497	60.380	11,45%	15,32%	22,91%	50,32%
34	14.131	22.255	23.572	60.042	11,78%	18,55%	19,64%	50,04%
35	10.825	21.026	28.360	59.789	9,02%	17,52%	23,63%	49,82%
36	9.904	18.138	29.019	62.939	8,25%	15,12%	24,18%	52,45%
37	12.621	20.047	30.931	56.401	10,52%	16,71%	25,78%	47,00%
38	10.386	19.486	32.253	57.875	8,66%	16,24%	26,88%	48,23%
39	10.024	18.807	32.139	59.030	8,35%	15,67%	26,78%	49,19%
40	14.861	21.423	27.243	56.473	12,38%	17,85%	22,70%	47,06%
41	8.007	20.130	29.110	62.753	6,67%	16,78%	24,26%	52,29%
42	11.772	19.238	28.909	60.081	9,81%	16,03%	24,09%	50,07%
43	12.175	18.188	30.352	59.285	10,15%	15,16%	25,29%	49,40%
44	11.316	20.811	31.275	56.598	9,43%	17,34%	26,06%	47,17%
45	9.626	17.417	34.060	58.897	8,02%	14,51%	28,38%	49,08%
46	11.965	17.829	31.869	58.337	9,97%	14,86%	26,56%	48,61%
47	12.792	18.718	32.533	55.957	10,66%	15,60%	27,11%	46,63%
48	13.989	20.558	32.971	52.482	11,66%	17,13%	27,48%	43,74%
49	13.215	20.567	27.361	58.857	11,01%	17,14%	22,80%	49,05%
50	12.153	22.319	29.900	55.628	10,13%	18,60%	24,92%	46,36%

### Volumen de las unidades geológicas Esteril, Brecha, C1 y C5 para cada simulación

Simulación	Numero de Bloques				Porcentaje [%]			
	Esteril	Brecha	C1	C5	Estéril	Brecha	C1	C5
51	14.507	20.216	25.873	59.404	12,09%	16,85%	21,56%	49,50%
52	11.131	19.727	30.243	58.899	9,28%	16,44%	25,20%	49,08%
53	15.064	23.051	24.984	56.901	12,55%	19,21%	20,82%	47,42%
54	9.687	19.715	28.910	61.688	8,07%	16,43%	24,09%	51,41%
55	11.303	19.963	34.231	54.503	9,42%	16,64%	28,53%	45,42%
56	13.252	22.812	28.650	55.286	11,04%	19,01%	23,88%	46,07%
57	14.378	20.416	30.821	54.385	11,98%	17,01%	25,68%	45,32%
58	11.950	21.536	27.050	59.464	9,96%	17,95%	22,54%	49,55%
59	16.272	19.155	30.018	54.555	13,56%	15,96%	25,02%	45,46%
60	8.908	19.167	28.296	63.629	7,42%	15,97%	23,58%	53,02%
61	14.808	18.577	29.108	57.507	12,34%	15,48%	24,26%	47,92%
62	12.886	16.427	30.239	60.448	10,74%	13,69%	25,20%	50,37%
63	14.504	21.008	31.642	52.846	12,09%	17,51%	26,37%	44,04%
64	14.088	18.512	33.778	53.622	11,74%	15,43%	28,15%	44,69%
65	19.278	20.128	25.080	55.514	16,07%	16,77%	20,90%	46,26%
66	10.354	20.957	28.802	59.887	8,63%	17,46%	24,00%	49,91%
67	9.837	21.237	31.660	57.266	8,20%	17,70%	26,38%	47,72%
68	12.199	20.678	27.544	59.579	10,17%	17,23%	22,95%	49,65%
69	11.150	17.668	27.981	63.201	9,29%	14,72%	23,32%	52,67%
70	12.441	17.806	29.244	60.509	10,37%	14,84%	24,37%	50,42%
71	14.168	19.237	31.626	54.969	11,81%	16,03%	26,36%	45,81%
72	10.073	18.667	30.017	61.243	8,39%	15,56%	25,01%	51,04%
73	15.201	16.099	31.024	57.676	12,67%	13,42%	25,85%	48,06%
74	10.856	17.439	34.729	56.976	9,05%	14,53%	28,94%	47,48%
75	9.660	19.078	29.703	61.559	8,05%	15,90%	24,75%	51,30%
76	14.529	19.956	29.310	56.205	12,11%	16,63%	24,43%	46,84%
77	11.743	18.545	34.387	55.325	9,79%	15,45%	28,66%	46,10%
78	12.610	18.683	31.458	57.249	10,51%	15,57%	26,22%	47,71%
79	11.161	20.822	27.975	60.042	9,30%	17,35%	23,31%	50,04%
80	13.566	16.940	32.439	57.055	11,31%	14,12%	27,03%	47,55%
81	16.671	16.321	27.806	59.202	13,89%	13,60%	23,17%	49,34%
82	12.246	18.432	32.864	56.458	10,21%	15,36%	27,39%	47,05%
83	10.805	22.027	33.038	54.130	9,00%	18,36%	27,53%	45,11%
84	9.460	21.088	30.304	59.148	7,88%	17,57%	25,25%	49,29%
85	14.216	20.578	30.145	55.061	11,85%	17,15%	25,12%	45,88%
86	12.133	20.870	31.268	55.729	10,11%	17,39%	26,06%	46,44%
87	10.048	19.263	30.220	60.469	8,37%	16,05%	25,18%	50,39%
88	13.516	20.721	25.325	60.438	11,26%	17,27%	21,10%	50,37%
89	12.207	17.895	28.613	61.285	10,17%	14,91%	23,84%	51,07%
90	12.865	19.150	30.129	57.856	10,72%	15,96%	25,11%	48,21%
91	15.505	20.123	34.098	50.274	12,92%	16,77%	28,42%	41,90%
92	9.694	15.924	30.572	63.810	8,08%	13,27%	25,48%	53,18%
93	10.255	20.935	27.696	61.114	8,55%	17,45%	23,08%	50,93%
94	10.305	20.124	34.139	55.432	8,59%	16,77%	28,45%	46,19%
95	10.755	20.179	32.778	56.288	8,96%	16,82%	27,32%	46,91%
96	11.213	20.151	27.928	60.708	9,34%	16,79%	23,27%	50,59%
97	11.132	16.425	32.890	59.553	9,28%	13,69%	27,41%	49,63%
98	11.847	17.787	28.142	62.224	9,87%	14,82%	23,45%	51,85%
99	10.783	20.044	28.961	60.212	8,99%	16,70%	24,13%	50,18%
100	9.834	19.341	28.393	62.432	8,20%	16,12%	23,66%	52,03%

### Volumen de las unidades geológicas Esteril, Brecha, C1 y C5 para cada simulación

Simulación	Numero de Bloques				Porcentaje [%]			
	Esteril	Brecha	C1	C5	Estéril	Brecha	C1	C5
101	14.868	17.918	23.406	63.808	12,39%	14,93%	19,51%	53,17%
102	9.642	22.836	31.733	55.789	8,04%	19,03%	26,44%	46,49%
103	11.062	17.303	35.914	55.721	9,22%	14,42%	29,93%	46,43%
104	10.588	19.540	29.052	60.820	8,82%	16,28%	24,21%	50,68%
105	12.665	20.433	31.723	55.179	10,55%	17,03%	26,44%	45,98%
106	14.452	21.368	29.489	54.691	12,04%	17,81%	24,57%	45,58%
107	14.502	17.401	33.457	54.640	12,09%	14,50%	27,88%	45,53%
108	10.144	17.838	34.711	57.307	8,45%	14,87%	28,93%	47,76%
109	13.512	16.444	31.986	58.058	11,26%	13,70%	26,66%	48,38%
110	13.281	14.595	31.297	60.827	11,07%	12,16%	26,08%	50,69%
111	11.490	17.351	29.801	61.358	9,58%	14,46%	24,83%	51,13%
112	13.404	16.386	34.012	56.198	11,17%	13,66%	28,34%	46,83%
113	10.850	19.496	24.757	64.897	9,04%	16,25%	20,63%	54,08%
114	12.549	17.608	28.456	61.387	10,46%	14,67%	23,71%	51,16%
115	17.687	16.898	30.504	54.911	14,74%	14,08%	25,42%	45,76%
116	10.574	17.847	33.339	58.240	8,81%	14,87%	27,78%	48,53%
117	18.363	18.589	32.075	50.973	15,30%	15,49%	26,73%	42,48%
118	11.702	20.618	34.903	52.777	9,75%	17,18%	29,09%	43,98%
119	13.594	17.408	24.239	64.759	11,33%	14,51%	20,20%	53,97%
120	8.394	20.271	34.359	56.976	7,00%	16,89%	28,63%	47,48%
121	10.761	16.505	31.525	61.209	8,97%	13,75%	26,27%	51,01%
122	11.378	21.066	32.329	55.227	9,48%	17,56%	26,94%	46,02%
123	11.295	18.300	31.399	59.006	9,41%	15,25%	26,17%	49,17%
124	14.125	16.729	33.959	55.187	11,77%	13,94%	28,30%	45,99%
125	8.589	20.552	34.107	56.752	7,16%	17,13%	28,42%	47,29%
126	11.580	21.431	30.043	56.946	9,65%	17,86%	25,04%	47,46%
127	13.787	19.361	28.514	58.338	11,49%	16,13%	23,76%	48,62%
128	13.436	15.787	28.238	62.539	11,20%	13,16%	23,53%	52,12%
129	9.911	19.481	35.677	54.931	8,26%	16,23%	29,73%	45,78%
130	13.470	21.163	30.092	55.275	11,23%	17,64%	25,08%	46,06%
131	12.472	18.152	32.880	56.496	10,39%	15,13%	27,40%	47,08%
132	11.223	19.047	28.364	61.366	9,35%	15,87%	23,64%	51,14%
133	11.127	21.799	30.446	56.628	9,27%	18,17%	25,37%	47,19%
134	8.331	18.122	32.019	61.528	6,94%	15,10%	26,68%	51,27%
135	10.772	19.554	28.603	61.071	8,98%	16,30%	23,84%	50,89%
136	11.949	17.337	29.796	60.918	9,96%	14,45%	24,83%	50,77%
137	10.623	20.643	30.831	57.903	8,85%	17,20%	25,69%	48,25%
138	12.368	19.242	32.473	55.917	10,31%	16,04%	27,06%	46,60%
139	13.279	19.319	30.553	56.849	11,07%	16,10%	25,46%	47,37%
140	14.340	20.027	31.208	54.425	11,95%	16,69%	26,01%	45,35%
141	11.603	20.886	27.525	59.986	9,67%	17,41%	22,94%	49,99%
142	12.401	18.204	28.787	60.608	10,33%	15,17%	23,99%	50,51%
143	11.868	14.569	28.757	64.806	9,89%	12,14%	23,96%	54,01%
144	14.590	17.266	27.694	60.450	12,16%	14,39%	23,08%	50,38%
145	10.074	16.282	33.396	60.248	8,40%	13,57%	27,83%	50,21%
146	13.458	16.943	33.792	55.807	11,22%	14,12%	28,16%	46,51%
147	10.844	19.734	32.891	56.531	9,04%	16,45%	27,41%	47,11%
148	10.466	17.751	30.399	61.384	8,72%	14,79%	25,33%	51,15%
149	12.567	16.918	34.167	56.348	10,47%	14,10%	28,47%	46,96%
150	11.706	16.248	25.582	66.464	9,76%	13,54%	21,32%	55,39%

### Volumen de las unidades geológicas Esteril, Brecha, C1 y C5 para cada simulación

Simulación	Numero de Bloques				Porcentaje [%]			
	Esteril	Brecha	C1	C5	Estéril	Brecha	C1	C5
151	9.591	19.823	37.681	52.905	7,99%	16,52%	31,40%	44,09%
152	10.817	18.483	33.528	57.172	9,01%	15,40%	27,94%	47,64%
153	12.034	18.985	29.251	59.730	10,03%	15,82%	24,38%	49,78%
154	10.355	19.273	32.977	57.395	8,63%	16,06%	27,48%	47,83%
155	11.946	19.358	30.327	58.369	9,96%	16,13%	25,27%	48,64%
156	11.135	18.656	31.867	58.342	9,28%	15,55%	26,56%	48,62%
157	11.286	16.260	28.715	63.739	9,41%	13,55%	23,93%	53,12%
158	11.567	19.740	27.704	60.989	9,64%	16,45%	23,09%	50,82%
159	11.831	18.678	29.568	59.923	9,86%	15,57%	24,64%	49,94%
160	12.067	20.588	29.123	58.222	10,06%	17,16%	24,27%	48,52%
161	12.695	17.559	30.349	59.397	10,58%	14,63%	25,29%	49,50%
162	10.780	18.229	34.898	56.093	8,98%	15,19%	29,08%	46,74%
163	9.380	19.526	29.949	61.145	7,82%	16,27%	24,96%	50,95%
164	13.634	21.417	28.984	55.965	11,36%	17,85%	24,15%	46,64%
165	12.177	16.324	30.468	61.031	10,15%	13,60%	25,39%	50,86%
166	9.353	17.275	30.015	63.357	7,79%	14,40%	25,01%	52,80%
167	11.655	20.893	30.021	57.431	9,71%	17,41%	25,02%	47,86%
168	10.431	24.286	28.107	57.176	8,69%	20,24%	23,42%	47,65%
169	9.690	19.489	30.818	60.003	8,08%	16,24%	25,68%	50,00%
170	11.238	21.442	28.932	58.388	9,37%	17,87%	24,11%	48,66%
171	13.033	17.557	24.833	64.577	10,86%	14,63%	20,69%	53,81%
172	12.791	18.384	31.679	57.146	10,66%	15,32%	26,40%	47,62%
173	13.562	15.760	31.812	58.866	11,30%	13,13%	26,51%	49,06%
174	11.480	15.741	30.498	62.281	9,57%	13,12%	25,42%	51,90%
175	11.675	19.445	27.507	61.373	9,73%	16,20%	22,92%	51,14%
176	14.140	19.901	26.752	59.207	11,78%	16,58%	22,29%	49,34%
177	10.118	17.323	31.943	60.616	8,43%	14,44%	26,62%	50,51%
178	11.214	24.311	28.729	55.746	9,35%	20,26%	23,94%	46,46%
179	14.159	15.759	35.014	55.068	11,80%	13,13%	29,18%	45,89%
180	10.284	16.759	34.734	58.223	8,57%	13,97%	28,95%	48,52%
181	11.079	22.939	33.184	52.798	9,23%	19,12%	27,65%	44,00%
182	10.574	18.049	30.481	60.896	8,81%	15,04%	25,40%	50,75%
183	12.737	22.133	29.981	55.149	10,61%	18,44%	24,98%	45,96%
184	10.702	20.263	28.948	60.087	8,92%	16,89%	24,12%	50,07%
185	11.686	18.912	34.019	55.383	9,74%	15,76%	28,35%	46,15%
186	11.399	20.342	27.729	60.530	9,50%	16,95%	23,11%	50,44%
187	11.448	16.419	31.207	60.926	9,54%	13,68%	26,01%	50,77%
188	12.457	20.268	28.266	59.009	10,38%	16,89%	23,56%	49,17%
189	12.757	21.613	33.190	52.440	10,63%	18,01%	27,66%	43,70%
190	11.622	16.951	32.785	58.642	9,69%	14,13%	27,32%	48,87%
191	11.734	19.569	29.148	59.549	9,78%	16,31%	24,29%	49,62%
192	12.017	21.963	28.289	57.731	10,01%	18,30%	23,57%	48,11%
193	14.649	19.606	30.507	55.238	12,21%	16,34%	25,42%	46,03%
194	9.207	22.206	31.264	57.323	7,67%	18,51%	26,05%	47,77%
195	8.553	18.073	33.267	60.107	7,13%	15,06%	27,72%	50,09%
196	11.676	19.060	31.874	57.390	9,73%	15,88%	26,56%	47,83%
197	9.769	17.476	32.078	60.677	8,14%	14,56%	26,73%	50,56%
198	10.037	15.996	30.234	63.733	8,36%	13,33%	25,20%	53,11%
199	13.274	17.185	33.338	56.203	11,06%	14,32%	27,78%	46,84%
200	11.018	19.976	29.489	59.517	9,18%	16,65%	24,57%	49,60%

### 10.3.- Gráficos Validación Simulación Secuencial de Indicadores

En las siguientes imágenes se presenta los distintos histogramas de los errores de estimación para la simulación secuencial de indicadores. De izquierda a derecha se muestra el error de estimación, el error absoluto de estimación y el error cuadrático de estimación. Esto se efectúa para las distintas unidades geológicas que se tienen en el proyecto.

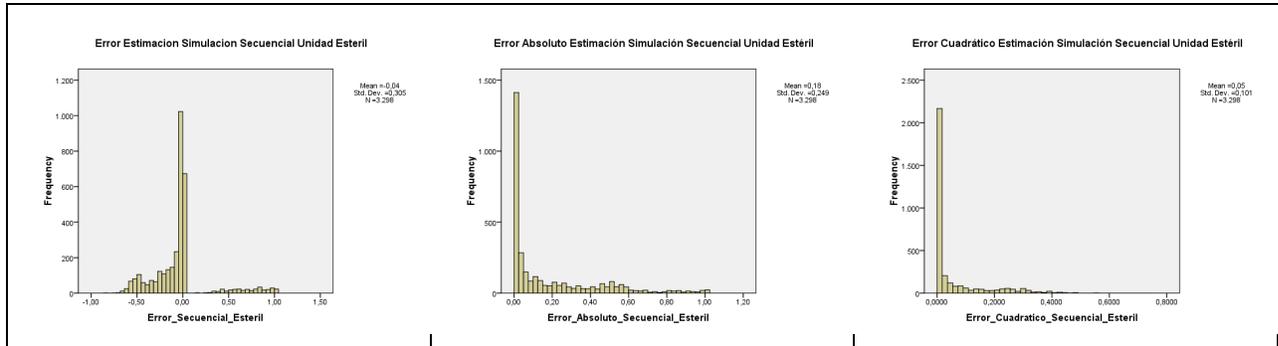


Imagen N°45 Histograma validación secuencial de indicadores unidad estéril

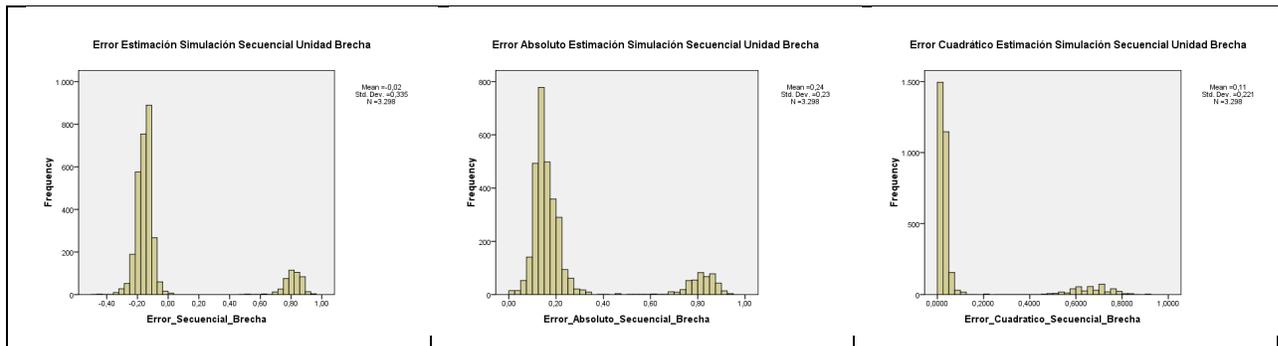


Imagen N°46 Histograma validación secuencial de indicadores unidad brecha

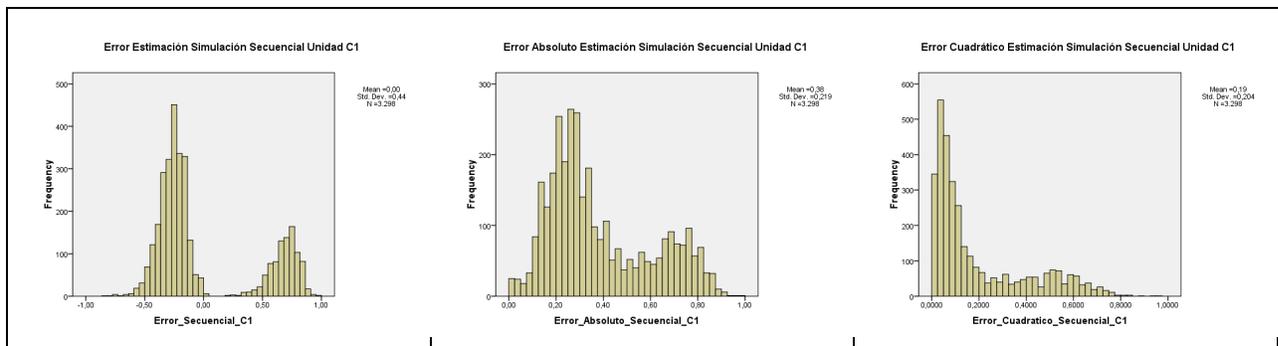


Imagen N°47 Histograma validación secuencial de indicadores unidad C1

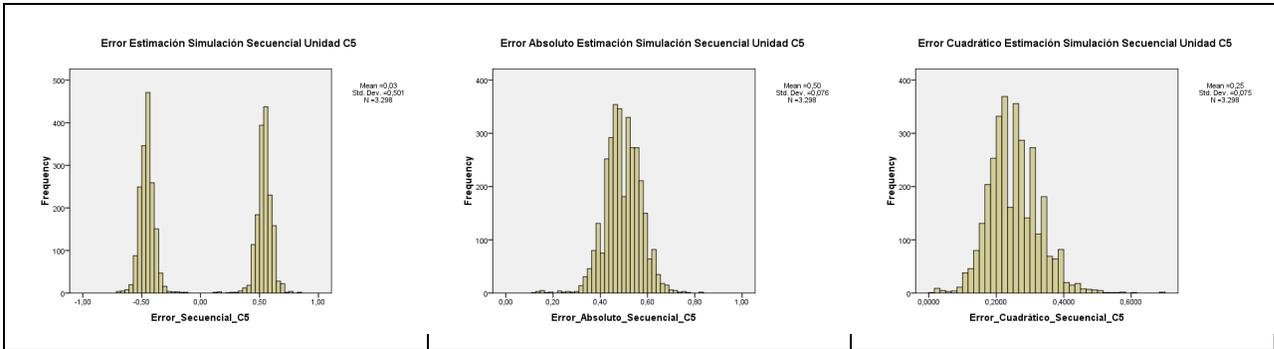


Imagen N°48 Histograma validación secuencial de indicadores unidad C5

## 10.4.- Detalle de Simulación Plurigaussiana

Simulacion	Volumen de las unidades geológicas Esteril, Brecha, C1 y C5 para cada simulación							
	Numero de Bloques				Porcentaje [%]			
	Esteril	Brecha	C1	C5	Estéril	Brecha	C1	C5
1	7.551	16.970	45.121	50.358	6,29%	14,14%	37,60%	41,97%
2	12.102	13.790	42.192	51.916	10,09%	11,49%	35,16%	43,26%
3	8.638	19.676	43.313	48.373	7,20%	16,40%	36,09%	40,31%
4	2.696	19.776	46.373	51.155	2,25%	16,48%	38,64%	42,63%
5	4.257	14.762	48.399	52.582	3,55%	12,30%	40,33%	43,82%
6	11.102	15.403	46.055	47.440	9,25%	12,84%	38,38%	39,53%
7	9.836	13.818	43.982	52.364	8,20%	11,52%	36,65%	43,64%
8	5.618	14.604	46.505	53.273	4,68%	12,17%	38,75%	44,39%
9	6.397	16.846	48.350	48.407	5,33%	14,04%	40,29%	40,34%
10	11.008	15.902	44.662	48.428	9,17%	13,25%	37,22%	40,36%
11	5.446	18.320	43.051	53.183	4,54%	15,27%	35,88%	44,32%
12	4.607	17.291	42.932	55.170	3,84%	14,41%	35,78%	45,98%
13	7.450	19.853	42.584	50.113	6,21%	16,54%	35,49%	41,76%
14	5.179	16.776	45.365	52.680	4,32%	13,98%	37,80%	43,90%
15	3.209	21.412	44.717	50.662	2,67%	17,84%	37,26%	42,22%
16	8.845	14.065	45.111	51.979	7,37%	11,72%	37,59%	43,32%
17	7.307	14.559	44.227	53.907	6,09%	12,13%	36,86%	44,92%
18	6.028	16.869	44.678	52.425	5,02%	14,06%	37,23%	43,69%
19	7.970	18.619	46.778	46.633	6,64%	15,52%	38,98%	38,86%
20	7.528	14.166	49.939	48.367	6,27%	11,81%	41,62%	40,31%
21	6.373	21.183	40.649	51.795	5,31%	17,65%	33,87%	43,16%
22	11.804	14.446	43.099	50.651	9,84%	12,04%	35,92%	42,21%
23	9.487	13.918	45.185	51.410	7,91%	11,60%	37,65%	42,84%
24	3.999	16.458	50.947	48.596	3,33%	13,72%	42,46%	40,50%
25	10.782	15.443	44.968	48.807	8,99%	12,87%	37,47%	40,67%
26	5.489	16.482	44.690	53.339	4,57%	13,74%	37,24%	44,45%
27	6.558	13.074	47.528	52.840	5,47%	10,90%	39,61%	44,03%
28	9.061	15.362	43.675	51.902	7,55%	12,80%	36,40%	43,25%
29	10.232	16.210	42.555	51.003	8,53%	13,51%	35,46%	42,50%
30	7.735	17.960	43.783	50.522	6,45%	14,97%	36,49%	42,10%
31	3.801	18.343	46.201	51.655	3,17%	15,29%	38,50%	43,05%
32	7.069	19.603	44.436	48.892	5,89%	16,34%	37,03%	40,74%
33	5.858	14.936	47.081	52.125	4,88%	12,45%	39,23%	43,44%
34	7.811	18.584	42.434	51.171	6,51%	15,49%	35,36%	42,64%
35	5.201	15.465	48.216	51.118	4,33%	12,89%	40,18%	42,60%
36	4.342	16.706	44.564	54.388	3,62%	13,92%	37,14%	45,32%
37	3.774	22.006	41.448	52.772	3,15%	18,34%	34,54%	43,98%
38	7.958	16.933	47.156	47.953	6,63%	14,11%	39,30%	39,96%
39	3.699	16.286	46.762	53.253	3,08%	13,57%	38,97%	44,38%
40	4.798	19.211	45.114	50.877	4,00%	16,01%	37,60%	42,40%
41	11.342	15.330	45.418	47.910	9,45%	12,78%	37,85%	39,93%
42	4.630	18.053	41.059	56.258	3,86%	15,04%	34,22%	46,88%
43	7.798	17.029	45.299	49.874	6,50%	14,19%	37,75%	41,56%
44	5.244	19.781	41.468	53.507	4,37%	16,48%	34,56%	44,59%
45	5.228	17.548	43.774	53.450	4,36%	14,62%	36,48%	44,54%
46	5.578	17.409	44.516	52.497	4,65%	14,51%	37,10%	43,75%
47	7.977	16.407	46.199	49.417	6,65%	13,67%	38,50%	41,18%
48	6.814	13.253	48.470	51.463	5,68%	11,04%	40,39%	42,89%
49	4.493	19.737	41.469	54.301	3,74%	16,45%	34,56%	45,25%
50	7.918	14.494	46.668	50.920	6,60%	12,08%	38,89%	42,43%

### Volumen de las unidades geológicas Esteril, Brecha, C1 y C5 para cada simulación

Simulación	Numero de Bloques				Porcentaje [%]			
	Esteril	Brecha	C1	C5	Estéril	Brecha	C1	C5
51	11.514	14.088	43.872	50.526	9,60%	11,74%	36,56%	42,11%
52	5.929	16.255	45.607	52.209	4,94%	13,55%	38,01%	43,51%
53	9.652	14.567	44.743	51.038	8,04%	12,14%	37,29%	42,53%
54	5.653	16.226	46.967	51.154	4,71%	13,52%	39,14%	42,63%
55	6.207	14.237	46.061	53.495	5,17%	11,86%	38,38%	44,58%
56	5.689	20.688	41.326	52.297	4,74%	17,24%	34,44%	43,58%
57	3.822	17.008	45.847	53.323	3,19%	14,17%	38,21%	44,44%
58	12.361	15.346	43.216	49.077	10,30%	12,79%	36,01%	40,90%
59	3.700	17.413	46.799	52.088	3,08%	14,51%	39,00%	43,41%
60	6.129	19.722	43.805	50.344	5,11%	16,44%	36,50%	41,95%
61	8.442	12.952	48.172	50.434	7,04%	10,79%	40,14%	42,03%
62	8.954	15.539	45.950	49.557	7,46%	12,95%	38,29%	41,30%
63	8.799	16.870	45.614	48.717	7,33%	14,06%	38,01%	40,60%
64	5.194	15.049	48.863	50.894	4,33%	12,54%	40,72%	42,41%
65	9.029	15.871	42.014	53.086	7,52%	13,23%	35,01%	44,24%
66	11.191	14.236	43.806	50.767	9,33%	11,86%	36,51%	42,31%
67	5.783	15.736	47.349	51.132	4,82%	13,11%	39,46%	42,61%
68	10.198	13.389	46.109	50.304	8,50%	11,16%	38,42%	41,92%
69	9.622	17.268	44.791	48.319	8,02%	14,39%	37,33%	40,27%
70	3.300	17.813	46.492	52.395	2,75%	14,84%	38,74%	43,66%
71	9.827	14.732	46.920	48.521	8,19%	12,28%	39,10%	40,43%
72	6.776	17.381	43.203	52.640	5,65%	14,48%	36,00%	43,87%
73	4.733	17.712	43.725	53.830	3,94%	14,76%	36,44%	44,86%
74	3.696	18.871	44.623	52.810	3,08%	15,73%	37,19%	44,01%
75	5.195	14.469	46.058	54.278	4,33%	12,06%	38,38%	45,23%
76	3.243	18.244	46.830	51.683	2,70%	15,20%	39,03%	43,07%
77	7.504	15.321	47.153	50.022	6,25%	12,77%	39,29%	41,69%
78	5.090	18.660	44.778	51.472	4,24%	15,55%	37,32%	42,89%
79	6.957	17.124	43.239	52.680	5,80%	14,27%	36,03%	43,90%
80	3.892	23.628	40.006	52.474	3,24%	19,69%	33,34%	43,73%
81	3.657	16.579	47.067	52.697	3,05%	13,82%	39,22%	43,91%
82	8.426	17.088	41.339	53.147	7,02%	14,24%	34,45%	44,29%
83	9.421	15.271	43.013	52.295	7,85%	12,73%	35,84%	43,58%
84	5.877	14.859	47.023	52.241	4,90%	12,38%	39,19%	43,53%
85	5.027	15.039	50.806	49.128	4,19%	12,53%	42,34%	40,94%
86	5.603	14.113	45.776	54.508	4,67%	11,76%	38,15%	45,42%
87	4.641	15.522	48.313	51.524	3,87%	12,94%	40,26%	42,94%
88	5.903	17.064	43.199	53.834	4,92%	14,22%	36,00%	44,86%
89	5.914	16.942	45.740	51.404	4,93%	14,12%	38,12%	42,84%
90	7.947	15.118	44.476	52.459	6,62%	12,60%	37,06%	43,72%
91	9.721	14.063	43.876	52.340	8,10%	11,72%	36,56%	43,62%
92	6.331	15.626	45.611	52.432	5,28%	13,02%	38,01%	43,69%
93	4.921	18.260	46.172	50.647	4,10%	15,22%	38,48%	42,21%
94	7.395	17.110	44.472	51.023	6,16%	14,26%	37,06%	42,52%
95	4.241	17.101	45.461	53.197	3,53%	14,25%	37,88%	44,33%
96	5.256	18.005	45.218	51.521	4,38%	15,00%	37,68%	42,93%
97	7.780	16.787	42.946	52.487	6,48%	13,99%	35,79%	43,74%
98	4.546	18.144	41.576	55.734	3,79%	15,12%	34,65%	46,45%
99	7.788	15.153	42.637	54.422	6,49%	12,63%	35,53%	45,35%
100	8.154	15.423	43.848	52.575	6,80%	12,85%	36,54%	43,81%

### Volumen de las unidades geológicas Esteril, Brecha, C1 y C5 para cada simulación

Simulación	Numero de Bloques				Porcentaje [%]			
	Esteril	Brecha	C1	C5	Estéril	Brecha	C1	C5
101	5.082	19.129	47.650	48.139	4,24%	15,94%	39,71%	40,12%
102	4.850	15.273	46.212	53.665	4,04%	12,73%	38,51%	44,72%
103	9.076	18.881	41.013	51.030	7,56%	15,73%	34,18%	42,53%
104	7.605	15.475	47.068	49.852	6,34%	12,90%	39,22%	41,54%
105	2.531	19.525	42.478	55.466	2,11%	16,27%	35,40%	46,22%
106	6.874	13.433	45.814	53.879	5,73%	11,19%	38,18%	44,90%
107	5.202	15.766	43.231	55.801	4,34%	13,14%	36,03%	46,50%
108	4.427	16.279	47.773	51.521	3,69%	13,57%	39,81%	42,93%
109	7.363	15.734	40.921	55.982	6,14%	13,11%	34,10%	46,65%
110	4.887	17.307	46.849	50.957	4,07%	14,42%	39,04%	42,46%
111	7.400	14.580	44.744	53.276	6,17%	12,15%	37,29%	44,40%
112	5.300	17.028	45.331	52.341	4,42%	14,19%	37,78%	43,62%
113	5.704	18.442	42.922	52.932	4,75%	15,37%	35,77%	44,11%
114	4.031	17.371	43.607	54.991	3,36%	14,48%	36,34%	45,83%
115	5.508	13.490	51.555	49.447	4,59%	11,24%	42,96%	41,21%
116	5.645	17.069	37.337	59.949	4,70%	14,22%	31,11%	49,96%
117	6.059	21.688	42.962	49.291	5,05%	18,07%	35,80%	41,08%
118	6.609	15.058	47.259	51.074	5,51%	12,55%	39,38%	42,56%
119	3.699	23.569	43.271	49.461	3,08%	19,64%	36,06%	41,22%
120	2.730	20.493	47.700	49.077	2,28%	17,08%	39,75%	40,90%
121	5.312	19.051	47.052	48.585	4,43%	15,88%	39,21%	40,49%
122	6.163	15.746	46.987	51.104	5,14%	13,12%	39,16%	42,59%
123	5.365	16.365	46.749	51.521	4,47%	13,64%	38,96%	42,93%
124	8.944	17.378	46.394	47.284	7,45%	14,48%	38,66%	39,40%
125	5.685	17.386	47.932	48.997	4,74%	14,49%	39,94%	40,83%
126	7.790	18.051	44.839	49.320	6,49%	15,04%	37,37%	41,10%
127	3.615	21.273	40.373	54.739	3,01%	17,73%	33,64%	45,62%
128	5.216	20.299	45.930	48.555	4,35%	16,92%	38,28%	40,46%
129	4.237	22.143	42.761	50.859	3,53%	18,45%	35,63%	42,38%
130	6.169	20.006	44.396	49.429	5,14%	16,67%	37,00%	41,19%
131	3.030	17.342	48.168	51.460	2,53%	14,45%	40,14%	42,88%
132	5.293	12.044	49.029	53.634	4,41%	10,04%	40,86%	44,70%
133	5.432	14.583	46.273	53.712	4,53%	12,15%	38,56%	44,76%
134	6.389	14.516	44.204	54.891	5,32%	12,10%	36,84%	45,74%
135	7.206	13.900	51.294	47.600	6,01%	11,58%	42,75%	39,67%
136	3.489	17.336	46.486	52.689	2,91%	14,45%	38,74%	43,91%
137	8.952	15.164	46.868	49.016	7,46%	12,64%	39,06%	40,85%
138	9.408	15.912	44.646	50.034	7,84%	13,26%	37,21%	41,70%
139	7.673	14.063	44.450	53.814	6,39%	11,72%	37,04%	44,85%
140	6.173	18.077	41.836	53.914	5,14%	15,06%	34,86%	44,93%
141	6.825	16.599	47.790	48.786	5,69%	13,83%	39,83%	40,66%
142	4.860	18.156	45.970	51.014	4,05%	15,13%	38,31%	42,51%
143	8.682	15.653	45.750	49.915	7,24%	13,04%	38,13%	41,60%
144	4.194	16.916	45.598	53.292	3,50%	14,10%	38,00%	44,41%
145	9.504	16.209	46.395	47.892	7,92%	13,51%	38,66%	39,91%
146	9.422	15.963	45.832	48.783	7,85%	13,30%	38,19%	40,65%
147	5.954	14.160	47.624	52.262	4,96%	11,80%	39,69%	43,55%
148	2.816	17.384	47.367	52.433	2,35%	14,49%	39,47%	43,69%
149	5.418	15.727	45.543	53.312	4,52%	13,11%	37,95%	44,43%
150	5.124	19.021	47.015	48.840	4,27%	15,85%	39,18%	40,70%

### Volumen de las unidades geológicas Esteril, Brecha, C1 y C5 para cada simulación

Simulación	Numero de Bloques				Porcentaje [%]			
	Esteril	Brecha	C1	C5	Estéril	Brecha	C1	C5
151	4.111	17.481	48.457	49.951	3,43%	14,57%	40,38%	41,63%
152	6.651	17.819	46.023	49.507	5,54%	14,85%	38,35%	41,26%
153	6.920	14.234	47.314	51.532	5,77%	11,86%	39,43%	42,94%
154	7.484	14.926	47.660	49.930	6,24%	12,44%	39,72%	41,61%
155	13.604	14.427	43.648	48.321	11,34%	12,02%	36,37%	40,27%
156	4.857	17.791	46.540	50.812	4,05%	14,83%	38,78%	42,34%
157	6.127	20.275	43.158	50.440	5,11%	16,90%	35,97%	42,03%
158	4.565	19.673	43.081	52.681	3,80%	16,39%	35,90%	43,90%
159	4.451	19.908	43.402	52.239	3,71%	16,59%	36,17%	43,53%
160	4.078	14.927	44.940	56.055	3,40%	12,44%	37,45%	46,71%
161	11.222	17.142	42.336	49.300	9,35%	14,29%	35,28%	41,08%
162	6.070	16.942	44.097	52.891	5,06%	14,12%	36,75%	44,08%
163	6.909	18.728	38.596	55.767	5,76%	15,61%	32,16%	46,47%
164	5.199	17.234	44.361	53.206	4,33%	14,36%	36,97%	44,34%
165	5.685	20.317	39.869	54.129	4,74%	16,93%	33,22%	45,11%
166	5.624	14.875	45.190	54.311	4,69%	12,40%	37,66%	45,26%
167	9.400	12.537	45.369	52.694	7,83%	10,45%	37,81%	43,91%
168	6.890	16.272	47.463	49.375	5,74%	13,56%	39,55%	41,15%
169	3.858	24.278	39.269	52.595	3,22%	20,23%	32,72%	43,83%
170	5.015	16.287	43.565	55.133	4,18%	13,57%	36,30%	45,94%
171	5.915	14.002	45.219	54.864	4,93%	11,67%	37,68%	45,72%
172	6.805	14.983	47.267	50.945	5,67%	12,49%	39,39%	42,45%
173	4.484	18.636	43.716	53.164	3,74%	15,53%	36,43%	44,30%
174	7.163	15.092	46.116	51.629	5,97%	12,58%	38,43%	43,02%
175	6.733	17.549	43.961	51.757	5,61%	14,62%	36,63%	43,13%
176	3.352	21.726	44.482	50.440	2,79%	18,11%	37,07%	42,03%
177	4.784	14.413	47.968	52.835	3,99%	12,01%	39,97%	44,03%
178	7.837	15.854	46.115	50.194	6,53%	13,21%	38,43%	41,83%
179	4.078	17.197	47.550	51.175	3,40%	14,33%	39,63%	42,65%
180	5.173	21.784	40.955	52.088	4,31%	18,15%	34,13%	43,41%
181	4.535	16.004	47.195	52.266	3,78%	13,34%	39,33%	43,56%
182	3.198	18.171	45.647	52.984	2,67%	15,14%	38,04%	44,15%
183	8.951	13.554	47.780	49.715	7,46%	11,30%	39,82%	41,43%
184	3.814	20.373	42.297	53.516	3,18%	16,98%	35,25%	44,60%
185	6.170	14.616	50.506	48.708	5,14%	12,18%	42,09%	40,59%
186	4.743	13.694	49.762	51.801	3,95%	11,41%	41,47%	43,17%
187	6.696	16.999	42.768	53.537	5,58%	14,17%	35,64%	44,61%
188	5.431	16.591	43.278	54.700	4,53%	13,83%	36,07%	45,58%
189	7.088	18.171	45.549	49.192	5,91%	15,14%	37,96%	40,99%
190	4.252	17.855	48.069	49.824	3,54%	14,88%	40,06%	41,52%
191	5.923	13.284	51.193	49.600	4,94%	11,07%	42,66%	41,33%
192	6.569	14.815	44.538	54.078	5,47%	12,35%	37,12%	45,07%
193	4.103	18.508	50.747	46.642	3,42%	15,42%	42,29%	38,87%
194	11.508	15.476	45.331	47.685	9,59%	12,90%	37,78%	39,74%
195	4.860	16.945	46.021	52.174	4,05%	14,12%	38,35%	43,48%
196	7.707	12.654	49.773	49.866	6,42%	10,55%	41,48%	41,56%
197	4.233	18.331	44.602	52.834	3,53%	15,28%	37,17%	44,03%
198	3.828	16.509	47.863	51.800	3,19%	13,76%	39,89%	43,17%
199	2.784	20.216	44.084	52.916	2,32%	16,85%	36,74%	44,10%
200	10.562	18.492	43.360	47.586	8,80%	15,41%	36,13%	39,66%

## 10.6.- Gráficos Validación Simulación Plurigaussiana

En las siguientes imágenes se presenta los distintos histogramas de los errores de estimación para la simulación plurigaussiana. De izquierda a derecha se muestra el error de estimación, el error absoluto de estimación y el error cuadrático de estimación. Esto se efectúa para las distintas unidades geológicas que se tienen en el proyecto.

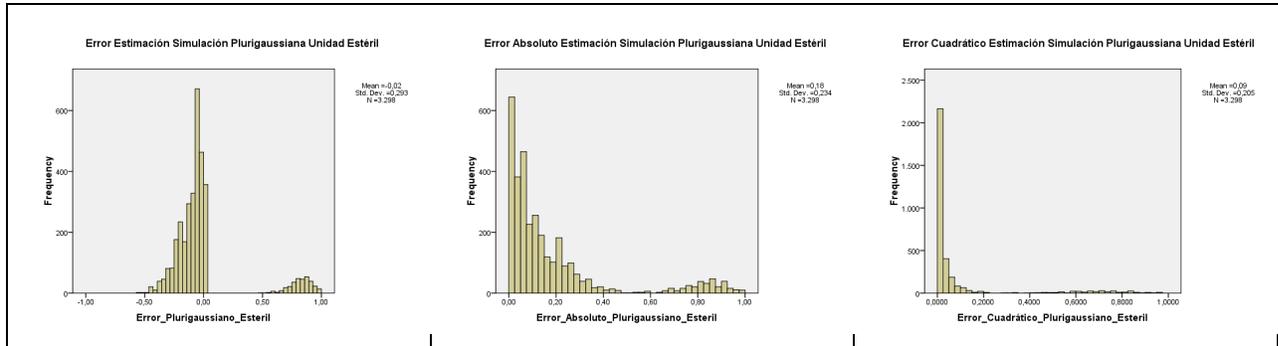


Imagen N°49 Histograma validación simulación plurigaussiana unidad estéril

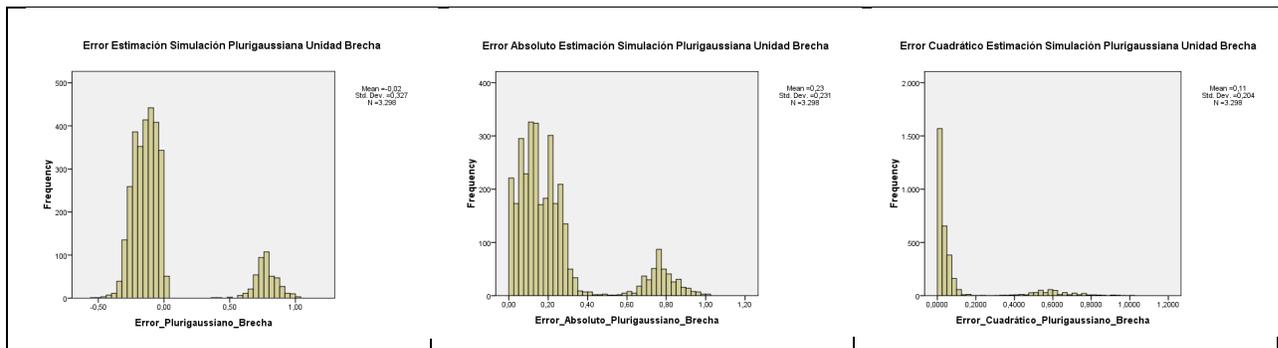


Imagen N°50 Histograma validación simulación plurigaussiana unidad brecha

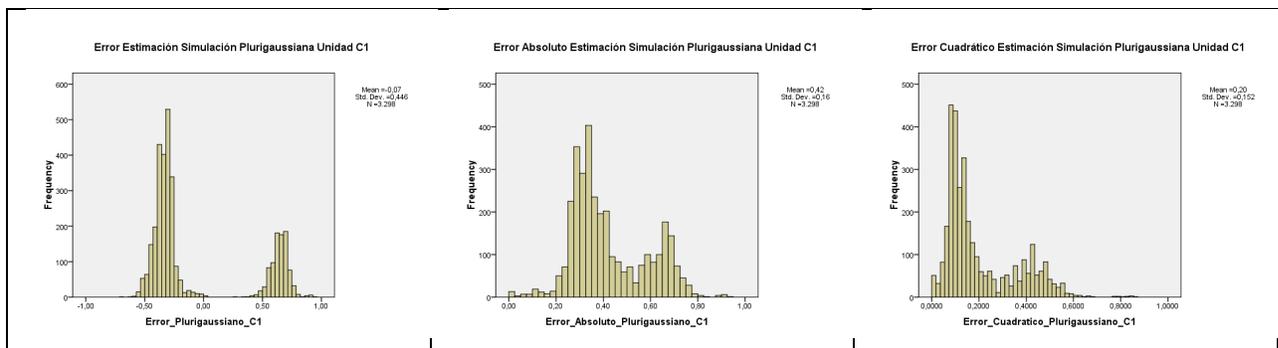


Imagen N°51 Histograma validación simulación plurigaussiana unidad C1

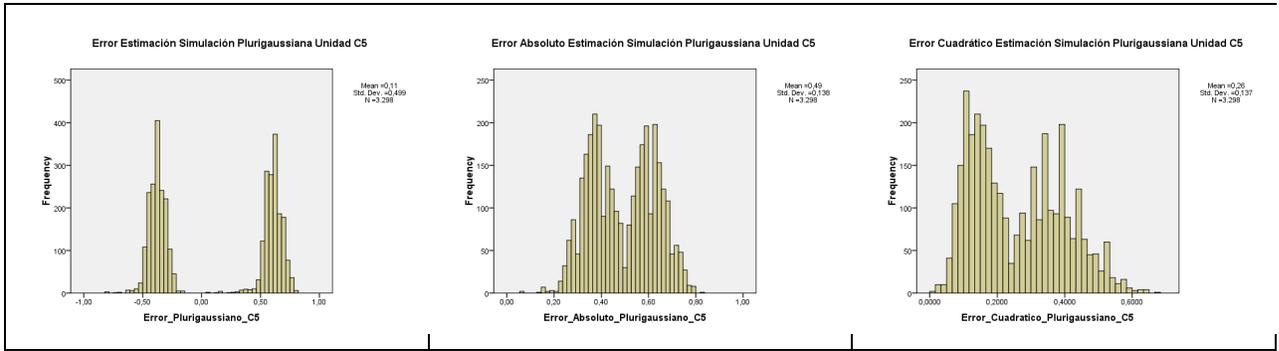


Imagen N°52 Histograma validación simulación plurigaussiana unidad C5