

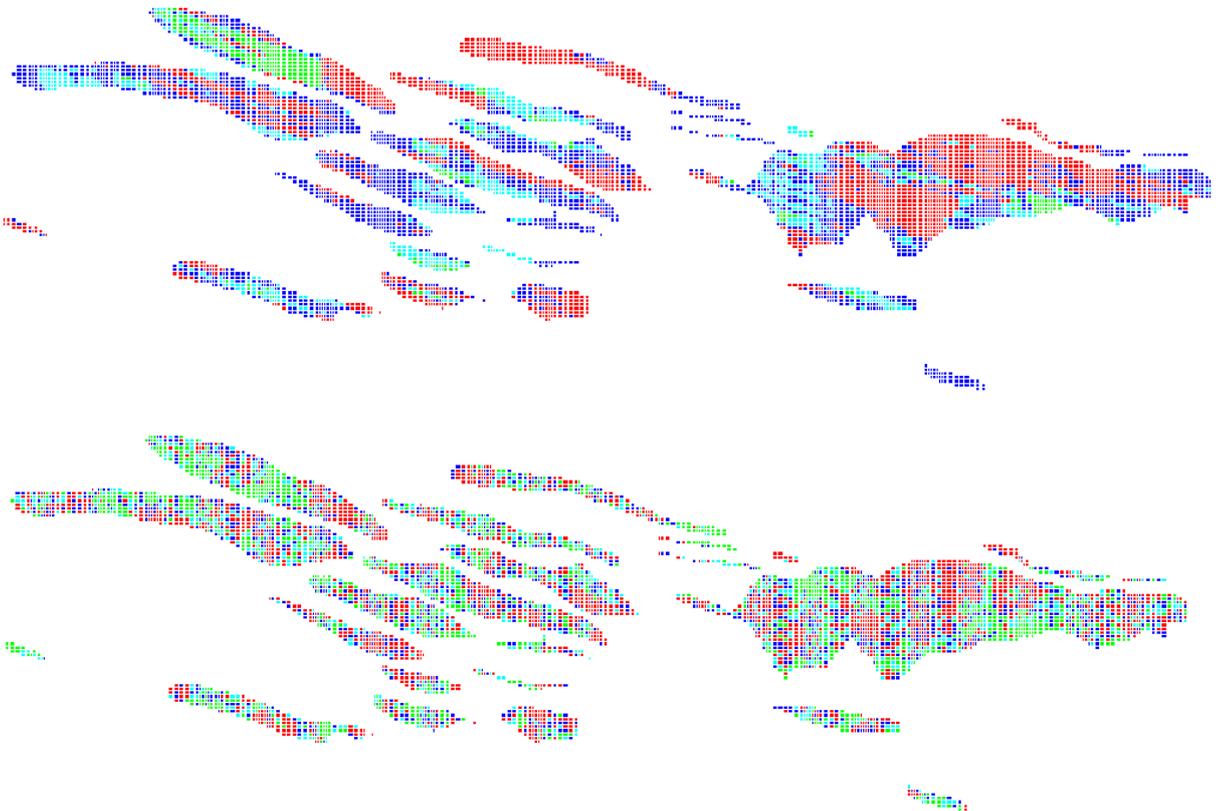


Universidad Nacional de Catamarca
Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas
Ingeniería de Minas



TRABAJO FINAL

ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA A LA ESTIMACIÓN DE LEYES DE UNA UNIDAD BÁSICA DE EXPLOTACIÓN.



Alumna: Batallán, Luciana de los Ángeles.

M. U. N° 01061

Director: Ing. Martínez, Ramón Alfonso.

Asesor: Ing. Delgado, José Manuel. (Universidad de Antofagasta – Chile)

-AÑO 2023-



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



ÍNDICE

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1	2
INTRODUCCIÓN	2
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo general:	3
1.1.2 Objetivos específicos:.....	3
1.2 Alcances y limitaciones.....	3
1.3 Metodología de trabajo	4
CAPÍTULO 2	6
MARCO TEORICO REFERENCIAL	6
2.1 Generalidades.....	6
2.1.1 Ubicación geográfica del yacimiento	6
2.1.2 Geología general.....	8
2.1.3 Estudio geomecánico conceptual.....	13
2.2 Planificación minera.....	14
2.3 Análisis estadístico de muestras.....	18
2.3.1 Conceptos generales.....	18
2.3.2 Organización y presentación de datos.	19
2.3.3 Medidas numéricas descriptivas.....	19
2.4 Teoría de probabilidades.	21
2.4.1 Probabilidad	21
2.4.2 Variable aleatoria.....	21
2.4.3 Modelos de probabilidad.....	22
2.5 Análisis geoestadístico de muestras.....	25
2.5.1 Geoestadística y teoría de las variables regionalizadas	25
2.5.2 Modelo matemático: Variograma.....	25
2.6 Estimación de leyes: Krigeage.....	30
2.6.1 Tipos de kriging.	32
2.7 Simulación condicional.	34
2.7.1 Objetivos al realizar una simulación condicional.	35
2.7.2 Métodos de simulación.....	37
2.7.3 Cálculo de la simulación condicional.....	41



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



2.7.4 La anamorfosis gaussiana.....	44
CAPÍTULO 3.....	45
ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	45
3.1. Campaña de exploración.....	45
3.2 Base de datos.....	47
3.3 Modelo de bloques.....	48
3.4 Método de explotación considerado.....	50
CAPÍTULO 4.....	53
DESARROLLO DEL CASO DE ESTUDIO.....	53
4.1 Análisis estadístico de los compósitos.....	53
4.2 Variografía.....	55
4.2.1 Variogramas experimentales.....	55
4.2.2 Variogramas teóricos.....	57
4.3 Estimación de leyes de bloques mediante kriging ordinario.....	58
4.3.1 Consideraciones.....	58
4.3.2 Categorización de los recursos.....	59
4.3.3 Visualización de los resultados en el modelo de bloques.....	60
4.3.4 Análisis estadístico de los valores obtenidos.....	66
4.4 Simulación gaussiana condicional.....	66
4.4.1 Transformación a distribución gaussiana (anamorfosis gaussiana).....	66
4.4.2 Modelo variográfico de los datos transformados.....	67
4.4.3 Parámetros utilizados en la simulación.....	69
4.4.4 Validación de las simulaciones.....	70
4.4.5 Visualización de las simulaciones.....	73
4.5 Creación de una unidad básica de explotación.....	79
4.6 Determinación de la incertidumbre.....	80
4.6.1 Procesamiento de datos.....	80
4.6.2 Cálculo de la incertidumbre.....	81
4.7 Incertidumbre como un atributo del modelo de bloques.....	83
CAPÍTULO 5.....	90
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	90
5.1 Compósitos de muestras.....	90
5.1.1 Análisis estadístico.....	90



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



5.1.2 Análisis geoestadístico.....	90
5.2 Valores estimados.	91
5.2.1 Leyes estimadas mediante kriging.	91
5.2.2 Categorización de los recursos.	92
5.3 Valores transformados.....	93
5.3.1 Modelo variográfico de los datos transformados.	93
5.4 Comparación entre el histograma de los compósitos y los histogramas de las simulaciones.	93
5.5 Comparación entre las leyes estimadas y simuladas.	95
5.6 Incertidumbre.....	96
5.6.1 Análisis estadístico.	96
5.6.2 Mapa de incertidumbre.....	97
5.7 Conclusiones y recomendaciones.	98
Bibliografía consultada y citada	99
ANEXO N°1	101
1.1 Visualización de base de datos.....	101
1.2 Análisis estadístico de los compósitos.....	102
ANEXO N°2	104
2.1 Variografía	104
ANEXO N°3	106
3. 1 Estimación de leyes y categorización de los recursos.....	106
ANEXO N°4	113
4.1 Visualización del modelo de bloques.....	113
ANEXO N°5	115
5.1 Transformación gaussiana.....	115
5.2 Simulación gaussiana secuencial	117
ANEXO N°6	123
6.1 Histogramas de las simulaciones.	123
ANEXO N°7	128
7.1 Simulaciones condicionales.....	128



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



RESUMEN

El presente trabajo surge de la necesidad de poder determinar la incertidumbre asociada al proceso de estimación de leyes, lo cual es crucial para la toma de decisiones y la viabilidad económica de un proyecto minero.

En primera instancia, se analizó la información de la base de datos de la campaña de exploración realizada en Mina La Pobreza localizada en Tocopilla, Antofagasta, República de Chile.

Mediante el empleo del software minero Vulcan, se procedió con el análisis estadístico y variográfico de la variable en estudio, en este caso la ley de cobre total, para continuar con la estimación de la ley de cada bloque del modelo y categorización de los recursos, a través del método de kriging ordinario.

Posteriormente, se realizó la transformación de los datos originales a una distribución gaussiana (anamorfosis gaussiana), proceso necesario para la aplicación del método de simulación condicional, denominado secuencial gaussiana. Se procedió a realizar el análisis variográfico de los datos transformados para poder crear 50 simulaciones a cada bloque del modelo. También se realizó un análisis estadístico de cada una de las simulaciones, lo que permitió efectuar la validación de estas.

Finalmente, se realizó un análisis para un panel de explotación de las leyes estimadas mediante kriging con respecto a las leyes obtenidas en las 50 simulaciones, determinando de esta manera la incertidumbre asociada a la estimación y la incorporación de la misma al modelo de bloques como un nuevo atributo.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los proyectos mineros, para realizar la estimación de recursos, se utiliza el método de interpolación geoestadístico de estimación conocido como krigeaje, krigeado o kriging, obteniéndose valores estimados de leyes de los bloques de mineral en las posiciones donde no se cuenta con información, utilizando la información de las muestras disponibles dentro del área de influencia, brindando además la varianza de estimación de cada uno de ellos. Sin embargo, al aplicar este método de estimación se produce el efecto de suavizamiento de las leyes estimadas, no representando idealmente el comportamiento de la variable en estudio.

Los datos obtenidos son utilizados en la planificación de largo plazo para determinar el ritmo de producción y la vida de la mina, así como para definir planes mineros, secuencias y métodos de extracción. Estos también son usados por el área de geología para planificar futuras campañas de sondajes de exploración y llevar adelante el control de mineral en la etapa de explotación.

Por lo señalado anteriormente, es de gran importancia poder determinar el grado de incertidumbre asociada a la estimación realizada, ya que de esto depende la toma de decisiones y viabilidad económica de los proyectos. Para ello, se realizan simulaciones condicionales, una herramienta de la geoestadística muy utilizada que permite reproducir el comportamiento de las variables, en este caso de las leyes, incluyendo su variabilidad espacial.

Al realizar una comparación entre los datos obtenidos en la estimación y en las simulaciones se puede determinar la incertidumbre y con ello el nivel de confianza de la estimación.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general:

Determinar la incertidumbre y confiabilidad de la estimación de leyes de cobre, mediante la realización de simulaciones condicionales aplicado a una unidad básica de explotación.

1.1.2 Objetivos específicos:

- Realizar el estudio estadístico de las muestras.
- Analizar los datos y determinar el comportamiento de las variables mediante el análisis de los variogramas en diferentes direcciones.
- Estimar las leyes de cada bloque mediante el método de kriging ordinario.
- Realizar simulaciones gaussianas condicionales.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos.
- Determinar la incertidumbre y confiabilidad de la estimación.

1.2 Alcances y limitaciones

El presente trabajo se desarrolló a partir de datos suministrados por el Departamento de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería, perteneciente a la Universidad de Antofagasta, Chile. Los datos corresponden a una campaña de exploración realizada en el proyecto minero denominado Mina La Pobreza, ubicado en la provincia de Tocopilla, en la región de Antofagasta, Chile.

El análisis estadístico y geoestadístico se realizó mediante la aplicación del software minero Vulcan, perteneciente a la compañía Maptek.

La estimación de leyes y las simulaciones condicionales se realizaron para la totalidad de los bloques del modelo.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



El análisis de los resultados obtenidos y la determinación de la incertidumbre y confiabilidad de la estimación se restringe solamente a una unidad básica de explotación, en este caso una cámara, debido a la extensión del depósito y la gran cantidad de resultados obtenidos.

1.3 Metodología de trabajo

El método para desarrollar el presente trabajo, contempla una serie de etapas, que describen a continuación:

1) Recolección de información:

- Ubicación, geología y geomecánica del yacimiento.
- Referencias bibliográficas.
- Campaña de exploración.
- Base de datos.
- Modelo de bloques.
- Método de explotación considerado.

2) Análisis de la información:

- Determinación de parámetros estadísticos e histograma, de los compósitos de muestras.
- Creación de variogramas experimentales en diferentes direcciones.
- Ajuste de los variogramas experimentales a variogramas teóricos.
- Estimación de leyes de los bloques mediante kriging ordinario y categorización de los recursos.
- Determinación de parámetros estadísticos e histograma, de los valores obtenidos en la estimación.

3) Desarrollo de la simulación condicional:

- Transformación a distribución gaussiana de los compósitos de datos.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



- Determinación de parámetros estadísticos e histograma, de los valores transformados.
 - Creación de variogramas experimentales en diferentes direcciones, de los valores transformados.
 - Ajuste de los variogramas experimentales a variogramas teóricos.
 - Carga de los parámetros de simulación.
 - Validación de las simulaciones.
- 4) Procesamiento de los datos obtenidos en la simulación.
- Creación de una unidad básica de explotación, a la cual se limitará el análisis.
 - Exportación y tratamiento de datos a una planilla Excel.
 - Importar al software Vulcan los resultados obtenidos.
- 5) Análisis de los resultados.
- Análisis y comparación de los resultados de las simulaciones y determinación de la incertidumbre asociada.
 - Conclusiones.



CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO REFERENCIAL

2.1 Generalidades

2.1.1 Ubicación geográfica del yacimiento

Mina La Pobreza forma parte de los planes de expansión de la Compañía Minera Mantos de la Luna S.A., se localiza en la provincia de Tocopilla (figura 1) perteneciente a Antofagasta, segunda región de Chile, a una altura promedio de 1.074 m.s.n.m.

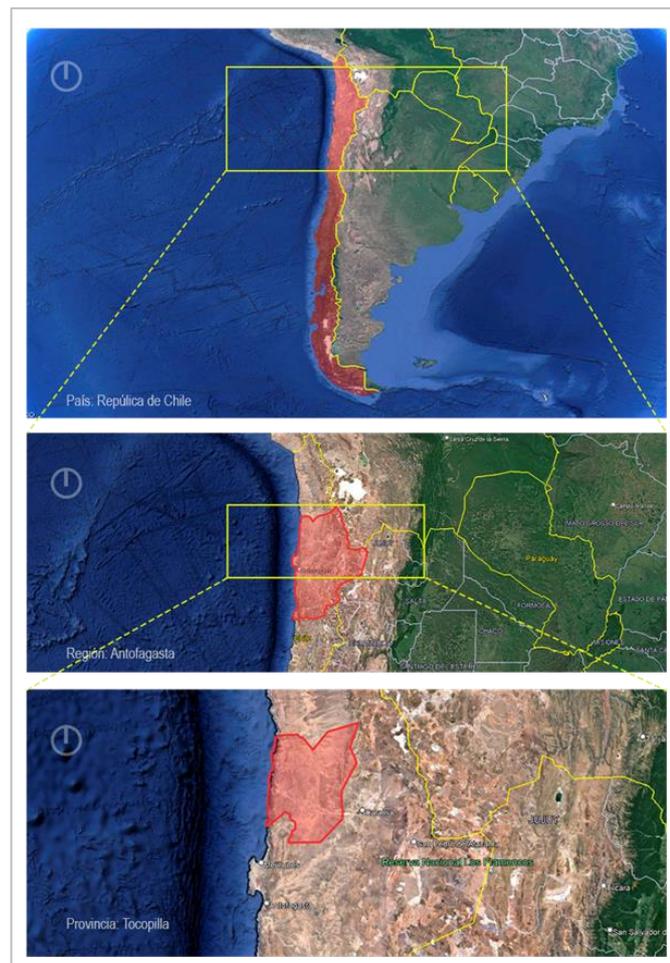


Figura 1: Ubicación geográfica de Tocopilla



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Se puede acceder al yacimiento desde la ciudad de Antofagasta recorriendo 178 km aproximadamente por la RN N° 1 hasta llegar a Tocopilla, desde allí se debe acceder a la RN N°24 y recorrer 15 km hasta el cruce con RP B-172 desde donde se debe recorrer 40 km hacia el sur, como se puede observar en la figura 2.

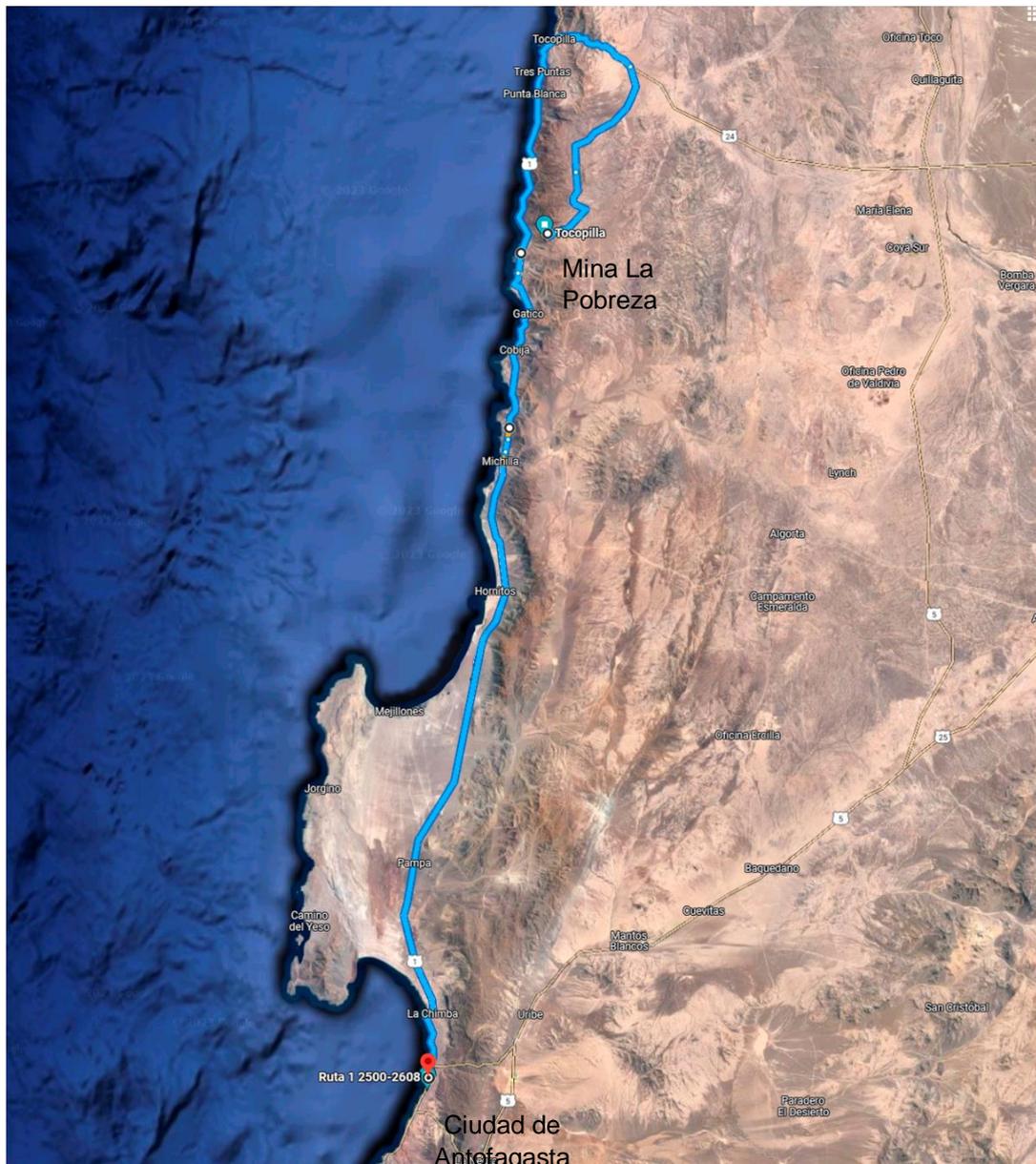


Figura 2: Ruta de acceso a Mina La Pobreza

2.1.2 Geología general.

El yacimiento se encuentra dentro de la formación geológica de edad Jurásica denominada Formación La Negra ubicada en a la Cordillera de la Costa, una de las cuatro macroformas de relieve principales de la geografía de Chile que se desarrollan en dirección norte-sur (figura 3, imágenes 1,2 y 3).

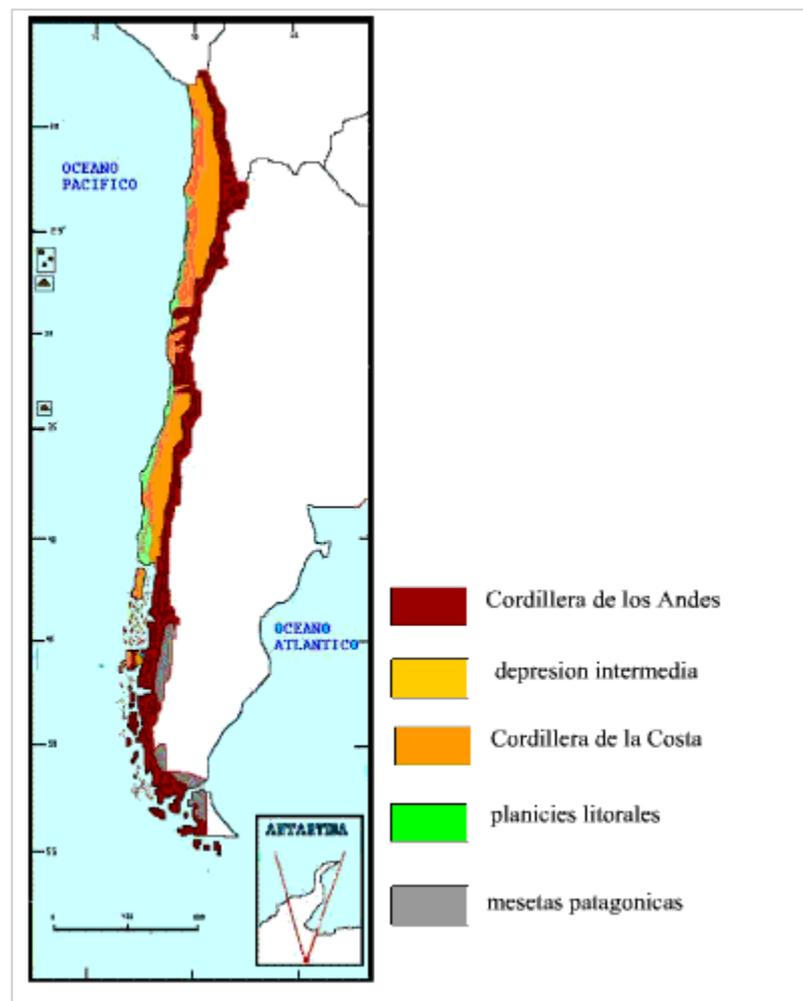


Figura 3: Principales macroformas de Chile.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.

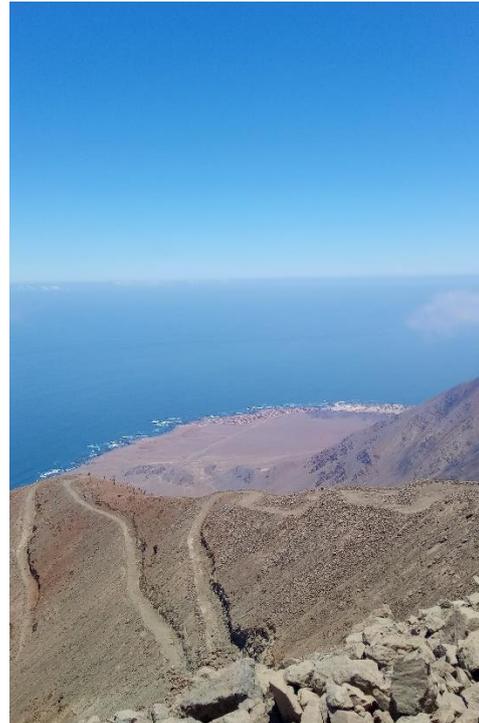
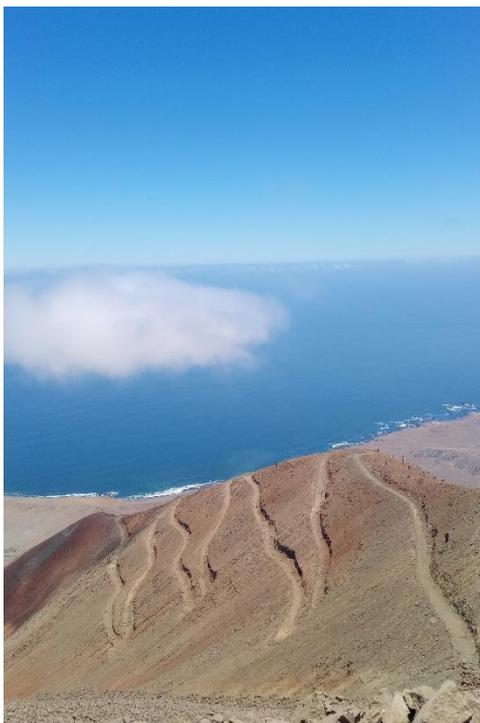


Imagen 1, 2 y 3: Fotografías tomadas desde la Cordillera de La Costa.

La Formación La Negra (figura 4) está compuesta por rocas volcánicas basáltico-andesíticas y esta intruida por rocas plutónicas (160-140 Ma) de composición gábrica a granítica, las cuales hospedan depósitos de Cu con contenidos variables de Ag, Au y Fe.

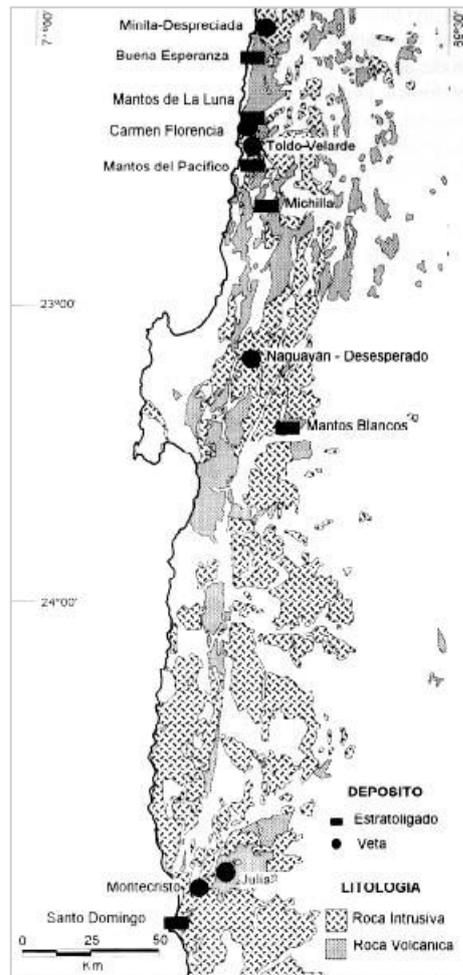


Figura 4: Formación La Negra. Fuente [8]

Mina La Pobreza se trata de un yacimiento del tipo estratoligados de cobre (imágenes 4,5 y 6), denominados también, tipo manto, son después de los yacimientos del tipo pórfido cuprífero, la fuente más importante de producción de cobre en Chile.

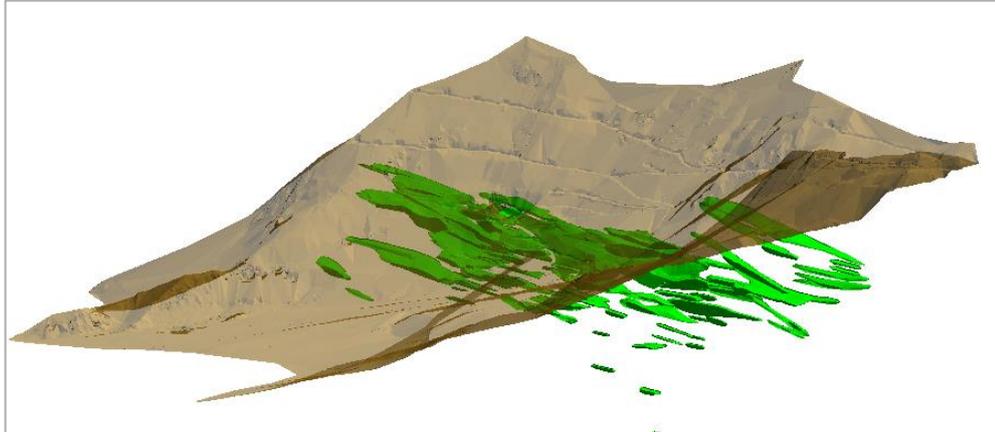


Imagen 4: Cuerpo mineralizado y topografía.



Imagen 5: Vista en planta del cuerpo mineralizado.

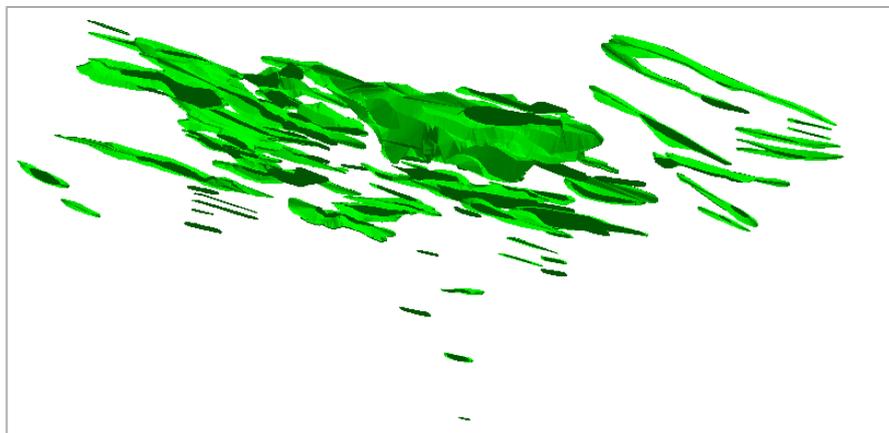


Imagen 6: Vista de perfil del cuerpo mineralizado.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



El origen de estos yacimientos se encuentra relacionado a la actividad intrusiva del Jurásico Medio-Superior.

Las rocas de caja de estos depósitos son, mayoritariamente, secuencias de lavas, de composición andesítica a basáltica, con intercalaciones de brechas y tobos, y afinidad calcoalcalina, asignadas a la Formación La Negra.

Las rocas volcánicas presentan una estratificación gruesa con rumbos cercanos a norte-sur, tanto al oeste como al este, ellas están afectadas por metamorfismo regional de bajo a muy bajo grado que se manifiesta en la presencia de minerales tales como epidota, albita, clorita, cuarzo, calcita, prehnita, pumpellita y actinolita.

Estos yacimientos pueden presentar una zonación vertical en que la parte superior del depósito consiste en minerales oxidados de cobre, sucedida en profundidad por una zona mixta en que coexisten sulfuros y óxidos, y en la parte inferior, se reconoce la mineralización hipógena. Mina La Pobreza está constituido, exclusivamente, por óxidos. Atacamita, malaquita, crisocola y, en menor medida, cuprita y cobre nativo constituyen los minerales más frecuentes en la zona de oxidación. Covelina y calcosina secundaria están presentes en la zona mixta. La mineralización hipógena consiste en bornita, calcosina, calcopirita, con piritita, cuarzo, calcita y abundante especularita como minerales de ganga. La mineralización se presenta diseminada y principalmente relleno de cavidades (vesículas, fracturas) en la parte alta de los flujos de lava o en la matriz de los cuerpos de brecha. Las rocas de caja de los cuerpos de mena se presentan alteradas hidrotermalmente, desarrollando una mineralogía caracterizada por la presencia de abundante albita con cantidades variables de clorita, epidota y cuarzo.



2.1.3 Estudio geomecánico conceptual.

Sobre la base de los levantamientos geotécnicos realizados en Mina La Pobreza, se entregará a continuación una breve descripción del macizo rocoso en la cual se emplazará el proyecto.

a. La litología predominante corresponde a andesitas con variaciones texturales lenticulares entre afaníticas y porfídicas, con o sin amígdalas rellenas principalmente por óxidos de cobre, epidota, calcita y cuarzo. En términos del tipo y grado de alteración, es posible indicar que no se reconocen alteraciones hidrotermales.

b. El macizo rocoso presenta un fracturamiento fuerte (Palmström, 2000) con bloques de volumen pequeño (ISRM, 1978). Los bloques en general se presentan bien trabados. No es posible desprender con facilidad un bloque del conjunto (con un golpe del martillo), excepto, en aquellos lugares con daño por tronadura. Además, no se aprecian contenidos importantes de finos arcillosos.

c. El RQD del macizo rocoso se encuentra en el rango de 50 a 75% (calidad regular), mientras que, el grado de fracturamiento varía de 4 a 12 fracturas/m.

d. La condición de aguas observada en los distintos niveles y labores es considerada seco.

e. La calidad geotécnica del macizo rocoso es posible describirla, según Barton y otros (1993) como $1,5 < Q < 4,7$, es decir, correspondiente a las clases geotécnicas Mala ($1 < 4$) a Regular ($4 < Q < 10$). Mientras que, en términos de la clasificación de Laubscher (1990), esta se encontraría entre los $58 < \text{RMR Laubscher} < 70$, correspondiente a las clases geotécnicas Regular (3A – puntaje 51 a 60) a Buena (2B – puntaje 61 a 70).

f. En términos de la caracterización estructural, es importante señalar, que dada la cercanía entre ventanas y niveles en la mina no se diferenciaron dominios estructurales. Adicionalmente al levantamiento efectuado por SRK,



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



se incorpora la información estructural proporcionada por CMML, fallas geológicas en los niveles existentes: 236, 226, 216, Gruta y Rebaje. Es altamente probable que estas fallas conformen duplexes extensionales dextrales (transcurrente normal), razón por la cual, es importante efectuar levantamientos estructurales más detallados para entender cinemática por las cuales fueron generados y su posible impacto en la exploración, planificación, diseño minero y orientación de galerías.

Finalmente, es posible concluir que Mina La Pobreza se encuentra emplazada en rocas volcánicas de composición andesítica con texturas que varían entre afaníticas y porfídicas en variaciones lenticulares. El yacimiento está enmarcado en un sector extensional duplex, conformado por fallas con espesores de unos pocos centímetros hasta 1 o 2 m.

2.2 Planificación minera.

Podemos definir la planificación como un proceso por medio del cual buscamos conocer con antelación las actividades y recursos necesarios para cumplir con los objetivos de la empresa, los cuales deben expresarse en términos cuantitativos y viables, donde se precisan los resultados deseados y se programan las actividades a realizar con sus tiempos y recursos asociados. En toda planificación está asociado el concepto del “tiempo”, que hace referencia a los periodos en que se dividirá el proyecto, es decir, vamos a planificar hoy lo que sucederá en un futuro cercano o lejano dependiendo de los periodos a considerar, los cuales pueden ser días, semanas, meses o años. Los recursos pueden ser humanos, físicos y financieros, los cuales tienen que estar claramente definidos de manera cuantitativa para cada periodo de tiempo considerado.

La planificación minera tradicionalmente se ha realizado mediante la ejecución de determinadas etapas desarrolladas en forma secuencial y que permiten



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



tomar decisiones en cada una de ellas. Las etapas están relacionadas unas con otras, de manera que no se debe avanzar con una etapa si la etapa anterior no está resuelta, conformando así un proceso cíclico. Este proceso es dinámico e iterativo, es decir, si se produce un cambio en alguna etapa, se debe evaluar nuevamente cada una de las etapas del proceso. La información que se va generando en cada etapa representa un dato de entrada para la etapa inmediata posterior y el nivel de detalle aumentará con el desarrollo del proceso. Para el estudio y evaluación de un proyecto minero, podemos diferenciar dos procesos principales, el proceso de modelamiento geológico y el proceso de planificación minera.

a) Proceso de modelamiento geológico

Las diferentes etapas del modelamiento geológico comienzan con el estudio de los datos obtenidos en la campaña exploratoria, donde se analizan principalmente litologías, alteraciones, mineralización y las características estructurales del yacimiento. Posteriormente, se procede con la interpretación geológica que identifica las diferentes unidades geológicas y geotécnicas, culminando con el modelamiento tridimensional del yacimiento, determinando la forma, dimensiones y ubicación espacial del recurso mineral.

La definición de unidades geológicas es fundamental para el proceso de planificación, ya que se divide el yacimiento en sectores con diferentes características geológicas y estructurales que son de importancia al momento de diseñar y ejecutar la explotación de la mina. El proceso culmina con la creación del modelo geológico o de bloques, donde se divide el yacimiento en bloques tridimensionales, a los cuales se les asignan los atributos que describan las características del yacimiento en los sectores donde se encuentren cada uno de los bloques. Los atributos más importantes son las leyes de los minerales, tipos de roca, alteraciones, datos geotécnicos, densidades, categoría del material, entre otros. Para la asignación de los atributos a cada bloque, por ejemplo, las leyes, se utiliza el método de interpolación geoestadística de kriging, utilizando la información disponible de

la campaña de exploración, generando así mismo la varianza en la estimación que es indispensable para el cálculo de las reservas geológicas (medidas, indicadas e inferidas). En la figura 5, se representa un esquema de las etapas en que se divide el proceso.

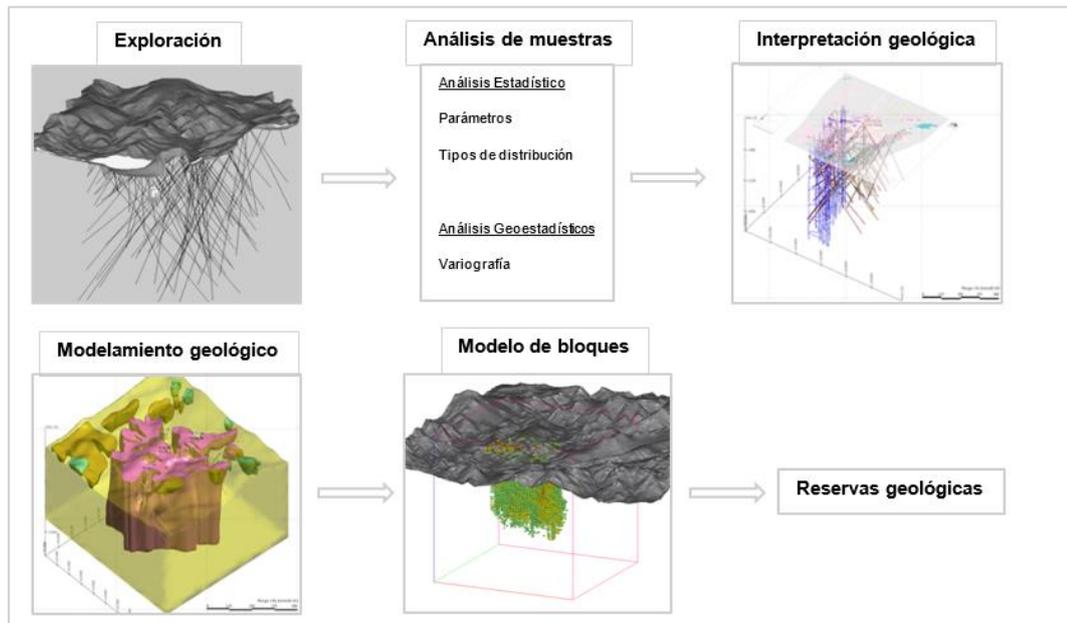


Figura 5: Proceso de modelamiento geológico. Fuente [5]

b) Proceso de planificación minera

Para comenzar con el proceso, es indispensable contar con el modelo de bloques, la topografía de superficie, datos económicos (precios, costos) y datos metalúrgicos (molienda y recuperaciones), entre los más importantes. Es fundamental que el planificador conozca detalladamente el modelo de bloques, realizar el análisis estadístico de la información contenida en cada bloque, para determinar las características físicas y geológicas del depósito. La información de mayor relevancia la representa la ley de los metales de cada bloque, con la cuál obtenemos el fino contenido en cada uno de ellos. En esta etapa, se le asignan nuevos atributos a cada bloque, para conformar una verdadera herramienta de planificación, y así poder realizar la optimización económica y los planes de producción. Estos atributos son, recuperaciones metalúrgicas y moliendabilidad para cada tipo de roca, precios

de los metales, costos de mina y proceso, fino contenido y valor económico de cada bloque, parámetros operacionales, entre otros.

La importancia de este proceso radica en poder transformar las reservas geológicas en reservas económicas o explotables, que sustenten la explotación, proceso y venta del producto final, mediante la aplicación de criterios económicos. En la figura 6, se indican las etapas del proceso, comenzando con la determinación de la ley de corte (cutoff grade) y la valorización económica de cada bloque del modelo, bajo un determinado escenario económico (precios y costos). Posteriormente se realiza el diseño de la envolvente económica (pit final), proceso que determina las reservas económicas y la secuencia de consumo de las mismas con el objetivo de maximizar los flujos de caja y con ello el valor actual neto (VAN) del proyecto. Esto se logra mediante el diseño de las fases de explotación. Finalmente, mediante la aplicación de una estrategia de leyes de corte, se realizan los planes de producción de largo plazo.

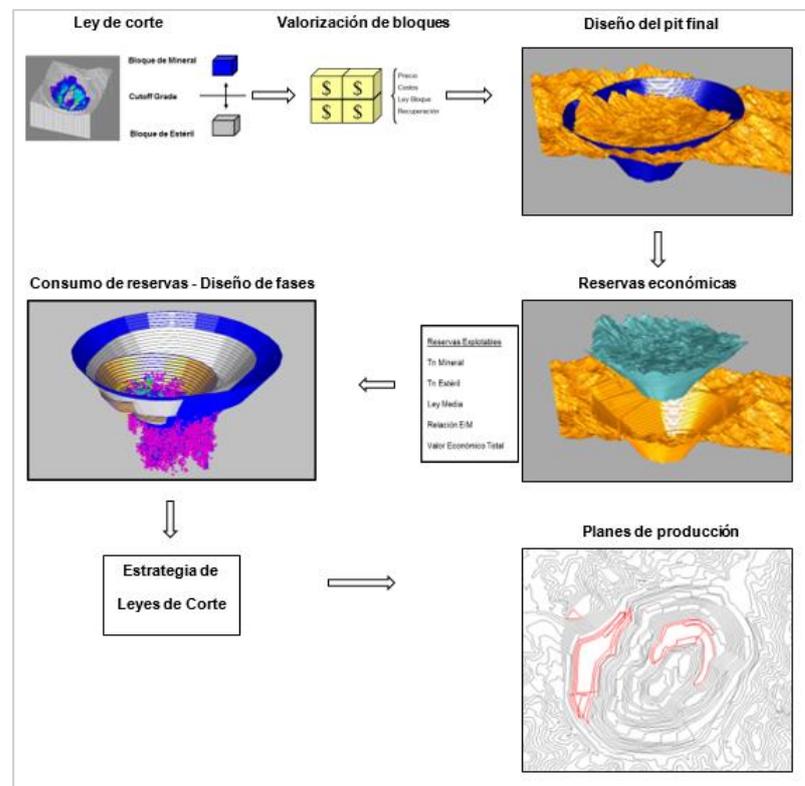


Figura 6: Proceso de planificación minera. . Fuente [5]



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



2.3 Análisis estadístico de muestras.

2.3.1 Conceptos generales.

Estadística: Disciplina perteneciente a la matemática que se dedica al estudio cuantitativo del comportamiento de muchos fenómenos y proporciona herramientas para la recolección de datos, su ordenamiento, presentación, análisis e interpretación y finalmente la toma de decisiones acerca del comportamiento de las variables.

La estadística puede ser **descriptiva** o **inferencial**.

Estadística descriptiva: consiste en procedimientos usados para resumir y describir las características de un conjunto de datos. Se construyen tablas y gráficos, se calculan medidas estadísticas que caracterizan la distribución de los datos, etc. sin sacar ninguna conclusión ni hacer inferencia alguna acerca de un grupo más grande.

Estadística inferencial: consiste en procedimientos usados para hacer inferencias acerca de las características de la población, a partir de información contenida en una muestra extraída de esta población.

Muestra: Subconjunto de unidades o elementos seleccionados de la población de interés. La muestra debe ser tanto representativa de la población como suficientemente grande para contener la información necesaria, para responder las preguntas acerca de la población que son cruciales para la investigación.

Variable: es la característica que se desea estudiar. Una variable es cualquier característica cuyo valor puede cambiar/variar de un objeto a otro en la población, esta puede ser categórica o puede ser numérica.



2.3.2 Organización y presentación de datos.

Entre las herramientas estadísticas que permiten organizar los datos se incluyen:

Distribución de frecuencias: Se trabaja con los datos ordenados en tablas que listan los distintos valores posibles de la variable, junto con las frecuencias correspondientes. Es decir, describe qué valores toma la variable y con qué frecuencia lo hace. Ofrece una visión numérica, sintética y global de la variable observada. Se utiliza cuando el número de observaciones es mayor a 20.

Histograma de frecuencias: Es una representación visual de los datos en donde se evidencian fundamentalmente tres características: el valor central de la distribución, su dispersión y la forma de la distribución.

Diferentes muestras de la misma población producirán histogramas diferentes, aun cuando se usen los mismos límites de clase. No obstante, puede esperarse que los histogramas de la muestra y población sean similares. Al agregar más y más datos a la muestra, los dos histogramas se hacen cada vez más semejantes.

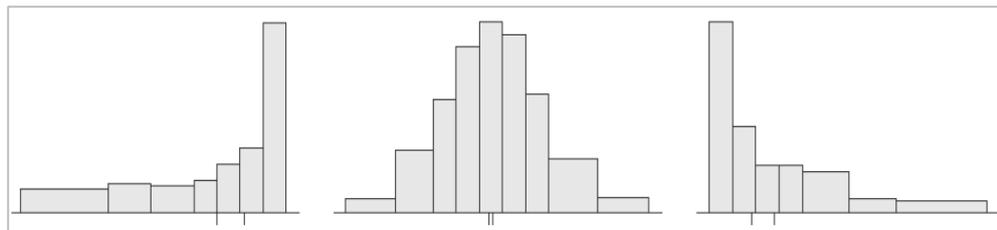


Figura 7: Formas de histogramas

2.3.3 Medidas numéricas descriptivas.

Medidas numéricas que resumen y caracterizan el conjunto de datos y permiten comunicar algunas de sus características destacadas.

a) Medidas de localización:



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Brindan información sobre cómo los valores de la variable se agrupan en torno a un valor central. Pueden ser de dos tipos:

- Medidas de tendencia central: Tienden a localizarse en el centro de la distribución.
 - Media aritmética
 - Mediana
 - Moda
- Medidas de posición: Dividen a la distribución en un cierto número de partes de manera que en cada una haya la misma cantidad de observaciones.
 - Cuartiles
 - Deciles
 - Percentiles

b) Medidas de dispersión:

Proporcionan información acerca de la variabilidad del conjunto de datos. Expresan el grado de concentración o dispersión de los datos con respecto al centro de la distribución. Cuando la dispersión se mide respecto de alguna medida de centralización (por ejemplo, la media) indica la mayor o menor representatividad de dicha medida. Pueden ser absolutas o relativas.

- Medidas de dispersión absolutas: Dependen de la unidad de medida de la variable.
 - Varianza
 - Desviación típica o estándar.
 - Recorrido (o rango)
 - Recorrido intercuartílico
- Medidas de dispersión relativas: Son adimensionales, es decir, no dependen de la unidad de medida de la variable.
 - Coeficiente de variación de Pearson
 - Coeficiente de variación intercuartílico.



2.4 Teoría de probabilidades.

En los párrafos anteriores se ha estudiado las situaciones aleatorias desde un punto de vista descriptivo. Se hace necesario introducir un modelo matemático.

2.4.1 Probabilidad.

El término probabilidad se refiere al estudio de azar y la incertidumbre en cualquier situación en la cual varios posibles eventos pueden ocurrir. La probabilidad y la estadística están relacionadas en una forma importante, la probabilidad se emplea como herramienta; permite evaluar la confiabilidad de las conclusiones acerca de la población cuando se tenga sólo información muestral.

2.4.2 Variable aleatoria.

Es una función que asocia un número real con cada elemento del espacio muestral. El valor que asume depende del resultado aleatorio de un experimento.

Una variable aleatoria es la transposición teórica de una variable estadística.

Descripción probabilística de una variable aleatoria

Sea X una variable aleatoria discreta, a cada valor posible x_i le asociamos un valor $p(x_i) = P(X = x_i)$, llamado probabilidad de x_i el cual satisface:

a) $p(x_i) \geq 0$

b) $p(x_1) + p(x_2) + \dots + p(x_i) + \dots = 1 \leftrightarrow \sum_i p(x_i) = 1$

$p(x_i)$ se llama función de probabilidad.

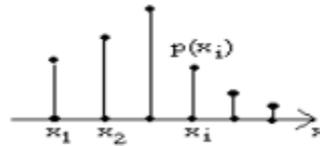


Figura 8: Función de probabilidad de una variable aleatoria discreta.

Sea X una variable continua, entonces existe una función $f(x)$ llamada densidad de probabilidad, la cual satisface:

- a) $f(x) \geq 0$
- b) $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$
- c) $\int_a^b f(x) dx = P(a \leq X \leq b)$

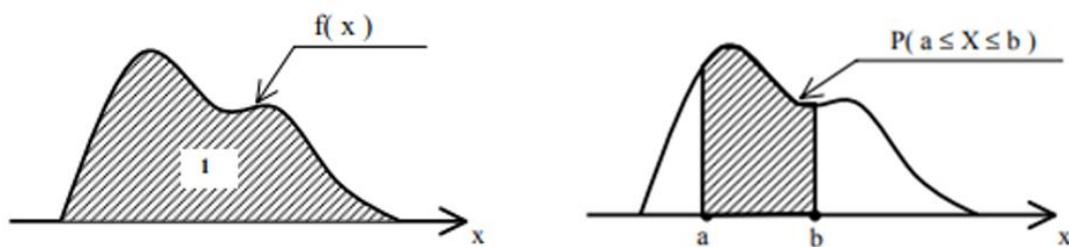


Figura 9: Función de probabilidad de una variable aleatoria continua

2.4.3 Modelos de probabilidad.

Distribuciones de probabilidad de variables aleatorias continuas:

- Distribución normal.
- Distribución lognormal.
- Distribución uniforme.
- Distribución gamma.



- Distribución exponencial.

A continuación, se describen las distribuciones concernientes al caso de estudio:

- Distribución normal: Es la distribución continua de probabilidad más importante. Muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación tienen una distribución normal. Su gráfica se denomina curva normal o campana de Gauss. La media, mediana y moda son iguales y se localizan en el centro de la distribución (justo en el pico). La mitad del área bajo la curva está a la derecha de la media, y la otra mitad está a la izquierda. Sea una variable aleatoria continua con media μ y desviación estándar σ , entonces, $X \sim N(\mu, \sigma)$

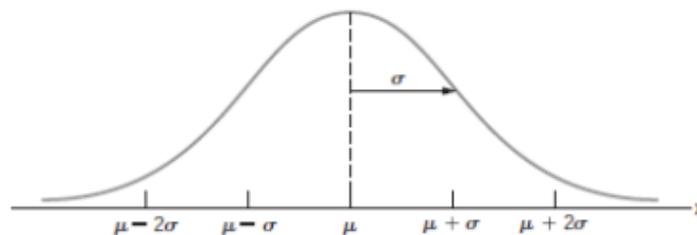


Figura 10: Distribución normal.

- Distribución normal estándar: Es una distribución normal que tiene una media (μ) igual a 0 y desviación estándar (σ) igual a 1. Se convierten los valores de la variable aleatoria X en valores de la variable aleatoria Z , a través de la fórmula: $z = \frac{x - \mu}{\sigma}$
Expresa el valor de x como el número de desviaciones estándar (σ) que se encuentran a la izquierda o derecha de su media μ .
Sea Z una variable aleatoria continua con $\mu=0$ y $\sigma=1$ entonces, $Z \sim N(0,1)$

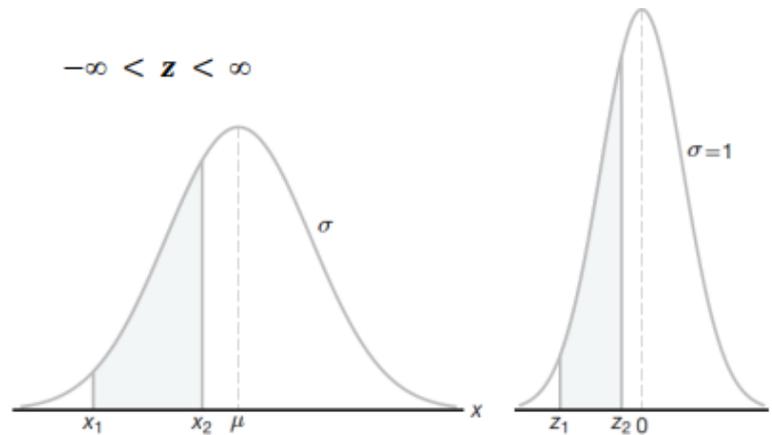


Figura 11: Distribución normal original y transformada.

- Distribución lognormal: Se dice que una variable aleatoria X sigue una ley lognormal si su logaritmo (neperiano, en base e) sigue una ley normal. A partir de esta definición se puede demostrar que la función

de densidad tiene por expresión: $f(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1(\ln x - m)^2}{2}}$ si $x > 0$

$$f(x) = 0 \quad \text{si } x \leq 0$$

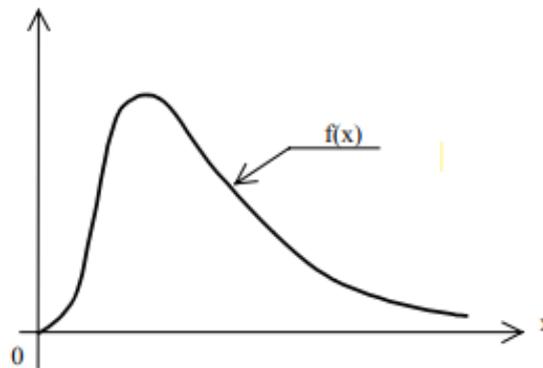


Figura 12: Distribución lognormal

La ley lognormal se presenta con frecuencia en el estudio de histogramas asociados con leyes de muestras provenientes de yacimientos mineros.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



2.5 Análisis geoestadístico de muestras.

2.5.1 Geoestadística y teoría de las variables regionalizadas.

En términos mineros se define la geoestadística como la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de los recursos.

Una variable regionalizada es una función que representa el desplazamiento en el espacio de una cierta magnitud asociada a un fenómeno natural.

Objetivo de la teoría: La teoría de las variables regionalizadas se propone dos objetivos principales:

- Expresar las características estructurales mediante una forma matemática adecuada.
- Resolver, de manera satisfactoria el problema de la estimación de una variable regionalizada a partir de un conjunto de muestras, asignando errores a las estimaciones.

2.5.2 Modelo matemático: Variograma.

Para alcanzar los objetivos propuestos es necesario disponer de un modelo matemático. La geoestadística utiliza una cierta interpretación probabilística de la variable regionalizada, mediante el modelo de las funciones aleatorias.

La hipótesis consiste en afirmar que la variable regionalizada en estudio es la realización de una cierta función aleatoria.

Variograma: El variograma es una función que constituye la herramienta fundamental de la geoestadística. Es una función que expresa la “correlación espacial” entre las muestras. Esta correlación espacial es el aspecto estructural de las Variables Regionalizadas. Permite analizar el



comportamiento espacial de una propiedad o variable sobre una zona dada. El variograma es la forma más simple de relacionar la incertidumbre con la distancia a partir de una observación.

La figura 13 representa una zona mineralizada de un yacimiento. El problema global de la estimación de reservas, puede resolverse si podemos encontrar una función $Z(x)$ que describiera la ley en cada punto "x" dentro del depósito.

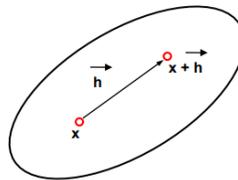


Figura 13: Zona mineralizada de un yacimiento.

$$\text{Diferencia} = Z(x) - Z(x + h)$$

Entrega información sobre la función $Z(x)$ en los puntos "x" y "x+h". Nos interesa una relación generalizada aplicable a todo el depósito. Entonces, se utiliza el promedio de la diferencia entre todos los pares de muestras que están separadas una distancia h.

$$\text{Diferencia promedio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(x) - Z(x + h)]$$

Donde "N" es el número de pares separados una distancia h.

Par evitar el efecto de cancelación de las diferencias positivas y negativas, cada diferencia entre muestras se eleva al cuadrado antes de promediar.

$$\text{Diferencia promedio}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(x) - Z(x + h)]^2 = 2\gamma(h)$$

Valor promedio de las diferencias al cuadrado de leyes en datos que están separados una distancia "h".



El variograma ha sido originalmente definido como $2\gamma(h)$, pero generalmente se utiliza $\gamma(h)$ ó $1/2$ del promedio de las diferencias al cuadrado para definirlo, llamado “semivariograma”.

$$\bar{\gamma}(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x) - Z(x+h)]^2$$

Tipos de variogramas.

- Variograma experimental: Obtenido a partir del conjunto de muestras, es el único conocido.
- Variograma teórico: Es el variograma modelo de referencia. Corresponde a un modelo matemático que se ajusta al variograma experimental.

Una vez construido el variograma experimental, es necesario “ajustar” a este un modelo teórico con el objeto de determinar los parámetros descriptivos del variograma que posteriormente serán usados en la estimación.

Los **parámetros del variograma** caracterizan tres elementos importantes en la variabilidad de un atributo, estos pueden observarse en la figura 14.

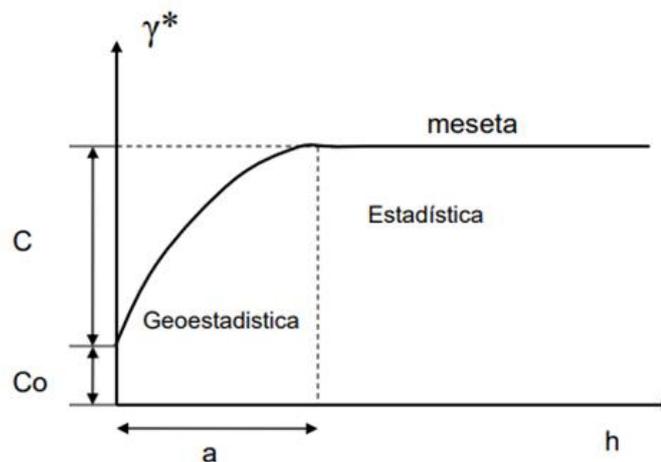


Figura 14: Variograma. Fuente [5]



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



- Discontinuidad en el origen: **Efecto pepita o nugget** (C_0), Representa una discontinuidad puntual del variograma en el origen. Puede ser indicativo de que parte de la estructura espacial se concentra a distancias inferiores de las observada. Micro variaciones a muy poca distancia debido a errores de medición en la variable.
- Valor Máximo de variabilidad: **Meseta o sill** (C_0+C), valor constante que toma el variograma en distancias mayores al alcance. En algunas ocasiones, la meseta se asemeja a la varianza estadística.
- Área de influencia: **Alcance o rango** (a), distancia a la cual el variograma alcanza su meseta, o sea se estabiliza. Proporciona una medida de la zona de influencia de una muestra, porque dos puntos cuya distancia sea mayor que el alcance, son independientes. Dos muestras cuya distancia sea inferior al alcance están correlacionados entre sí. Proporciona una medida promedio de la zona de influencia de la mineralización. A partir del punto en el cual se supera el valor del alcance el estudio corresponde al campo de la estadística.
- Varianza Espacial: C

El objetivo del “análisis estructural” es estudiar el variograma teórico que mejor se “ajuste” al experimental, de tal modo que se puedan hacer inferencias en relación al variograma verdadero del depósito. El modelo teórico elegido, se utilizará en los cálculos posteriores.

Tipos de variogramas teóricos:

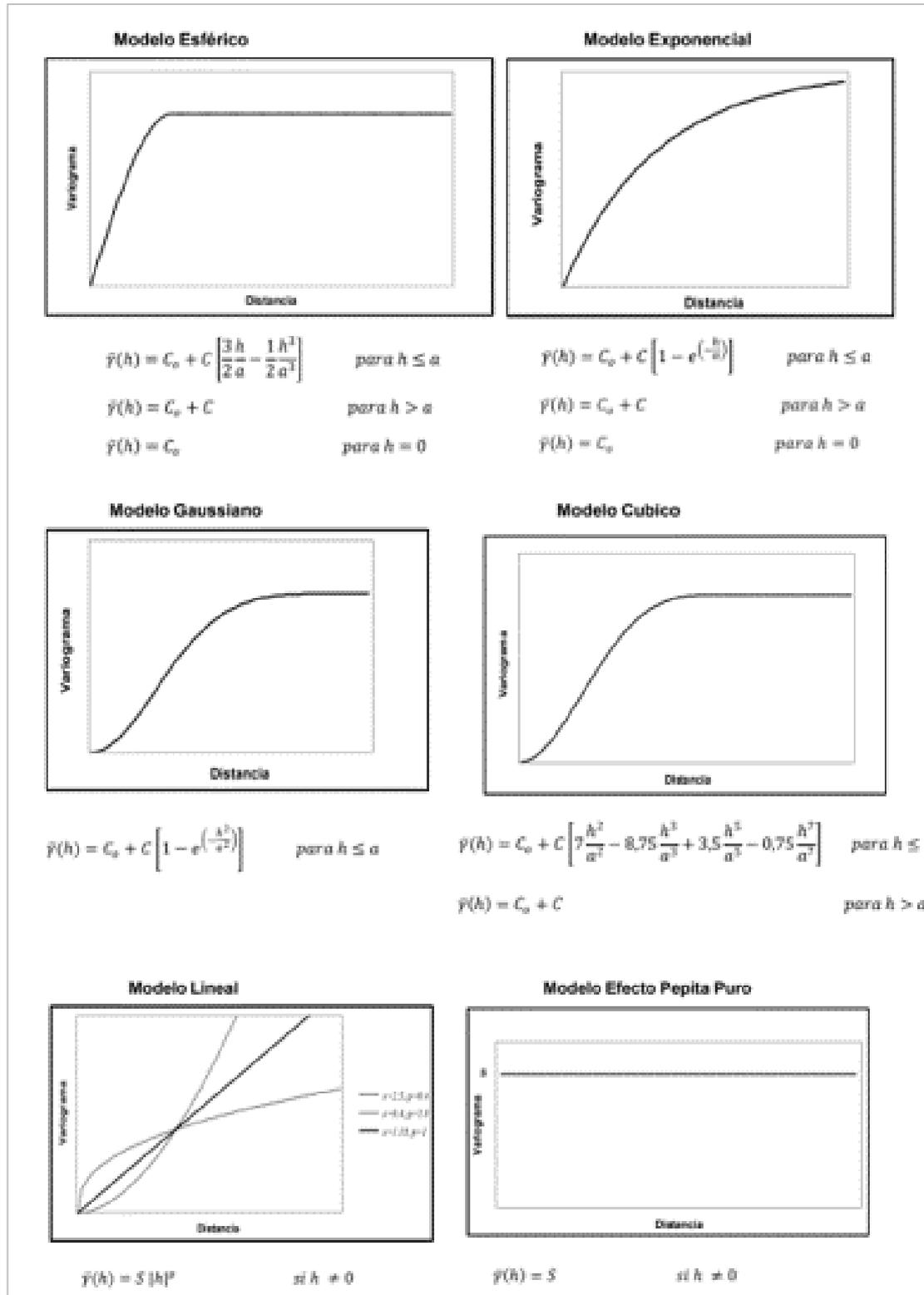


Figura 15: Tipos de variogramas teóricos. Fuente [5]



Características estructurales.

Del estudio variográfico se pueden obtener conclusiones de las características estructurales.

- **Comportamiento en el origen:** la continuidad de una regionalización está ligada al comportamiento del variograma en las vecindades del origen, determinando o no la presencia de “efecto pepita o nugget”. Refleja las variaciones de los valores a poca distancia.
- **Fenómenos de transición:** Reflejados en el variograma mediante puntos de inflexión en la gráfica. Pueden representar la discontinuidad estéril-mineral, diferentes zonas estructurales.
- **Zona de influencia:** El variograma es una función creciente de h . Los valores tomados en dos puntos distantes de h son más diferentes cuando estos puntos están alejados uno de otro.
- **Anisotropías:** Comportamiento del variograma en diferentes direcciones. Cuando los variogramas calculados en diferentes direcciones (N-S, E-W, N45°, etc.) muestran comportamientos similares, se dice que son “isotrópicos”. $\gamma_1(h) \approx \gamma_2(h) \approx \gamma_3(h)$. Cuando muestran diferentes comportamientos son “anisotrópicos”. $\gamma_1(h) \neq \gamma_2(h) \neq \gamma_3(h)$.

2.6 Estimación de leyes: Krigeage.

En términos mineros el krigeage consiste en encontrar la mejor estimación lineal insesgada, considerando la información disponible.

Ejemplo: Se desea estimar la ley $Z(x_0)$ del bloque de la figura 16, la información disponible está constituida de un trozo de testigo interior $Z(x_1)$ y de 7 trozos de testigo exteriores $Z(x_2), Z(x_3), \dots, Z(x_8)$.

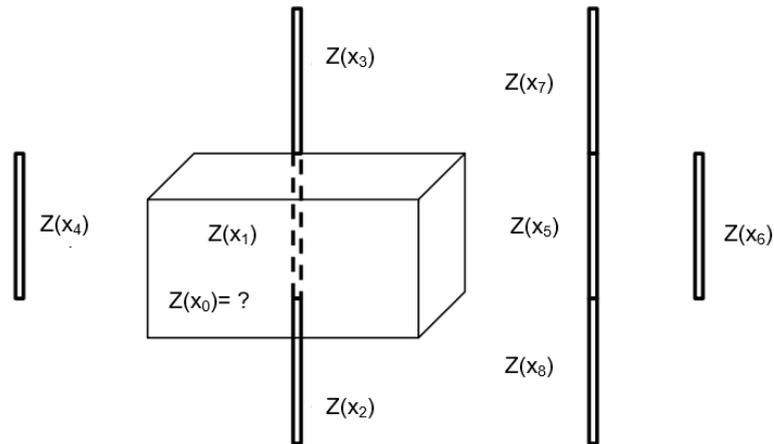


Figura 16: Zona de interés. $Z(x_0)$ a estimar. $Z(x_1), Z(x_2), Z(x_3), Z(x_4), Z(x_5), Z(x_6), Z(x_7)$ y $Z(x_8)$ información disponible. . Fuente [5]

El krigage atribuye un peso λ_i a la muestra $Z(x_i)$. De modo de minimizar la varianza del error cometido (figura 17).

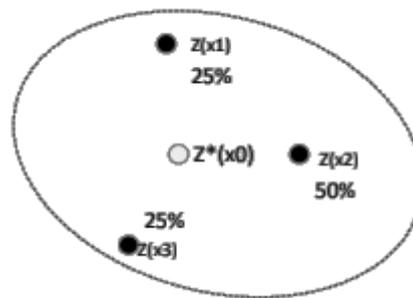


Figura 17: Zona de interés. Porcentajes (λ_i) atribuidos a cada muestra.

El interés del krigage proviene de su misma definición, al minimizar la varianza estamos seguros de obtener la estimación más precisa posible o equivalentemente, de sacar el mejor provecho posible de la información disponible.

El krigage define el estimador:

$$Z(x_0) = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \dots + \lambda_n Z(x_n)$$

Con la condición de insesgado (llamado también condición de universalidad)



$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 1$$

Y los pesos λ_i se calculan de manera de minimizar la varianza σ_E^2 del error

$E = Z(x_0) - Z_v$, en que Z_v es la ley media desconocida.

Como es natural el kriging atribuye pesos altos a las muestras cercanas y pesos débiles a las alejadas. Sin embargo, esta regla intuitiva puede fallar en ciertas situaciones en las cuales se habla de efecto pantalla o de transferencia de influencia.

2.6.1 Tipos de kriging.

- **Kriging simple:**

Asume que las medias locales son relativamente constantes y de valor muy semejante a la media de la población que es conocida. La media de la población es utilizada para cada estimación local, en conjunto con los puntos vecinos establecidos como necesarios para la estimación.

Estimador de kriging simple:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) + \left[1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \right] m$$

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

Varianza de estimación de kriging simple:

$$\sigma_{KS}^2(x_0) = \sigma^2 - \sum_{i=1}^n \lambda_i * C(x_i - x_0)$$

$$\sigma_{KS}^2(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * \gamma(x_i - x_0)$$



Donde:

$C(x_i - x_0)$ = Covarianza entre la ubicación de la muestra conocida y el punto a estimar.

$\gamma(x_i - x_0)$ = Semivariograma entre la ubicación de la muestra conocida y el punto a estimar.

- **Kriging ordinario:**

Las medias locales no son necesariamente próximas de la media de la población, usándose apenas los puntos vecinos para la estimación. Es el método más utilizado.

Para su desarrollo, requiere del conocimiento de un momento de segundo orden, tales como el semivariograma $\gamma(h)$ o la covarianza $C(h)$.

Estimador de Kriging ordinario:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

Varianza de estimación de kriging ordinario:

$$\sigma_{KO}^2(x_0) = \sigma^2 - \sum_{i=1}^n \lambda_i * C(x_i - x_0) - \mu$$

$$\sigma_{KO}^2(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * \gamma(x_i - x_0) - \mu$$

Donde:

$C(x_i - x_0)$ = Covarianza entre la ubicación de la muestra conocida y el punto a estimar.

$\gamma(x_i - x_0)$ = Semivariograma entre la ubicación de la muestra conocida y el punto a estimar.

μ = Multiplicador de Lagrange.

2.7 Simulación condicional.

La simulación condicional de leyes (o en general simulación de una variable regionalizada) es en la actualidad una herramienta importante en las aplicaciones prácticas de la geoestadística.

Por definición, llamaremos simulación de una función aleatoria a la obtención numérica de una o varias realizaciones.

Si consideramos una variable regionalizada conocida en los puntos experimentales X_1, X_2, \dots, X_N .

La simulación condicional consiste en construir una realización que posea el mismo histograma (por consiguiente la misma ley media y la misma varianza), el mismo variograma que los datos disponibles, además de estar condicionada por estos datos experimentales $Z(X_1), Z(X_2), \dots, Z(X_N)$. Es decir, donde existen datos, simulación y realidad coinciden.

La figura 19 muestra dos simulaciones condicionales. Se observa que todo estimador, en particular el krigado, alisa la realidad, mientras que la simulación respeta la variabilidad real de las leyes, esto también se puede apreciar en la figura 18.

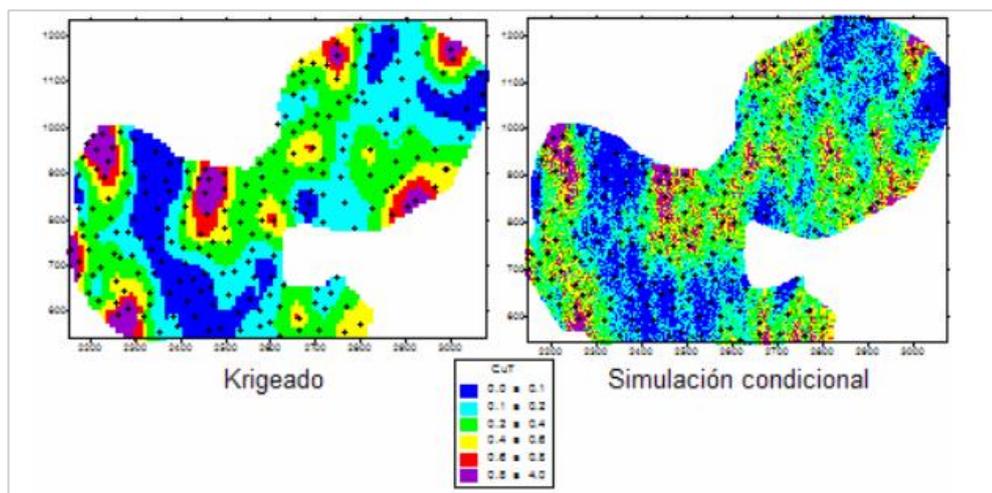


Figura 18: Krigado y simulación condicional de un banco de una mina de cobre. Fuente [3]

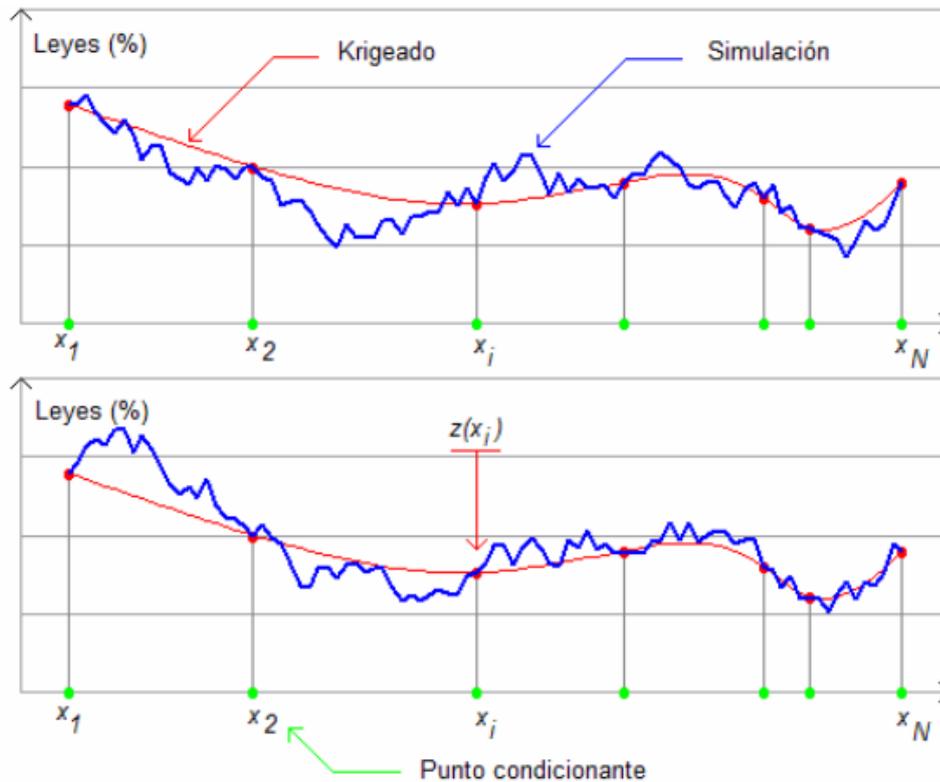


Figura 19: Simulaciones condicionales en un banco de una mina de cobre a cielo abierto. Fuente [3]

2.7.1 Objetivos al realizar una simulación condicional.

Los objetivos de usar simulaciones condicionales siempre están relacionados con la característica fundamental de las simulaciones que es reproducir la variabilidad espacial real de la variable regionalizada. Entre los propósitos que enumeramos a continuación, se pueden tener combinaciones de ellos. Hay que experimentar con los modelos numéricos proporcionados por las simulaciones condicionales para ayudar a la solución de problemas mineros prácticos. La lista siguiente dista mucho de ser exhaustiva:

- Optimizar planes de reconocimiento en exploraciones mineras. Definir mallas de sondajes óptimas.
- Contribuir a la enseñanza de la geología y minería. Se puede construir un depósito ficticio en el cual se pueden diseñar diferentes campañas



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



de reconocimiento, simular agrupaciones de datos en zonas de alta ley, hacer la variografía, diseñar un modelo de bloques, krigearlo y comparar los resultados con la realidad conocida. Estudio de sesgos. Estudio de la influencia del efecto de pepita debido a errores de muestreo, etc.

- Estudiar diferentes métodos de estimación de recursos, por ejemplo, comparar las estimaciones del inverso de la distancia (para diferentes exponentes), krigearlo simple, ordinario, disyuntivo, de indicadores..., con la realidad conocida.
- Estudiar la dilución y la selectividad de un modelo de bloques. Elegir un tamaño de bloque adecuado. Estudiar la influencia de utilizar bloques pequeños (por ejemplo de $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$) cuando se tiene una malla de reconocimiento grande (por ejemplo de $100 \times 100 \text{ m}^2$).
- Estudiar el problema de la reproducción de un modelo de variograma en las simulaciones geoestadísticas. ¿Cuáles son las condiciones que permiten que se reproduzca un cierto modelo?
- Calcular la variabilidad del tonelaje de mineral (y de la ley media) sobre una ley de corte. Si se utiliza el krigearlo, se obtienen sesgos.
- Comprobar que la “regla de oro” de la geoestadística funciona. La regla de oro de la geoestadística dice: al menos un compósito dentro de cada bloque. (por ejemplo, si la malla cuadrada es de $100 \times 100 \text{ m}^2$, el bloque debe ser de $50 \times 50 \text{ m}^2$).
- Contribuir al estudio de la categorización de los recursos mineros. Dar un sentido más preciso, respecto de la variabilidad de las leyes, a las zonas medidas, indicadas e inferidas.
- Estudiar el riesgo financiero de un proyecto minero, utilizando la variabilidad de las leyes y de los tonelajes. En la actualidad, en algunas empresas mineras todos los proyectos deben ser acompañados de un análisis de riesgo económico, el cual debe considerar la incertidumbre de leyes y de tonelajes.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



- Determinar el error de estimación de planes trimestrales, semestrales y anuales. Estos errores son solicitados a menudo por bancos y/o entidades financieras.
- Basándose en las leyes simuladas del modelo de bloques, estudiar las fluctuaciones de las leyes a la entrada de la planta. Si se utiliza el krigeado, se tendrá una imagen “alisada” la cual posee una varianza inferior a la variabilidad de las leyes de las muestras registradas a la entrada de la planta.

2.7.2 Métodos de simulación.

Existen numerosos procedimientos probabilísticos para generar realizaciones de funciones aleatorias que tienen un variograma dado $\gamma(h)$.

En resumen, estos métodos son, principalmente:

- a. Método del análisis armónico.
- b. Método de las medias móviles.
- c. Método de las líneas rotantes.
- d. Método gaussiano secuencial.

El método a) es demasiado laborioso y presenta problemas de convergencia.

El método d) presenta problemas de reproducción del variograma (por ejemplo, no reproduce bien el modelo esférico).

El Método de las medias móviles.

Este método consiste en lo siguiente: Se sortean, al azar, realizaciones independientes w_i de una variable aleatoria W_i , la cual es normal o gaussiana con esperanza matemática 0 y varianza 1, y se afectan estos valores en los



vértices de una malla regular (1D, 2D ó 3D). Sea f una cierta función. La simulación es entonces:

$$Y_i = \sum_k f(kb)w_{i+k}$$

(esta suma puede ser simple, doble o triple; b es el paso de la malla). Es fácil de ver que para cada función f se tiene un variograma diferente.

En la figura 20 se tiene una grilla muy densa con valores normales con media 0 y varianza 1 (llamada también normal reducida). A cada punto de la grilla se le asocia la suma ponderada siguiente, la cual se realiza sobre todos los puntos que caen dentro de la elipse E :

$$Z(x, y) = \frac{\sum_{(x_i, y_j) \in E} W(x_i, y_j)}{\sqrt{n}}$$

Siendo n el número de puntos que caen dentro de la elipse E . Es fácil probar que $Z(x, y)$ también sigue una ley normal reducida.

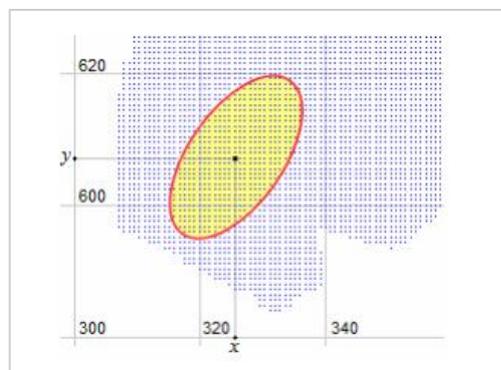


Figura 20: Simulación por medias móviles en el espacio de 2 dimensiones. Fuente [3]

Un caso interesante es cuando f tiene la expresión siguiente, en el espacio de tres dimensiones:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \text{ pertenece a una esfera de diametro } a \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Se puede demostrar, sin dificultad que obtiene en este caso el variograma esférico, con alcance a .

Luego, para simular el variograma esférico en el espacio de 3 dimensiones, se pasea una esfera de diámetro a por el interior de un paralelepípedo (o un cuerpo tridimensional) el cual está lleno de valores aleatorios independientes $W(i, j, k)$ y se afecta al centro de la esfera, la suma de los valores W que están en su interior. Más generalmente, en vez de una esfera, se puede considerar un elipsoide (figura 21), con lo cual se obtienen realizaciones anisótropas:

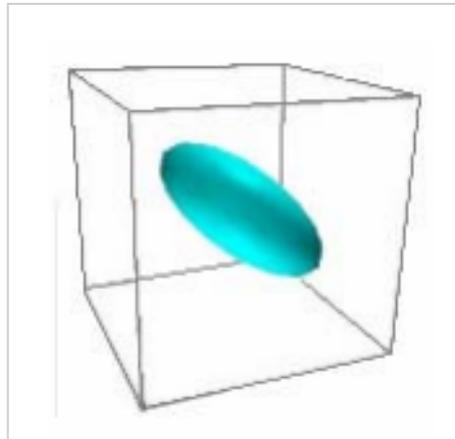


Figura 21: Elipsoide, proporciona una realización anisotrópica. Fuente [3]

Si se desea simular en 2-D un variograma esférico, hay que tomar un plano particular de la simulación precedente.

En el caso de simular un modelo esférico (en 2-D o en 3-D), existe un método más eficiente conocido como las monedas aleatorias, el cual consiste en implantar en el plano (espacio) círculos (esferas) cuyos centros y diámetros son aleatorios y asignar en cada implantación un número (aleatorio o no) a los puntos interiores, sumando la contribución de las implantaciones (ver figura 30). En el espacio de 2 dimensiones el radio del círculo es aleatorio, en 3 dimensiones el diámetro de la esfera es una constante a este método se llama también “random token”.

El método de las líneas rotantes.

Sean k rectas al azar D_i en el espacio. Cada recta se caracteriza por un vector unitario e_i . Se genera, en cada recta D_i , una realización $Y_i(x)$ de una función aleatoria de una dimensión (mediante el método de las medias móviles).

Sea x un punto del espacio. La simulación tridimensional es:

$$Y(x) = \frac{1}{\sqrt{k}} \sum_{i=1}^k Y_i(x \cdot e_i)$$

En que $(x \cdot e_i)$ es el producto escalar entre el vector x (de componentes x_1, x_2, x_3) y el vector unitario e_i :

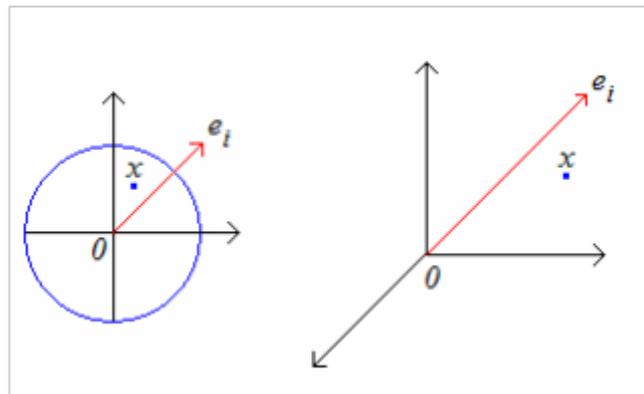


Figura 22: Líneas rotantes en 2D y 3D. Fuente [3]

Para tener una buena convergencia, es necesario utilizar por lo menos unas 50 rectas aleatorias en 2 – D y unas 120 rectas aleatorias en 3 – D. También se pueden utilizar rectas uniformemente distribuidas en 2D o 3D. La situación es ligeramente más complicada en 3D.

Se puede demostrar que, para simular mediante líneas rotantes, el variograma esférico hay que utilizar en las rectas la función $f(x)$ siguiente:

$$f(x) = \begin{cases} x & \text{si } x \in (-b, b) \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Para simular el variograma exponencial, hay que utilizar en las rectas la función $f(x)$ siguiente:



$$f(x) = \begin{cases} (1 - ax)e^{-ax} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

2.7.3 Cálculo de la simulación condicional.

Falta por analizar cómo se obtiene que el valor simulado en un punto x_i coincida con el dato localizado en este punto (x_1, x_2, \dots, x_N) .

Se puede demostrar que la ecuación siguiente resuelve el problema.

$$Z_1(x) = Z_{k_1}(x) + [Z_S(x) - Z_{k_2}(x)]$$

En que:

$Z_1(x)$ es la simulación condicional.

$Z_{k_1}(x)$ es el krigado en el punto x , utilizando los datos disponibles en los puntos x_1, x_2, \dots, x_n . Sin embargo, para garantizar la reproducción del variograma, la interpolación debe corresponder al krigado simple (no al krigado ordinario).

$Z_S(x)$ es la simulación no condicional (resultado del método de medias móviles o de las bandas rotantes)

$Z_{k_2}(x)$ es el krigado en el punto x , utilizando los valores simulados $Z_S(x)$ en los puntos x_1, x_2, \dots, x_n .

Como el krigado es un interpolador exacto (pasa por los datos), como se muestra en la figura 23:

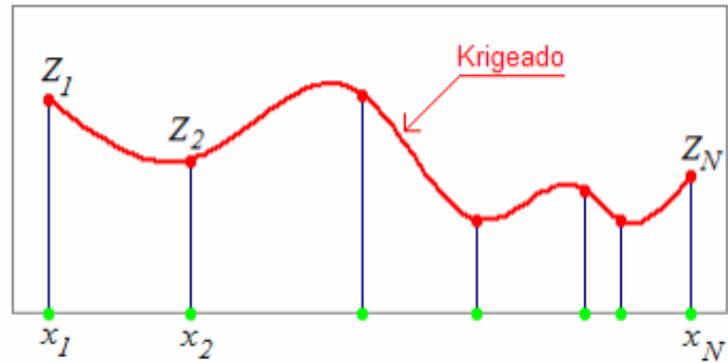


Figura 23: Krigado. Fuente [3]

Entonces la simulación condicional coincide con los datos en los puntos x_1, x_2, \dots, x_n .

Las figuras siguientes resumen las etapas para obtener una simulación que hace “honor” a los datos:

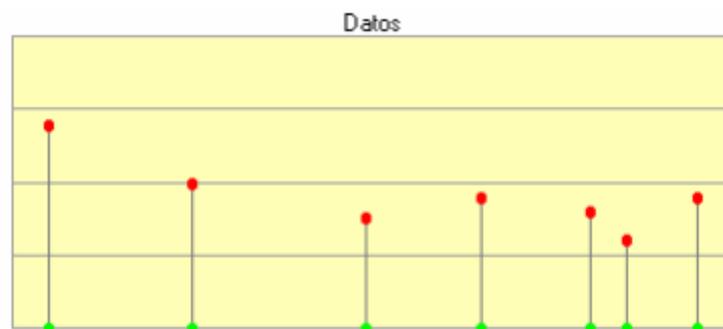


Figura 24: Datos iniciales. Fuente [3]

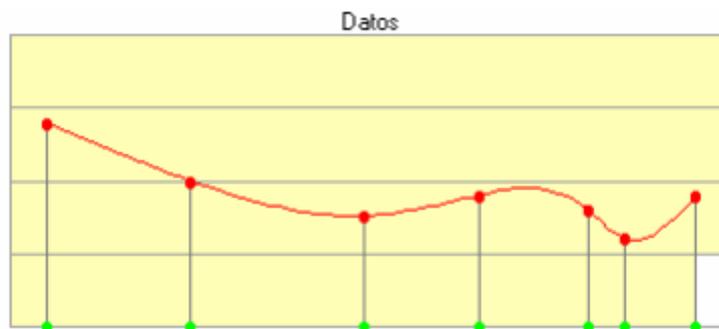


Figura 25: Krigado de los datos. Fuente [3]



Figura 26: Simulación no condicional, la cual se muestra en los mismos puntos donde se conocen los datos. Fuente [3]

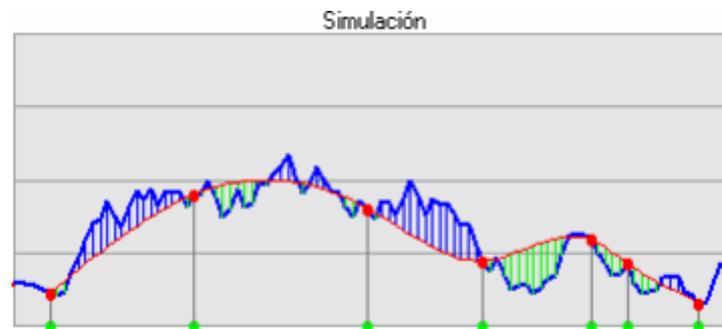


Figura 27: Se krigea la simulación no condicional y se hace la diferencia entre esta simulación y el krigeado. Observar que esta diferencia es nula en las coordenadas de los datos. Fuente [3]



Figura 28: Al krigeado de los datos se le suma la diferencia anterior. Esta es la simulación final. Fuente [3]

2.7.4 La anamorfosis gaussiana.

En la práctica, los valores reales presentan diferentes tipos de histogramas. Sin embargo, los métodos de simulación (medias móviles, líneas rotantes) generan realizaciones cuyo histograma es normal.

El objetivo de la anamorfosis gaussiana es la reproducción del histograma experimental de los datos.

La solución consiste en trabajar, desde el inicio, no con la variable regionalizada $z(x)$ en estudio, sino más bien con otra variable regionalizada $y(x)$, transformación biunívoca tal como se muestra en la figura 29.

En el caso particular en que $z(x)$ es lognormal, la transformación o anamorfosis es muy simple:

$$y(x) = \ln(z(x))$$

$$z(x) = \exp(y(x))$$

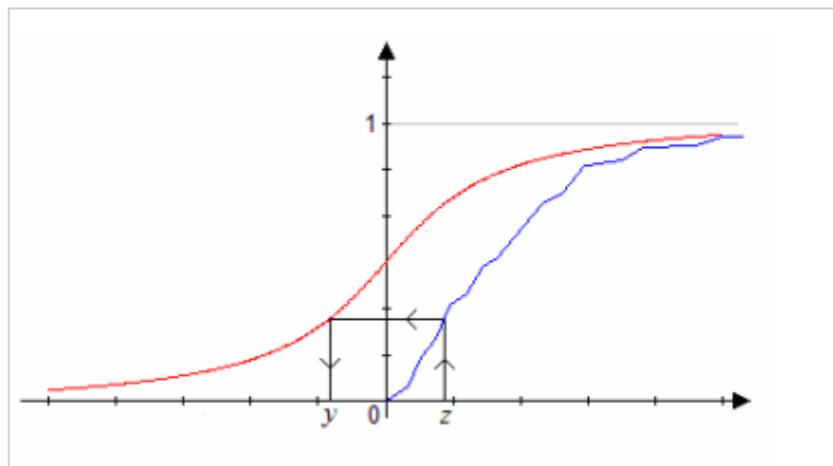


Figura 29: Anamorfosis Gaussiana, en rojo se observa la ley normal reducida y en azul el histograma acumulado experimental. Fuente [3]



CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

3.1. Campaña de exploración.

La campaña de exploración se llevó a cabo mediante la ejecución de 259 sondajes, con una separación de 10 m de distancia entre sí, dando un total de 71.709 metros perforados. El 60% de estos se realizó por perforación aire reverso, el 25% por perforación convencional y el 15% con perforación diamantina.

En la tabla 1 se muestran las identificaciones de algunos de los sondajes realizados, las coordenadas correspondientes y la profundidad de cada uno.

ID	X	Y	Z	Profundidad(m)
CPO-1	373.707.000	7.539.162.000	237.800	48,00
DDHAD-1	373.894.826	7.539.170.457	322.169	300,50
DDHAD-2	373.452.983	7.539.314.875	359.404	269,55
DDHAD-3	373.873.730	7.539.103.500	286.520	180,00
DDHAD-4	373.834.420	7.539.338.820	416.380	776,22
DDHAD-5	373.692.170	7.539.276.470	347.810	265,10
DDHAD-6	373.515.960	7.539.306.840	356.230	306,10
DDHAD-7	373.581.980	7.539.422.770	443.100	332,90
DDHAD-8	373.731.694	7.539.311.166	217.310	219,00
DDHAD-9	373.660.497	7.539.243.877	228.592	220,00
DDHAD-10	373.767.799	7.539.381.183	209.216	184,00
DDHAD-11	373.915.532	7.539.620.800	188.293	363,00
DDHAD-12	373.866.954	7.539.529.892	194.699	381,00
DDHAD-13	373.661.523	7.539.255.830	227.502	216,00
DDHAD-14	373.771.064	7.539.380.725	209.787	350,00
DDHAD-15	373.912.843	7.539.626.869	188.264	367,17
DDHAD-16	373.897.694	7.539.622.660	188.216	351,00
DDHAD-17	373.864.153	7.539.529.840	194.738	300,00
DDHAD-70	373.911.771	7.539.501.036	556.366	833,77
DDHAD-77	373.786.590	7.539.519.340	556.550	711,76
PO-1	373.715.280	7.539.139.460	238.080	12,00
PO-2	373.717.470	7.539.137.900	238.390	24,00
PO-3	373.723.160	7.539.145.220	237.850	12,00

Tabla 1: Sondajes

En las imágenes 7,8 y 9, se pueden observar la mayoría de los sondajes y su ubicación respecto de la topografía y del cuerpo mineralizado.

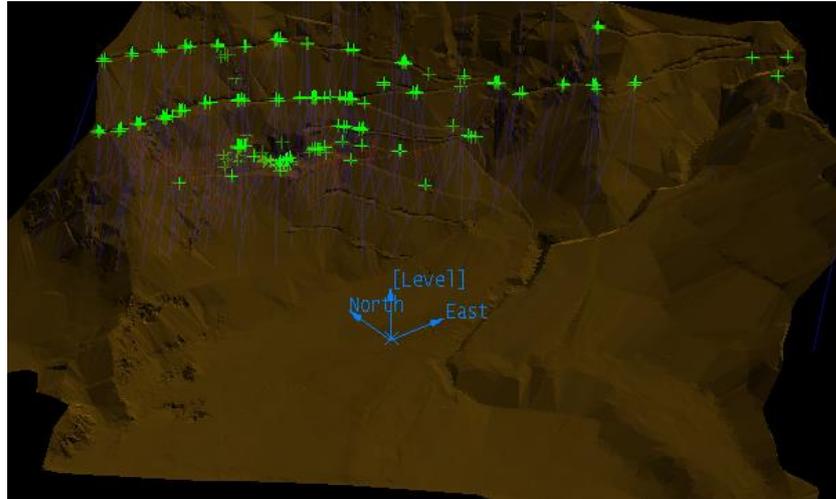


Imagen 7: Sondajes en la topografía.

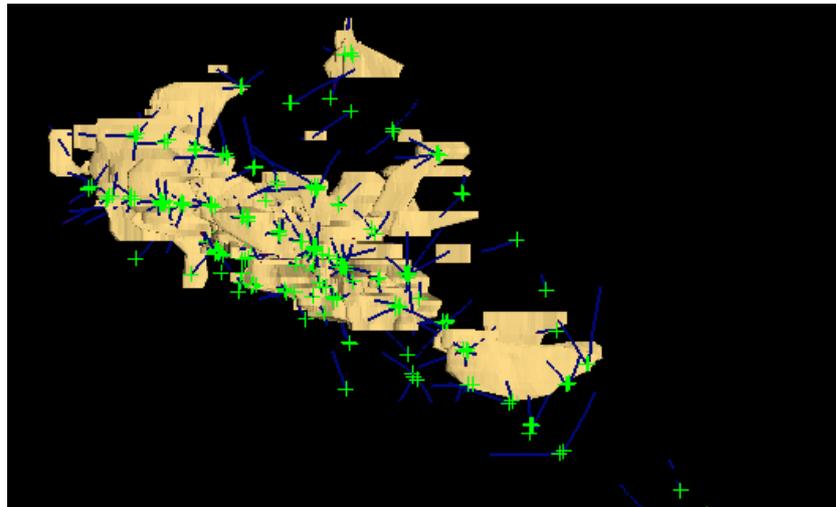


Imagen 8: Sondajes dentro del cuerpo mineralizado, vista en planta.

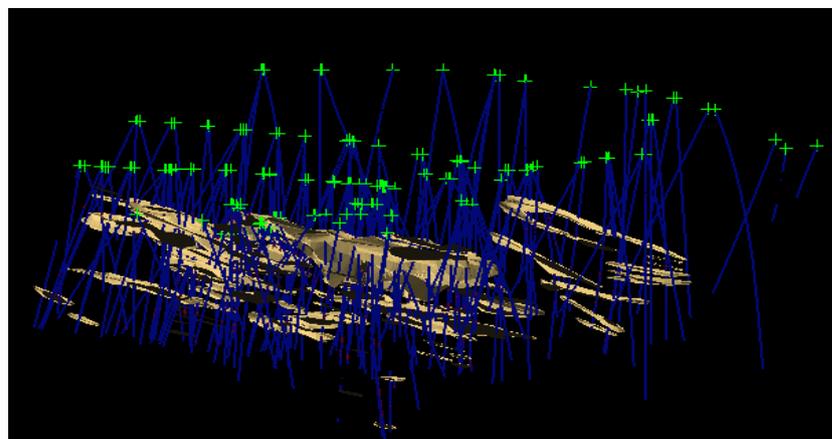


Imagen 9: Sondajes dentro del cuerpo mineralizado, vista de perfil.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



3.2 Base de datos.

A partir de las muestras obtenidas en la campaña de exploración se generó una base de datos, realizando compósitos de muestras cada 1 metro. Compositar corresponde a la técnica de combinar valores adyacentes de muestras en tramos más largos, promediando las leyes ponderadas por el largo de la muestra y se realiza con el objetivo de filtrar la alta variabilidad, mejorando la variografía.

La base de datos cuenta con 65.464 filas conteniendo la identificación de cada uno de los sondajes, las coordenadas correspondientes y los valores de las leyes de cobre total (cobre soluble más cobre insoluble), plata, oro y molibdeno. En la siguiente tabla se muestra de forma parcial la base de datos.

	DHID	MIDX	MIDY	MIDZ	CUT	AG	AU	MO
1	CPO-1	373.707.264	7.539.162.422	237.756	1.910	-1.000	-1.000	-1.000
2	CPO-1	373.707.792	7.539.163.267	237.669	1.910	-1.000	-1.000	-1.000
3	CPO-1	373.708.320	7.539.164.112	237.582	2.850	-1.000	-1.000	-1.000
4	CPO-1	373.708.848	7.539.164.957	237.495	2.850	-1.000	-1.000	-1.000
5	CPO-1	373.709.376	7.539.165.802	237.408	0.310	-1.000	-1.000	-1.000
6	CPO-1	373.709.903	7.539.166.647	237.321	0.310	-1.000	-1.000	-1.000
7	CPO-1	373.710.431	7.539.167.491	237.233	0.190	-1.000	-1.000	-1.000
8	CPO-1	373.710.959	7.539.168.336	237.146	0.190	-1.000	-1.000	-1.000
9	CPO-1	373.711.487	7.539.169.181	237.059	1.170	-1.000	-1.000	-1.000
10	CPO-1	373.712.015	7.539.170.026	236.972	1.170	-1.000	-1.000	-1.000
11	CPO-1	373.712.543	7.539.170.871	236.885	1.760	-1.000	-1.000	-1.000
12	CPO-1	373.713.071	7.539.171.715	236.798	1.760	-1.000	-1.000	-1.000
13	CPO-1	373.713.599	7.539.172.560	236.711	3.650	-1.000	-1.000	-1.000
14	CPO-1	373.714.127	7.539.173.405	236.623	3.650	-1.000	-1.000	-1.000
15	CPO-1	373.714.655	7.539.174.250	236.536	3.320	-1.000	-1.000	-1.000
16	CPO-1	373.715.182	7.539.175.095	236.449	3.320	-1.000	-1.000	-1.000
17	CPO-1	373.715.710	7.539.175.940	236.362	1.240	-1.000	-1.000	-1.000

Tabla 2: Base de datos

En el anexo N°1, ítem 1.1, se muestra la forma de visualizar la base de datos en el software Vulcan.

3.3 Modelo de bloques.

El modelo de bloques se realizó con el software Vulcan, la forma, ubicación espacial y dimensiones del modelo se diseñaron de modo que abarque todo el volumen del cuerpo mineralizado y la topografía de superficie. En la determinación del largo y ancho del bloque, intervinieron diversos factores dependiendo de la morfología y tipo de yacimiento y de parámetros técnicos de la explotación.

La ubicación está dada por las coordenadas X, Y y Z, vértice izquierdo inferior, elegido como origen del modelo de bloques (X_0 , Y_0 y Z_0) (imagen 10).

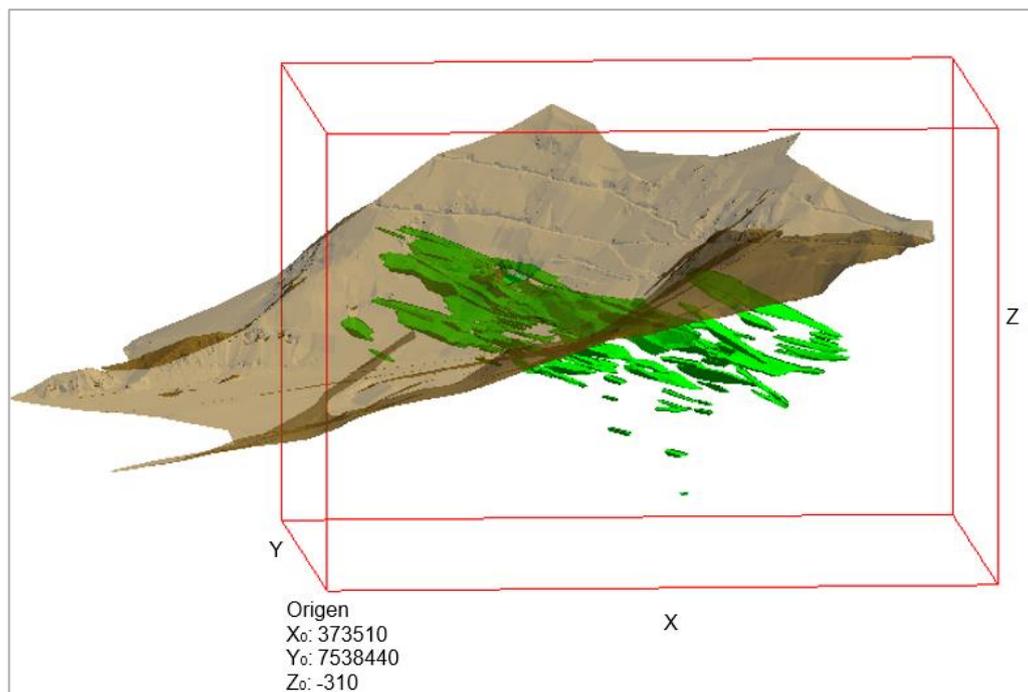


Imagen 10: Paralelepípedo que contiene al modelo de bloques.

Realizando el cociente entre las dimensiones del modelo (desplazamiento) en las diferentes direcciones y el tamaño del bloque se obtiene el número de bloques, como se puede observar en la tabla 3, dando un total de 85.417.152 bloques.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



	Origen	Desplazamiento	Tamaño de bloque	Nº de bloques
X	373510	1270	2,5	508
Y	7538440	1130	2,5	452
Z	-310	930	2,5	372

Tabla 3: Dimensiones y numero de bloques.

Atributos del modelo de bloques

Determinado el número y tamaño de los bloques, se les asignó a éstos una serie de atributos de tal forma de caracterizarlos en toda su magnitud, para que se transformen en una excelente herramienta de planificación. El número y tipo de atributos que se le asignaron a cada bloque dependen del tipo de proceso a realizar y del grado de información disponible.

En este caso el modelo de bloques cuenta con los siguientes atributos:

- Ubicación espacial (Xcentre, Ycentre Zcentre): A cada bloque se lo identifica en el espacio por las coordenadas de su punto medio, tomando como referencia el punto origen del modelo.
- Largo (Xlength, Ylength y Zlength): Largo de cada bloque en los diferentes sentidos.
- Minar: Porcentaje de pertenencia de cada bloque a una unidad geológica.
- Mineral: Asignado a bloques que se encuentran sobre la ley de corte.
- Tasa de oxidación (Tox): Cociente entre cobre soluble y cobre total.
- Cobre insoluble (Cui): Ley del cobre insoluble, dada en porcentaje.
- Cobre soluble (Cus): Ley del cobre soluble, dada en porcentaje.

Atributos calculados en el presente trabajo:

- Cobre total(Cut): Ley del cobre total, dada en porcentaje.
- Varianza de Kriging (Cut_vk)
- Numero de datos (Cut_nd): Numero de muestras que participaron en la evaluación de cada bloque.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



- Número de sondajes (Cut_ns): Número de sondajes que participaron en la evaluación de cada bloque.
- Distancia (Cut_dt): Promedio de las distancias de las muestras al centroide.
- Categoría (Categ): Categoría de los recursos, se le asigna el valor 1 a los bloques pertenecientes a los recursos medidos, el valor 2 a los que forman parte de los recursos indicados y el valor 3 a bloques que comprenden los recursos inferidos.
- Incertidumbre: Porcentaje de incertidumbre de que la ley real de cada bloque sea igual a ley estimada.

3.4 Método de explotación considerado.

Sub Level Stoping es el método de explotación propuesto a partir del estudio geomecánico realizado. Se trata de un método auto soportante, el cual implica extraer el mineral y dejar la cavidad que éste ocupa vacía. En S.L.S el mineral es arrancado a partir de subniveles de perforación por medio de voladuras efectuadas a través de abanicos verticales. Se realizan perforaciones de 25-30 m (descendente) y 15 m (ascendente) de 2 a 3 pulgadas de diámetro, perforados de preferencia con jumbos radiales electro-hidráulicos y barras de extensión hacia una cara libre o slot.

Para llevar a cabo la extracción del mineral, el método Sub Level Stoping debe contar con los siguientes desarrollos:

- Un nivel base o nivel de producción consistente en una galería de transporte y estocadas de carguío que permiten habilitar los puntos de extracción por medio de scoops (LHD)
- Trincheras o zanjas recolectoras de mineral que abarcan toda la extensión del nivel de producción.
- Galerías o subniveles de perforación dispuestos en altura bajo distintas configuraciones conforme a la geometría del cuerpo mineralizado.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



- Una galería de acceso a los subniveles de perforación emplazada en el límite posterior de la unidad de explotación.
- Una chimenea a partir de la cual se excava el corte inicial (slot) que sirve como cara libre para las primeras voladuras de producción.

Es de suma importancia que para utilizar el método de explotación la roca mineralizada y la roca circundante presenten buenas condiciones de estabilidad, es decir, deben ser suficientemente competentes, no requiere, por lo tanto, de la utilización intensiva o sistemática de elementos de sostenimiento.

Características generales del método:

- Alta producción
- Aplicable a cuerpos largos, muy inclinados (idealmente verticales), regulares y con roca mineral y de caja competente.
- Productividad: 4.000 – 10.000 t/día.
- Desarrollo intensivo, contando con la ventaja de que la mayoría de estas labores se ubican en la zona mineralizada.
- Método no selectivo.
- Uno de los métodos subterráneos de más bajo costo.

En la siguiente figura se muestra un esquema de este método de explotación.

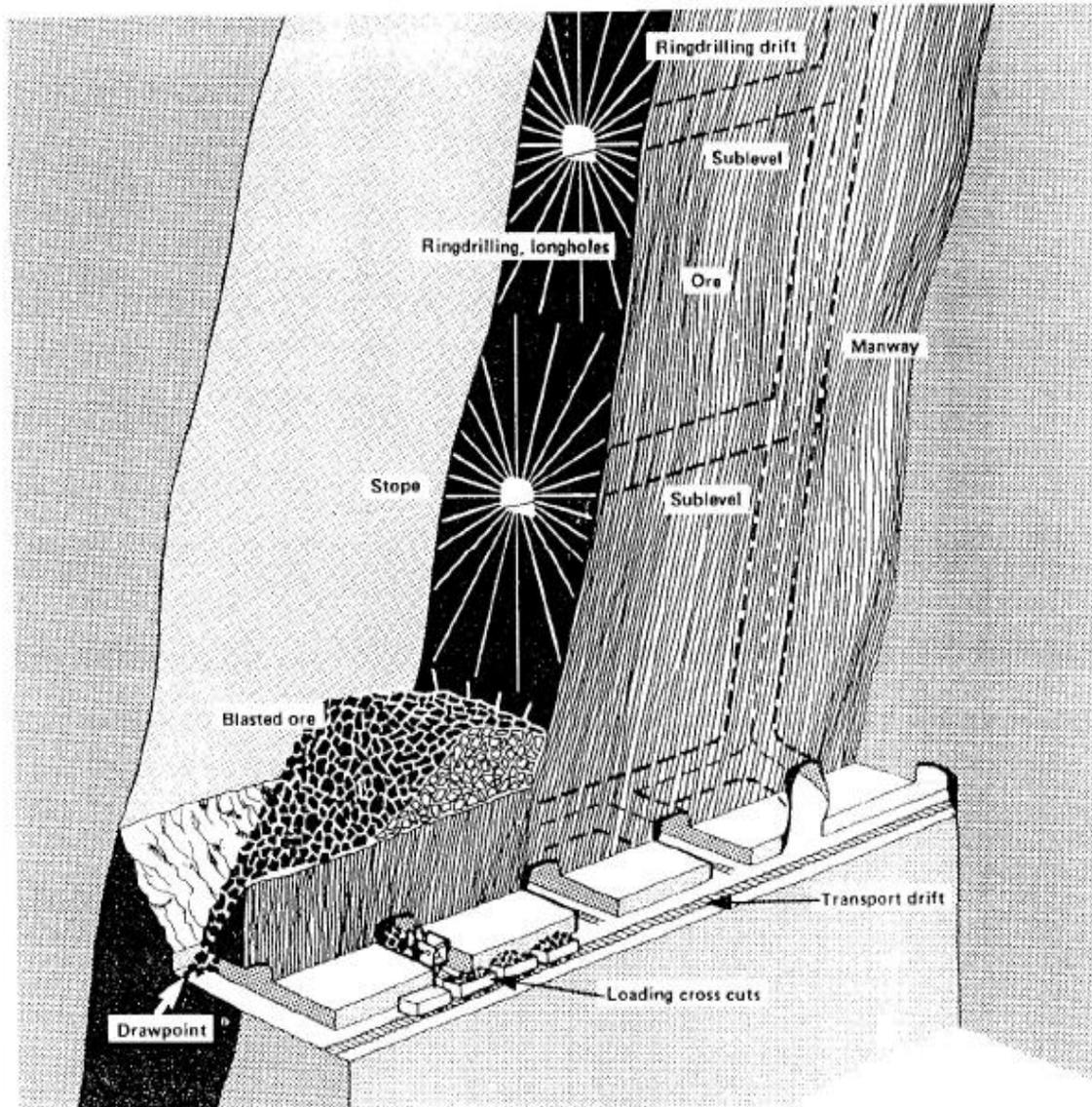


Figura 30: Esquema de explotación Sub Level Open Stopping, Cámaras Abiertas. Fuente [11]



CAPÍTULO 4

DESARROLLO DEL CASO DE ESTUDIO

4.1 Análisis estadístico de los compósitos.

Haciendo uso del módulo “analizar” del software, detallado en el anexo N°1, ítem 1.2, se realizó el análisis estadístico de la totalidad de los compósitos que componen la base de datos (65.464 datos), considerando como variable de interés el cobre total (CUT), debido a que la tasa de oxidación es alta, es decir, la mayoría del cobre total es cobre soluble. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos:

Nombre de la variab	CUT
Cuenta	65464
Media	0,264
Desviación estándar	3,222
Varianza	10,378
Coefficiente de Varia	12,221
Máx	99,000
Tercer cuartil	0,080
Mediana	0,030
Primer cuartil	0,010
Min	0,000

Tabla 4: Parámetros estadístico de la variable CUT

En la tabla 4 se observa que el valor máximo de los datos es igual a 99, esto se debe a que es el valor asignado predeterminadamente a la variable CUT, en aquellas zonas donde no hay presencia de mineralización. Para evitar este valor se aplica un filtro a la variable CUT, creándose una nueva base de datos, denominada CUT <1>, el filtro cuenta con la condición de delimitar los datos a la triangulación del mineral, de este modo se contempla únicamente los datos que se encuentran dentro del cuerpo mineral.

En la Figura 31, se muestran los parámetros estadísticos obtenidos para la variable CUT<1> y el histograma correspondiente:

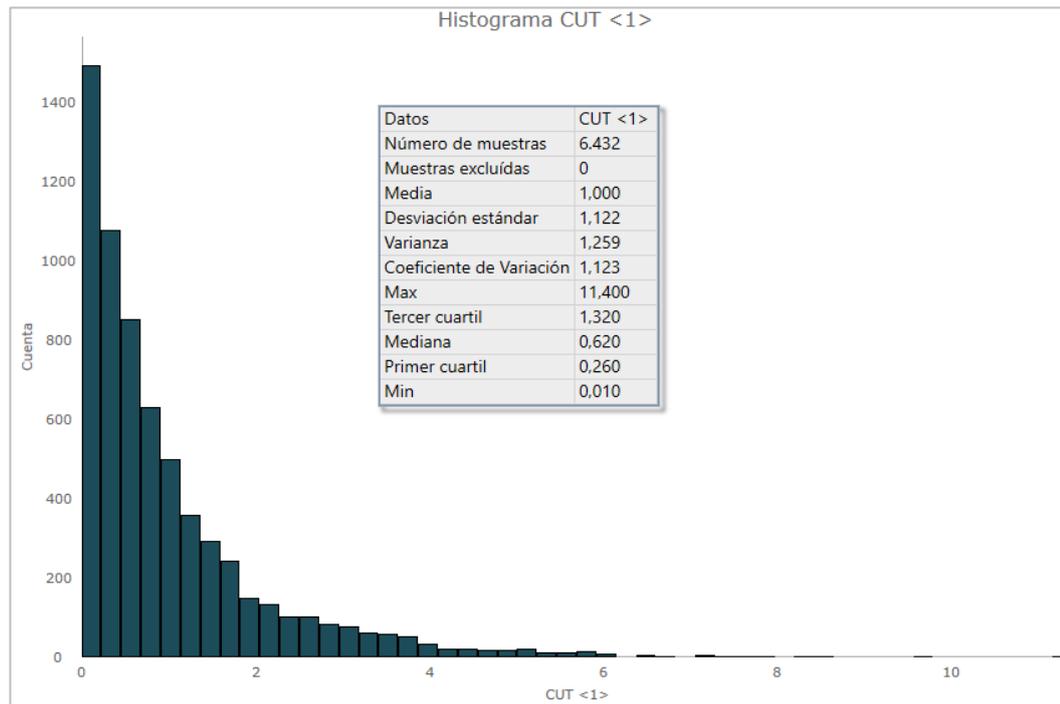


Figura 31: Histograma y parámetros estadísticos de la variable CUT <1>

Además, se realizó un gráfico de cajas o box plot (figura 32) que permite visualizar rápidamente la dispersión de los datos. La caja (rectángulo) abarca el intervalo comprendido entre el primer y el tercer cuartil, es decir que el 50% de los datos centrales están dentro de la caja, mientras que el resto se representan sobre los segmentos. Los valores que se encuentran fuera de los límites de las líneas son los denominados valores atípicos.

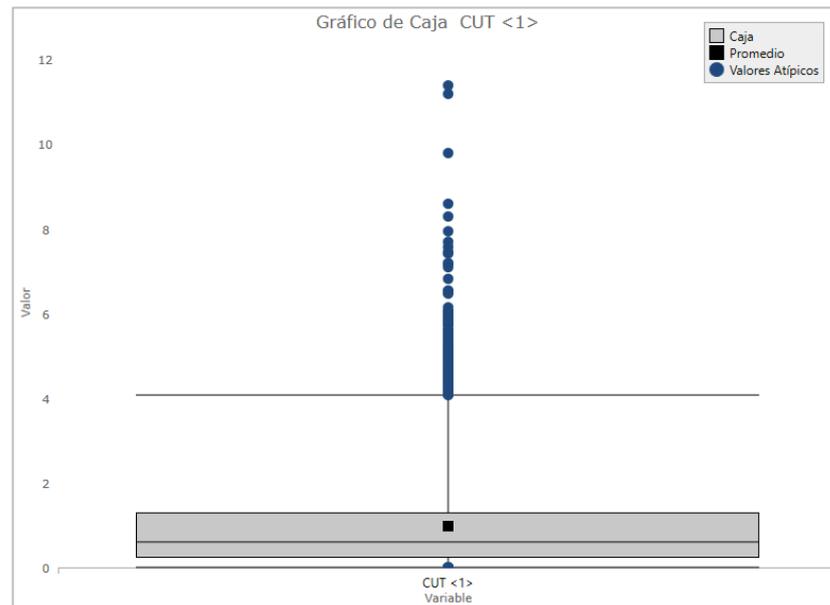


Figura 32: Grafico de caja de la variable CUT <1>

4.2 Variografía.

4.2.1 Variogramas experimentales.

Para efectuar el estudio variográfico, en primer lugar se debe definir la dirección preferencial, para ello se creó un elipsoide orientado en dirección de la mineralización, el cual brinda el azimut e inclinación de cada uno de sus ejes, tal como se muestra en las imágenes 11 y 12.

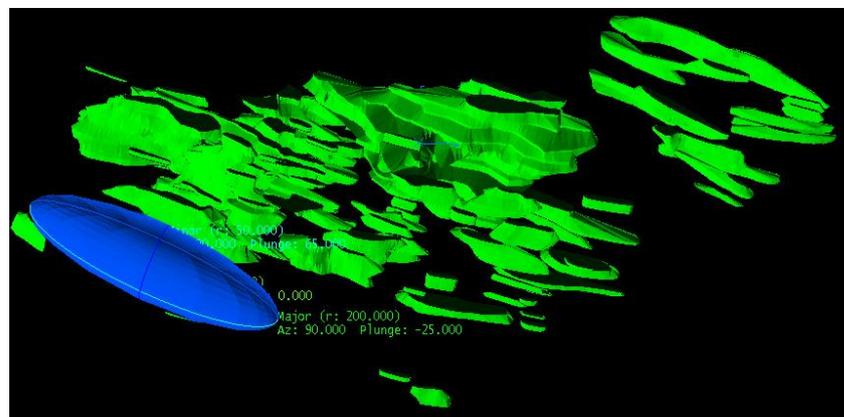


Imagen 11: Cuerpo mineralizado y elipsoide.

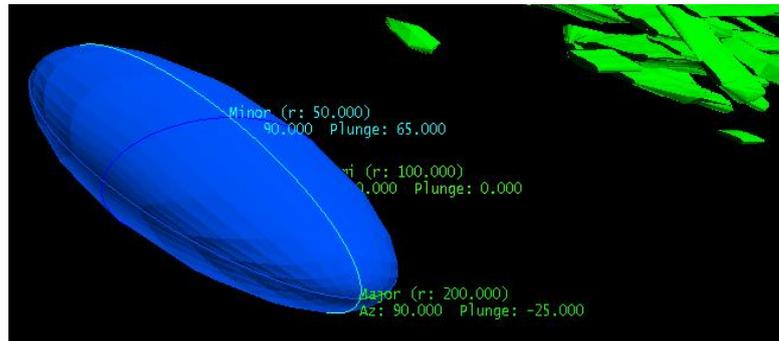


Imagen 12: Elipsoide direccional.

Los parámetros obtenidos son los siguientes:

	Rumbo	Inclinación (plunge)
Eje mayor	90°	-25°
Eje menor	90°	65°
Semi eje	0°	0°

Tabla 5: Parámetros del elipsoide direccional.

Estos parámetros de dirección se ingresaron para la creación de los variogramas experimentales de la variable CUT<1>, además de las siguientes propiedades:

	Tamaño del paso	Radio de búsqueda
Eje mayor	4	100
Eje menor	3	50
Semi eje	4	100

Tabla 6: Parámetros ingresados en la variografía de la variable CUT <1>.

En el anexo N°2 se muestra el proceso de creación de los variogramas en el software.

Los variogramas experimentales obtenidos en las tres direcciones se representan en la Figura 33.

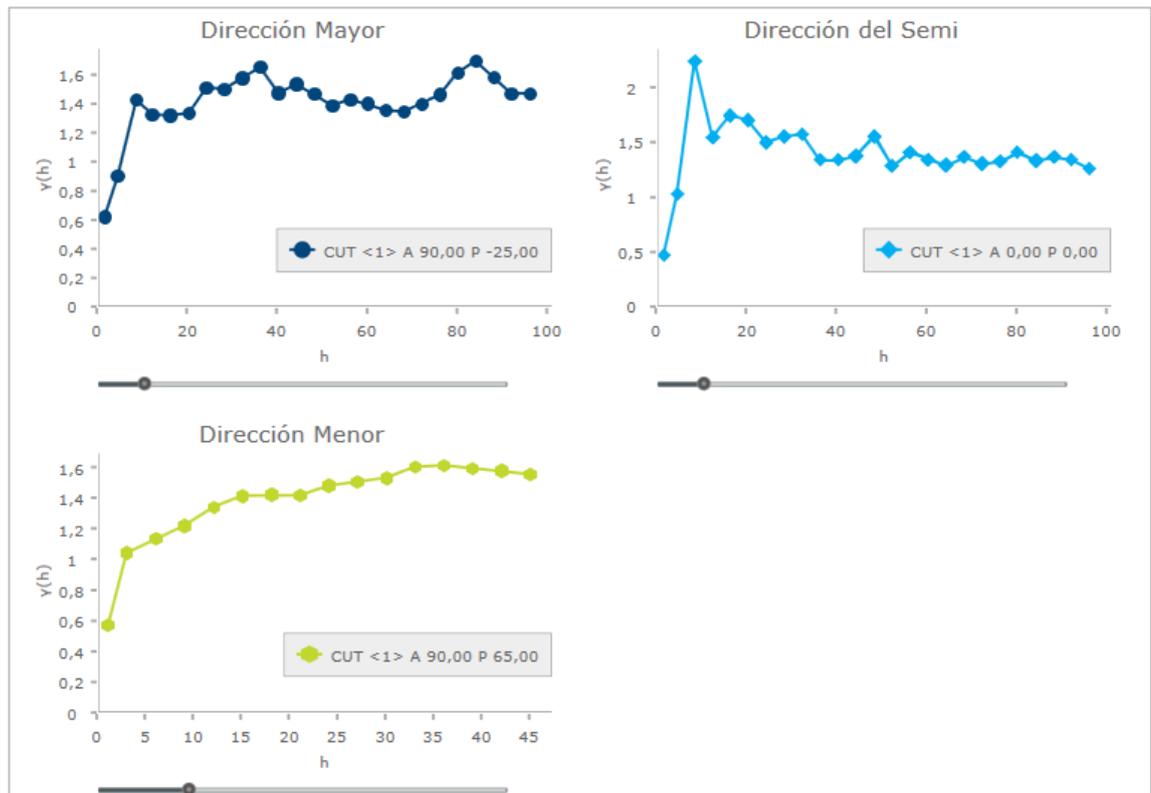


Figura 33: Variogramas experimentales de la variable CUT<1>

4.2.2 Variogramas teóricos.

El ajuste de los variogramas experimentales a modelos teóricos se realizó de manera manual, mediante el módulo “Analizador de Datos” de Vulcan cuyo procedimiento se explica en el anexo N°2. Los variogramas experimentales en las tres direcciones se ajustaron a un modelo esférico (figura 34), obteniéndose los parámetros como se muestran en la tabla 7.

Parámetros descriptivos		Dirección		
		Eje mayor	Semi eje	Eje menor
Efecto pepita	Co	0,46	0,46	0,46
Meseta	Co+C	1,32	1,32	1,32
Varianza espacial	C	0,86	0,86	0,86
Alcance	A	25,14	23,99	13,94

Tabla 7: Parámetros descriptivos de los variogramas teóricos de la variable CUT<1>.

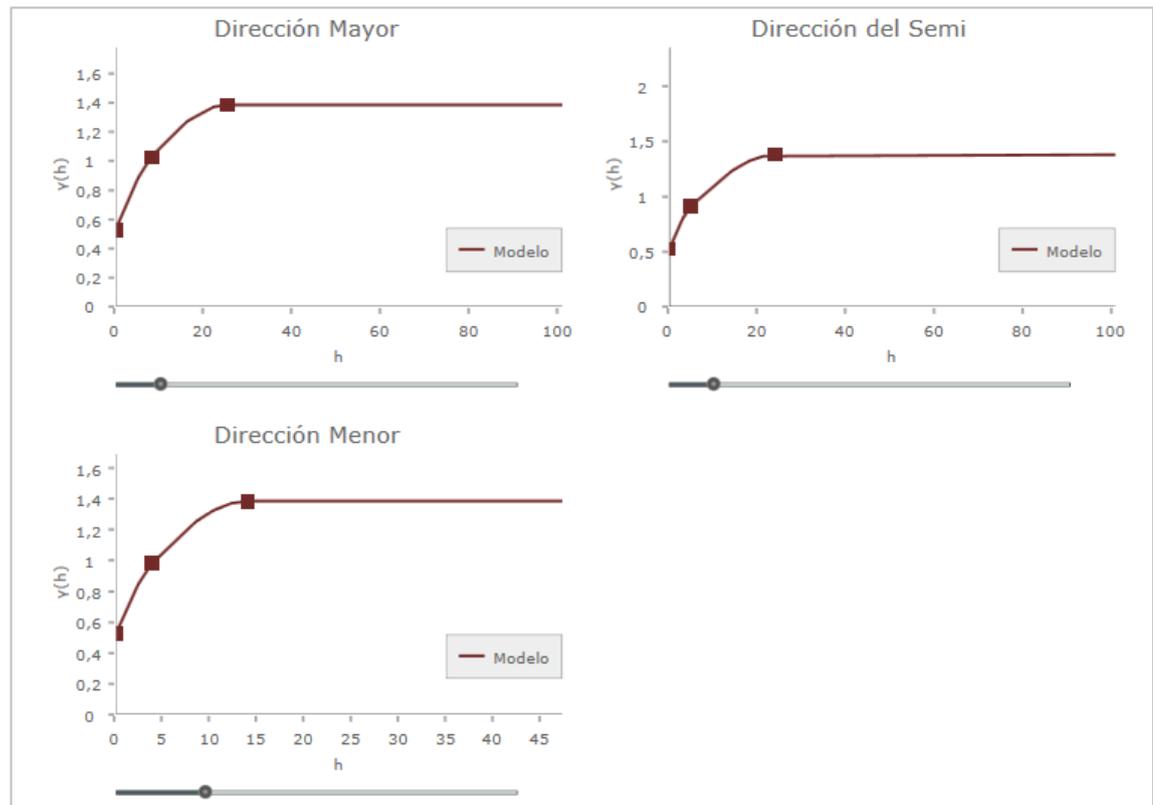


Figura 34: Variogramas teóricos de la variable CUT<1>.

4.3 Estimación de leyes de bloques mediante kriging ordinario.

4.3.1 Consideraciones.

Para la estimación de las leyes, se utiliza el kriging ordinario con las siguientes consideraciones:

- Región de búsqueda:
 - Orientación: Rumbo: 90 °; Inclinación: -25°
- Variograma: Modelo variográfico de la variable CUT<1>, obtenido a partir de la base de datos de los compósitos.
- Número de muestras: Varía de acuerdo a la categorización.
- Selección de muestras mediante condición numérica: Leyes de cobre que se encuentren entre 0,01% y 11,4 % (valores mínimo y máximo obtenidos en el análisis estadístico de la variable CUT <1>)



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



- Selección de muestras condicionada por una triangulación: Triangulación del mineral.
- Límites de muestras:
 - Excluir muestras distantes o valores atípicos: campo cut ; umbral 4% (valor determinado en el ítem 4.1, figura 32)
 - Alcance dado a la sección anterior:
 - Eje mayor: 15
 - Semi eje: 15
 - Eje menor: 10
 - Número límite de muestras por sondaje: Varía de acuerdo a la categorización.

4.3.2 Categorización de los recursos.

Se realizaron una serie de iteraciones o pasadas de estimación con el objetivo de definir las categorías del recurso, considerando la clasificación especificada en el código JORC. Se define un plan de kriging con restricciones de número de muestras y distintos tamaños de elipsoides de búsqueda, es decir, se tienen en cuenta criterios de geometría y cantidad. Las tres pasadas se encuentran orientadas en la dirección de los variogramas.

En las tablas 8 y 9, se presentan los métodos y criterios para la categorización de los recursos.

Criterio general	Criterio específico
QA/QC	Calidad de información
Geometría y cantidad	Cantidad de sondajes Distancia entre sondajes y centroide de bloque Cantidad de compósitos Distancia entre compósitos y centroide de bloque Proximidad a afloramiento/labores antiguas
Continuidad espacial	Parámetros variográficos Continuidad geológica/mineralización Dominio geológico/unidades de estimación
Kriging	Eficiencia del Kriging Slope of regresión

Tabla 8: Algunos métodos de categorización de recursos minerales.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Recursos		Medidos	Indicados	Inferidos
Región de búsqueda	Eje mayor	25	50	200
	Semi eje	25	50	200
	Eje menor	15	25	100
Número de muestras		4-10	4-10	2-10
Número límite de muestras por sondaje		3	3	1

Tabla 9: Criterios de categorización.

En la tabla 10, se muestran los resultados obtenidos teniendo en cuenta las consideraciones y criterios descriptos anteriormente, donde se indican la cantidad de bloques estimados por categoría.

	Recursos		
	Medidos	Indicados	Inferidos
Número de bloques estimados	152.560	265.602	107.533

Tabla 10: Numero de bloques correspondientes a cada categoría de recursos.

En el ANEXO N°3 se detalla el proceso de estimación de leyes y la categorización de los recursos.

4.3.3 Visualización de los resultados en el modelo de bloques.

Haciendo uso del módulo “bloque” del software, detallado en el anexo N°4, se cargó el modelo de bloques con su correspondiente escala de colores, la cual permite observar y comprender la ubicación y distribución de las leyes estimadas, como así también los bloques pertenecientes a cada categoría.

Se realizaron cortes longitudinales a través del cuerpo mineralizado, para poder visualizar el modelo.

Leyes estimadas: La imagen 13 muestra el plano de corte y en las imágenes 14 y 15 se pueden visualizar los bloques con valores de leyes estimadas por kriging.

Referencias: cobre total en (%)

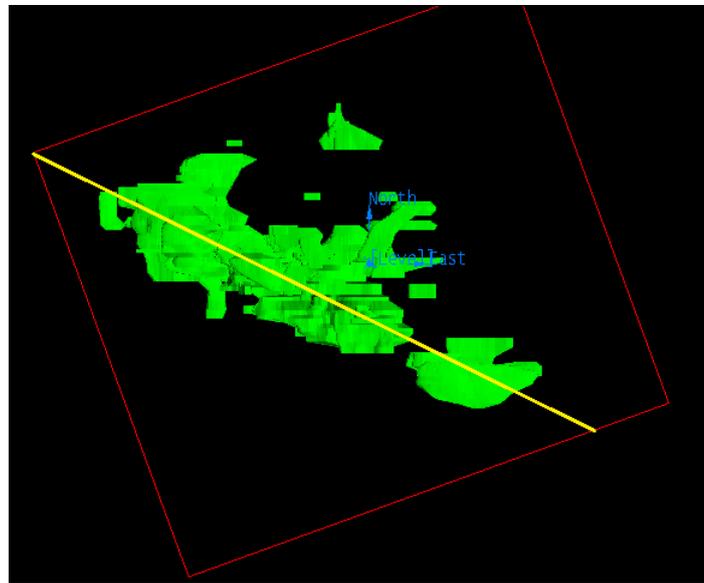
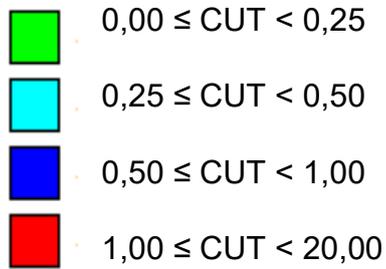


Imagen 13: Vista en planta de la ubicación del plano de corte.

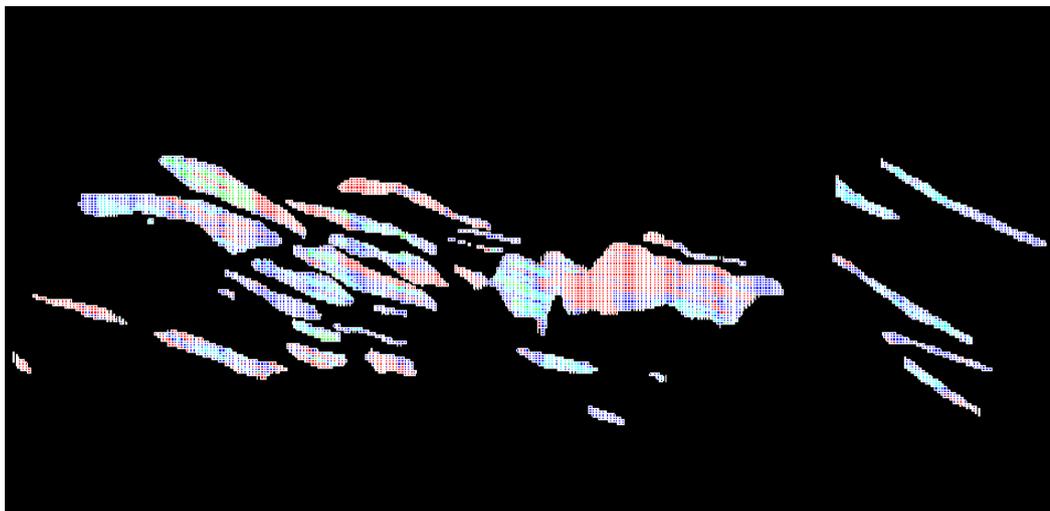


Imagen 14: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable cobre.

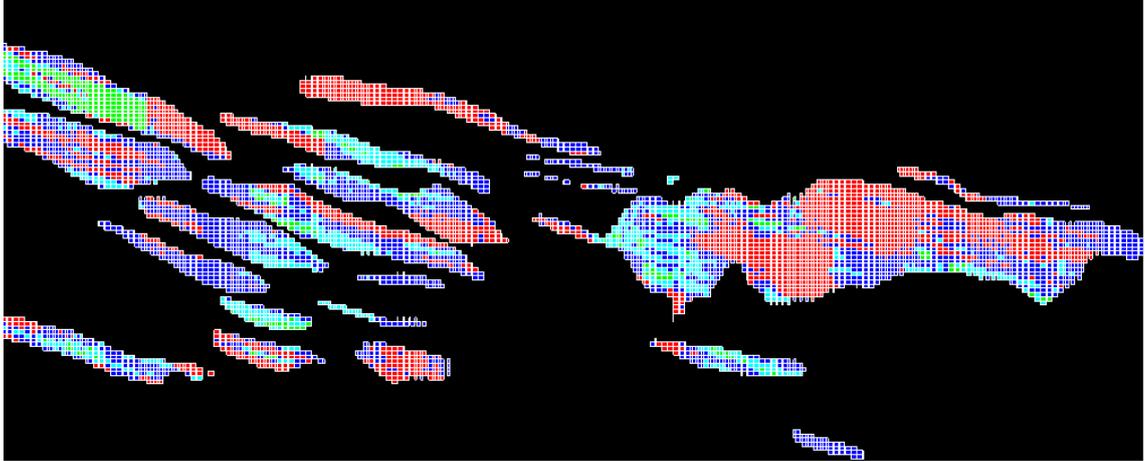


Imagen 15: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable cobre, ampliación zona central.

Categorías de los recursos: Las imágenes 16,19 y 22 muestran la ubicación de los diferentes planos de corte y en las imágenes 17,18,20,21,23 y 24 se pueden visualizar los bloques con rangos de colores de acuerdo al criterio de categorización establecido en tabla 9 (medidos, indicados e inferidos).

Referencias:

-  Recursos inferidos.
-  Recursos indicados.
-  Recursos medidos.

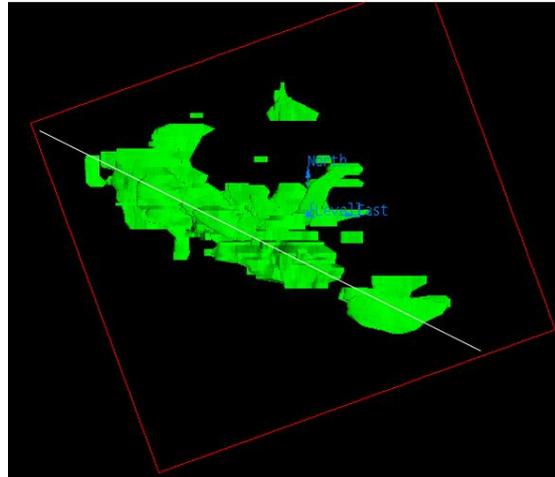


Imagen 16: Vista en planta de la ubicación del plano de corte 1.

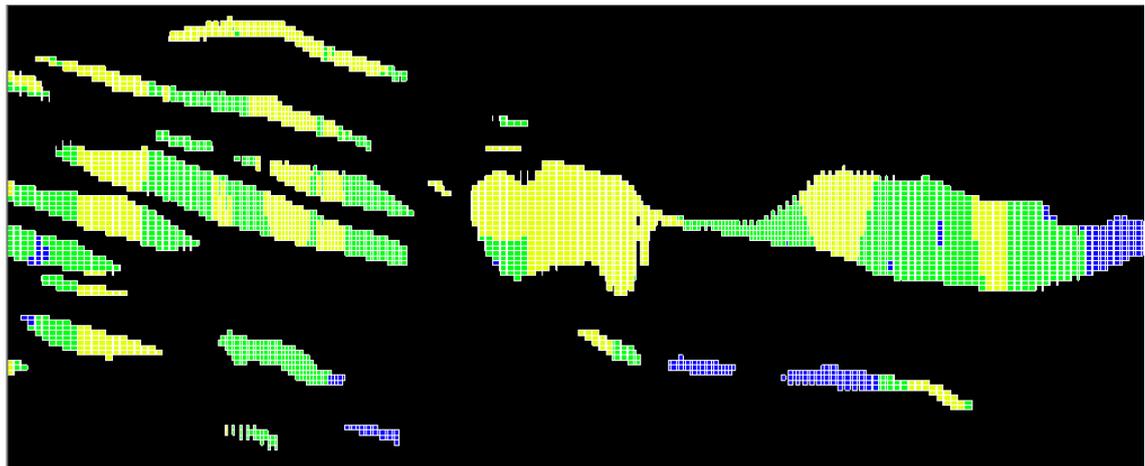


Imagen 17: Corte longitudinal 1, zona lateral izquierda.

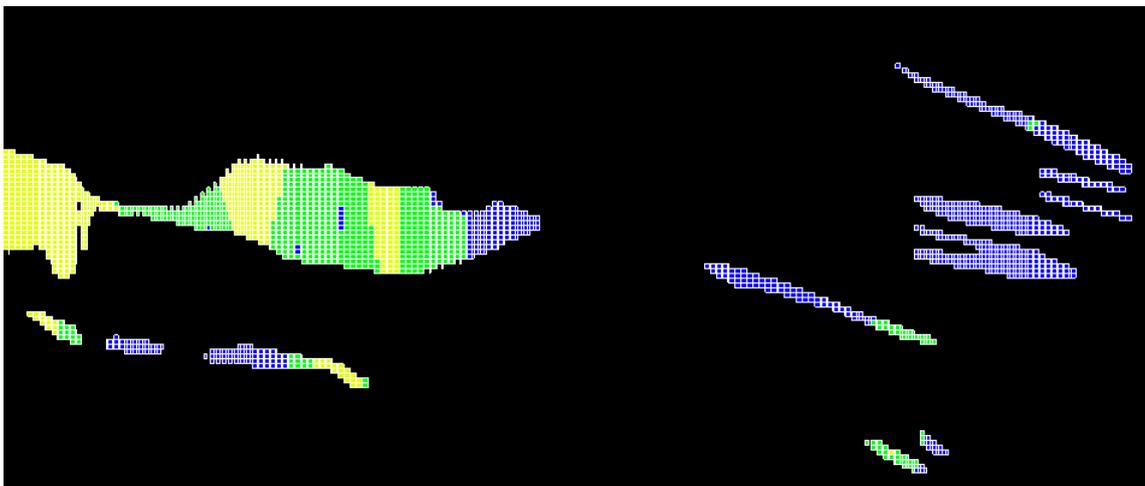


Imagen 18: Corte longitudinal 1, zona lateral derecha.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.

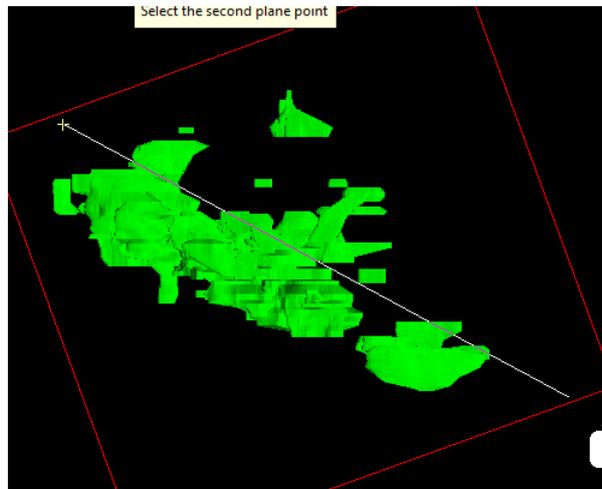


Imagen 19: Vista en planta de la ubicación del plano de corte 2.

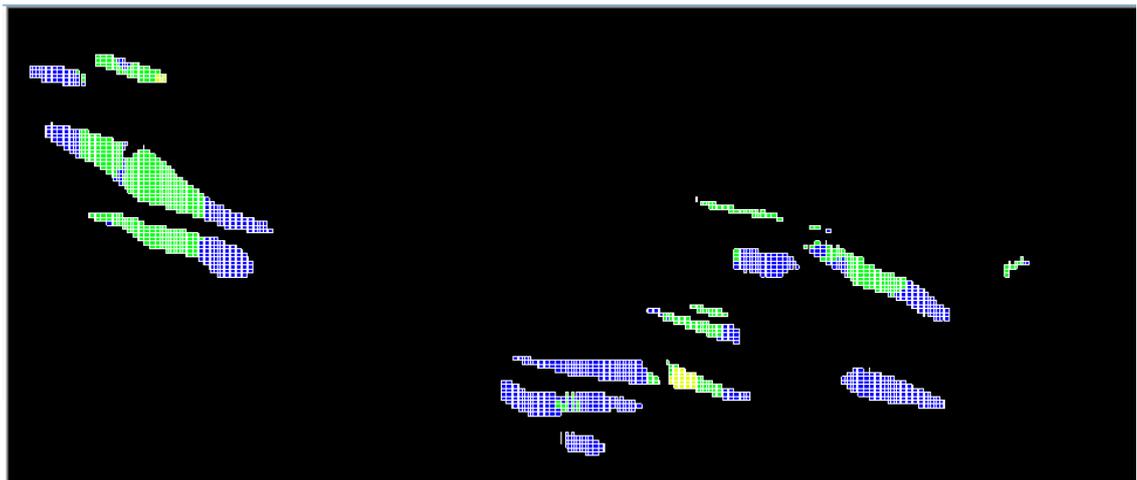


Imagen 20: Corte longitudinal 2, zona lateral izquierda



Imagen 21: Corte longitudinal 2, zona lateral izquierda

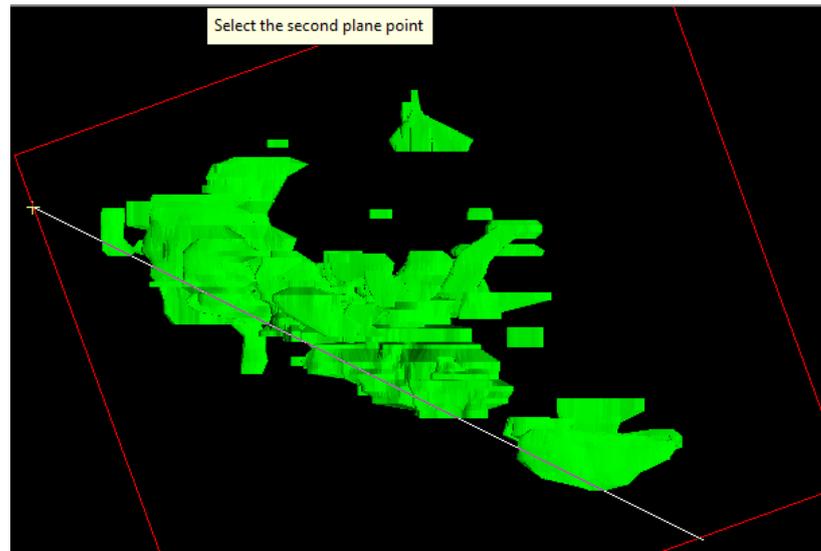


Imagen 22: Vista en planta de la ubicación del plano de corte 3.

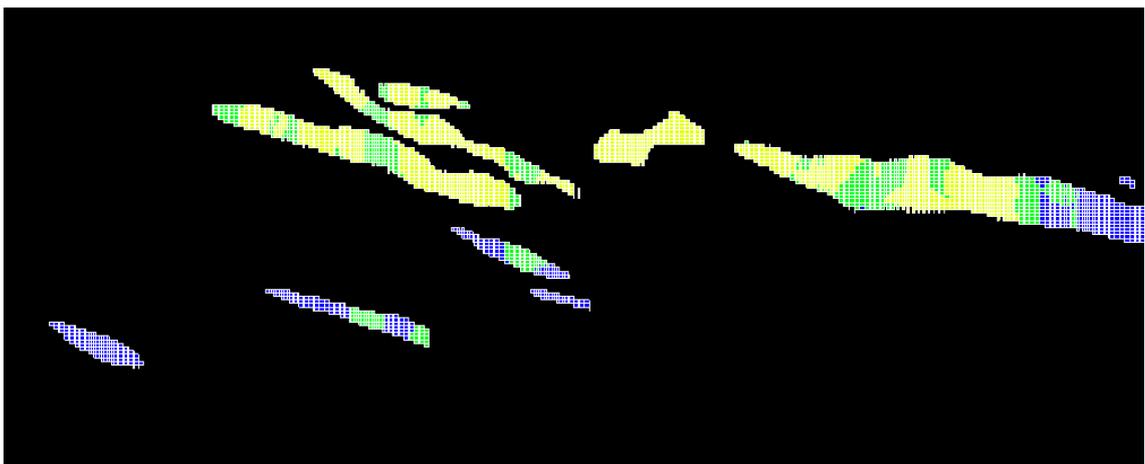


Imagen 23: Corte longitudinal 3, zona lateral izquierda

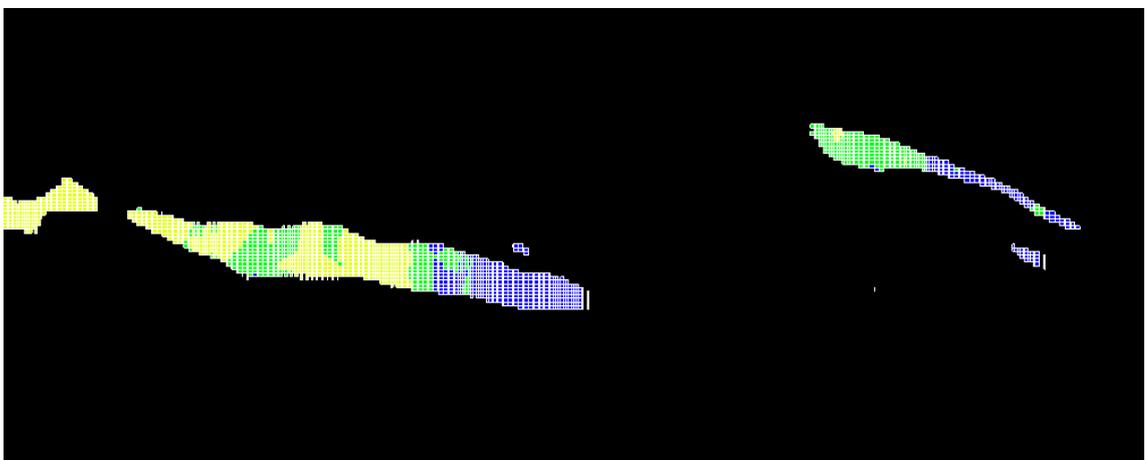


Imagen 24: Corte longitudinal 3, zona lateral izquierda.



4.3.4 Análisis estadístico de los valores obtenidos.

El análisis estadístico de los valores de leyes estimadas, se realizó de igual manera que para la variable CUT <1>, utilizando como origen de datos el modelo de bloques y no la base de datos de los compósitos. En la Figura 35 se muestran los resultados obtenidos.

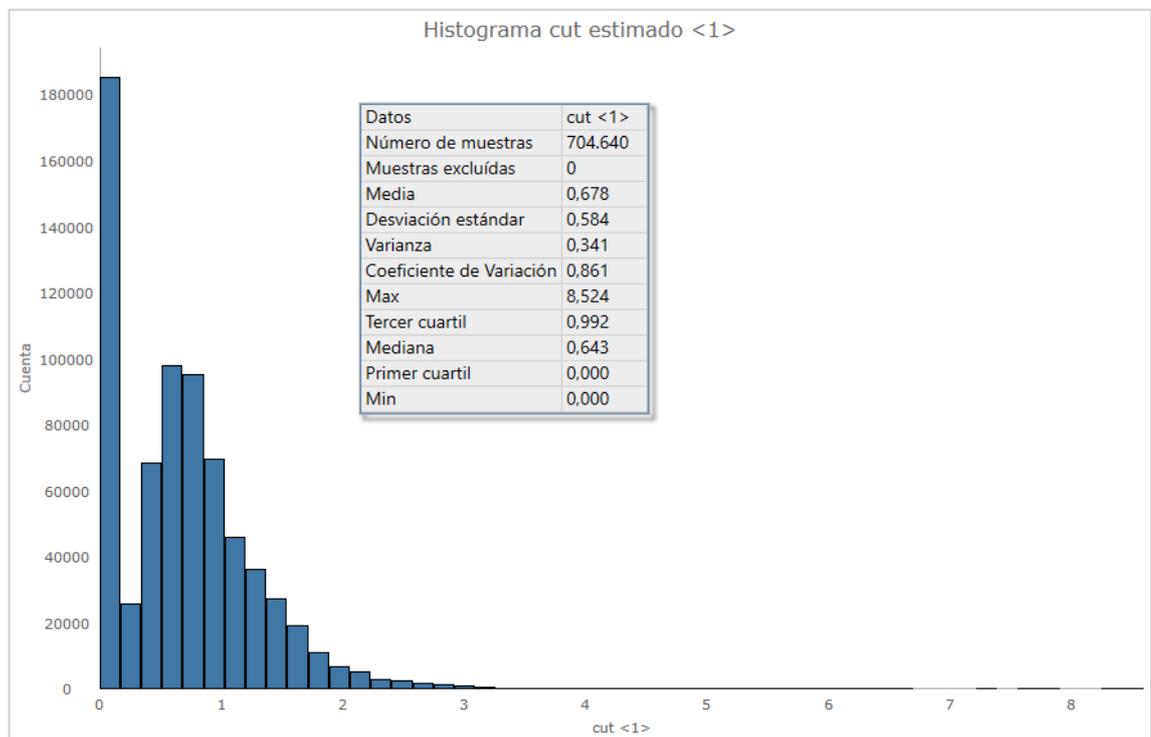


Figura 35: Histograma y parámetros estadísticos de la variable CUT estimado <1>

4.4 Simulación gaussiana condicional.

La simulación secuencial gaussiana se realizó a partir de los siguientes pasos:

4.4.1 Transformación a distribución gaussiana (anamorfosis gaussiana).

Para comenzar con la simulación se realizó la transformación denominada normal score, que consiste en transformar los datos desde su distribución original a una distribución gaussiana. Se debe realizar este procedimiento debido a que el software realiza un tipo de simulación denominada secuencial gaussiana, la cual trabaja dentro en un campo gaussiano.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



La transformación se hizo con el modulo Bloque del software, detallado en el ANEXO N°5, ítem 5.1.

Previo a la realización de la transformación, en la base de datos de los compósitos se agregó una variable denominada “AN_CUT”, la cual tomó valores dados por defecto, los cuales luego fueron reemplazados por los valores obtenidos de la transformación gaussiana de la variable CUT.

Para corroborar que la transformación se realizó correctamente, se procedió con el análisis estadístico de la variable AN_CUT, obteniendo como resultado lo siguiente:

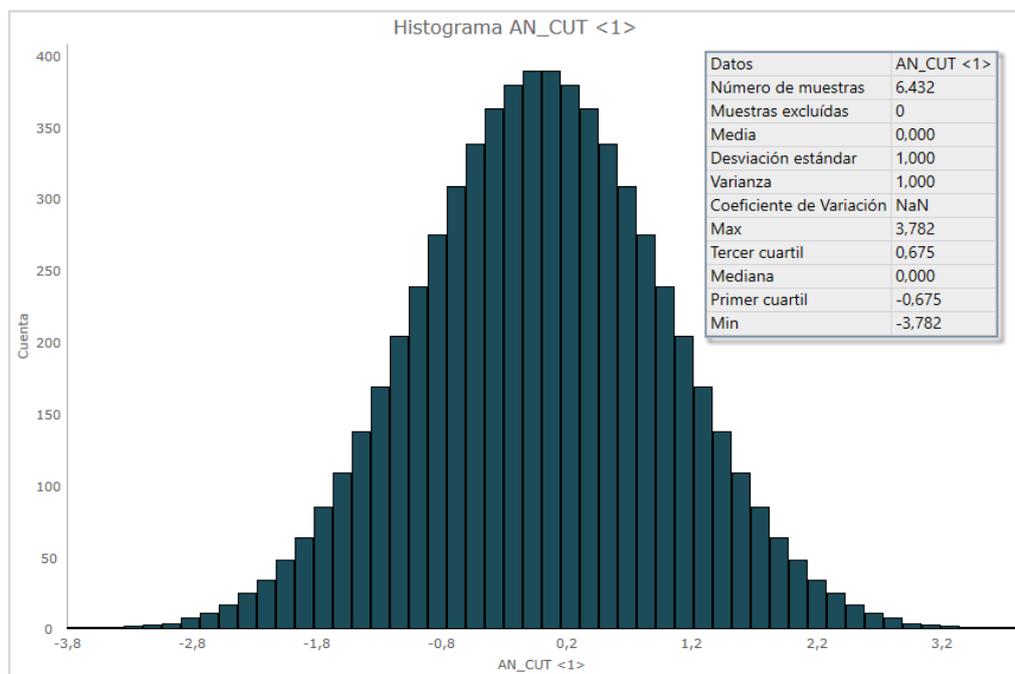


Figura 36: Histograma y parámetros estadísticos de la variable AN_CUT <1>

4.4.2 Modelo variográfico de los datos transformados.

Para la realización de los variogramas de los valores transformados, se aplica el mismo elipsoide de búsqueda empleado para el cálculo de los variogramas de la variable CUT<1>, cuyos parámetros se detallan en la tabla 11.

	Rumbo	Inclinación (plunge)	Tamaño del paso	Radio de búsqueda
Eje mayor	90°	-25°	4	100
Eje menor	90°	65°	3	50
Semi eje	0°	0°	4	100

Tabla 11: Parámetros ingresados en la variografía de los datos transformados.

En la figura 37 se representan los variogramas experimentales en las diferentes direcciones de búsqueda y en la figura 38 el ajuste de modelos teóricos esféricos, cuyos parámetros se muestran en la tabla 12.

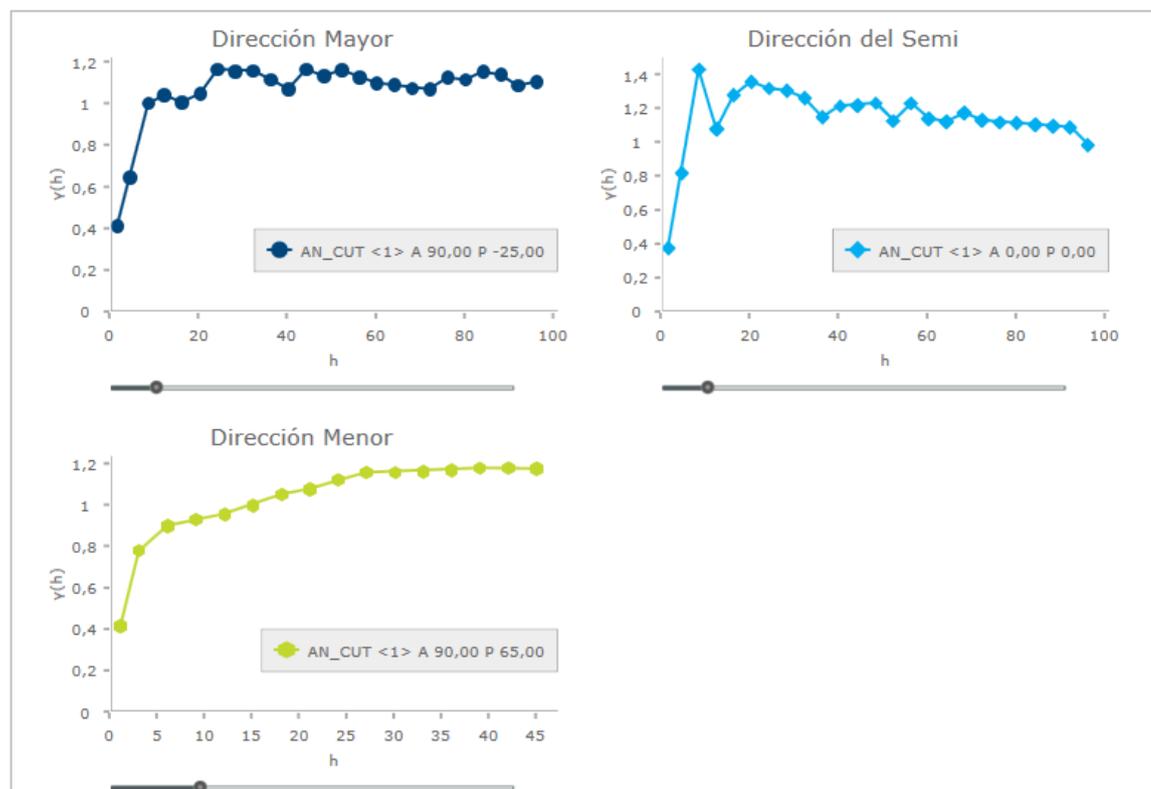


Figura 37: Variogramas experimentales de Los datos transformados.

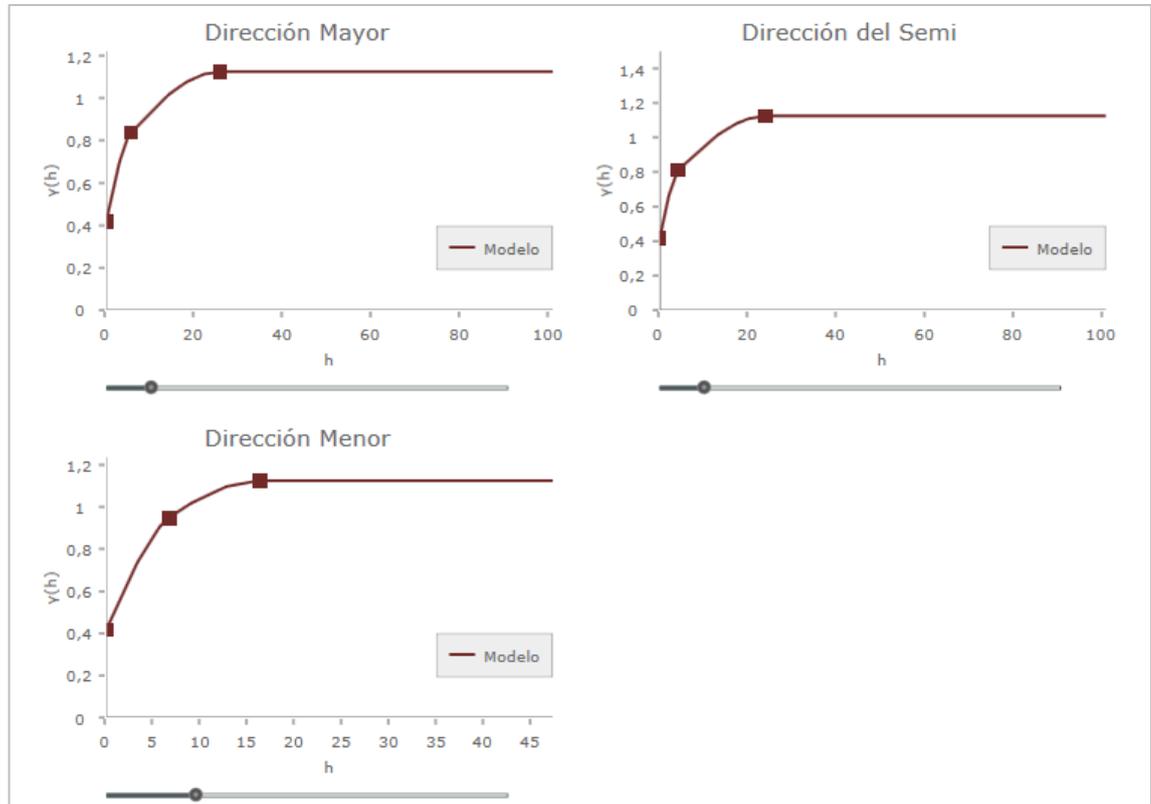


Figura 38: Variogramas teóricos de Los datos transformados.

Parámetros descriptivos		Dirección		
		Eje mayor	Semi eje	Eje menor
Efecto pepita	Co	0,42	0,42	0,42
Meseta	Co+C	1,12	1,12	1,12
Varianza espacial	C	0,70	0,70	0,70
Alcance	a	25,66	23,94	16,25

Tabla 12: Parámetros descriptivos de los variogramas teóricos de los datos transformados.

4.4.3 Parámetros utilizados en la simulación.

- Numero de realizaciones: 50
- Simulación mediante kriging simple.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



- Creación de un modelo de bloques para cada simulación.
- Región de búsqueda:
 - Orientación: Rumbo: 90 °; Inclinación: -25°
 - Distancia: Eje mayor: 50; Eje menor: 15; Semi eje: 45
- Variograma: Modelo variográfico de la variable AN_CUT, obtenido a partir de la transformación gaussiana.
- Restricciones:
 - Numérica: $CUT > 0$
 - Triangulación: Mineral
- Transformación gaussiana, valores máximos y mínimos: Obtenidos a partir de análisis estadístico de la variable $CUT < 1 >$.
- Realización de la transformación inversa.
- Numero de muestras consideras de un mismo sondaje: máximo 3

La realización de las simulaciones se desarrolló en el módulo “bloque”, cuyo procedimiento se detalla en el ANEXO N°5, ítem 5.1.

4.4.4 Validación de las simulaciones.

Para validar los resultados se utilizó el criterio de reproducción del histograma, donde se compara el histograma de la variable $CUT < 1 >$ con los histogramas de las 50 realizaciones, con el objeto de verificar que las simulaciones reproduzcan el comportamiento de los datos originales.

El análisis estadístico de los valores de las simulaciones, se realizó de igual manera que para la variable $CUT < 1 >$, utilizando como origen de datos el modelo de bloques.

La cantidad de datos obtenidos inicialmente, dentro de la triangulación del mineral, era igual a 704.640, luego de aplicar un filtro para considerar aquellos valores mayores a 0,01% el número de datos se redujo a 525.695.

En las siguientes figuras, se muestran los histogramas de 16 simulaciones, el resto de los histogramas se encuentran el ANEXO N° 6.

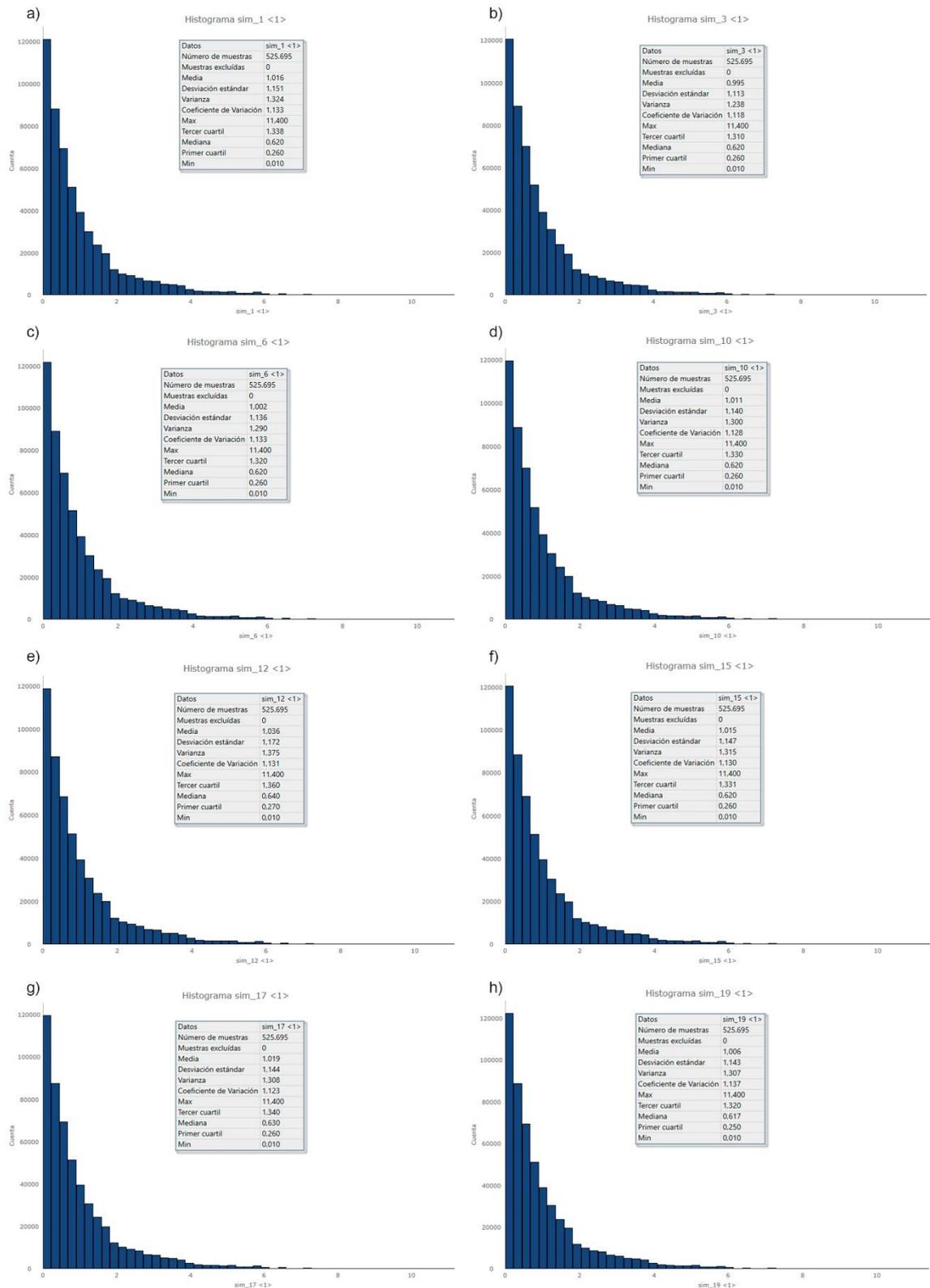


Figura 39: Histograma y parámetros estadísticos, a) variable "Sim_1", b) variable "Sim_3", c) variable "Sim_6", d) variable "Sim_10", e) variable "Sim_12", f) variable "Sim_15", g) variable "Sim_17" y h) variable "Sim_19".



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.

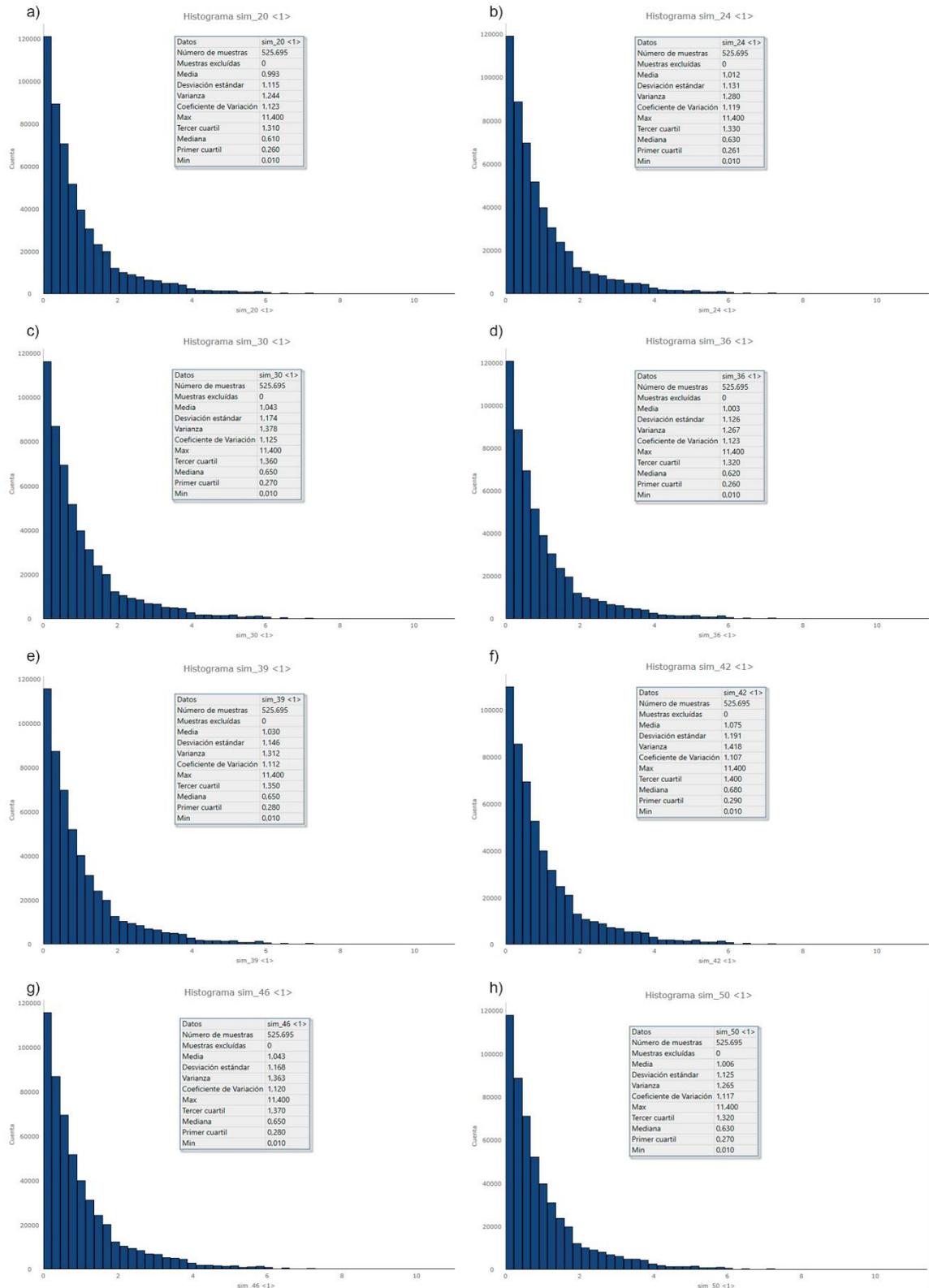


Figura 40: Histograma y parámetros estadísticos, a) variable "Sim_20", b) variable "Sim_24", c) variable "Sim_30", d) variable "Sim_36", e) variable "Sim_39", f) variable "Sim_42", g) variable "Sim_46" y h) variable "Sim_50"

4.4.5 Visualización de las simulaciones.

Se realizó de la misma manera que la visualización de las leyes estimadas y las categorías, utilizando como variable cada una de las simulaciones. La ubicación del plano de corte es la indicada en la imagen 13 y los resultados obtenidos de 16 simulaciones se muestran en las imágenes siguientes, las simulaciones restantes se encuentran en el anexo N° 7.

Referencias: cobre total en (%)

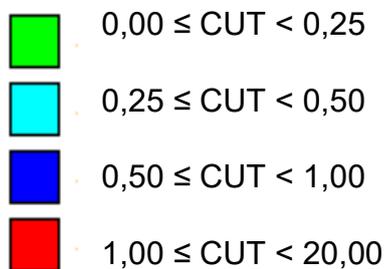


Imagen 25: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable "simulación N°2", zona central de la mineralización.

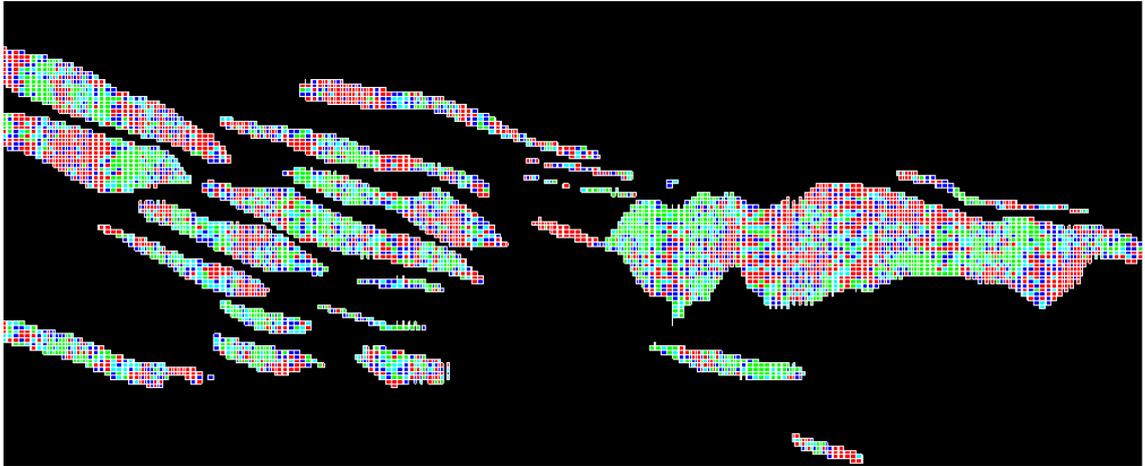


Imagen 26: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable "simulación N°5", zona central de la mineralización.

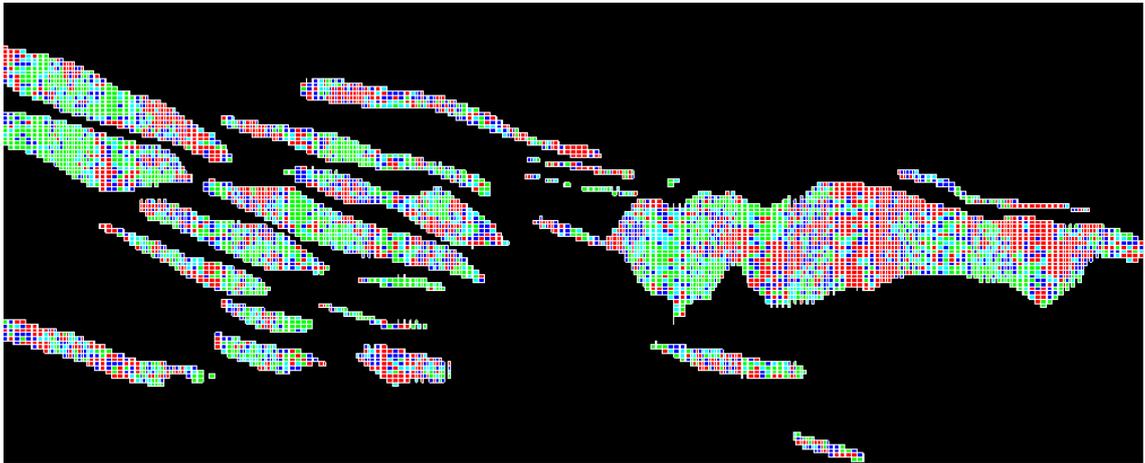


Imagen 27: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable "simulación N°8", zona central de la mineralización.

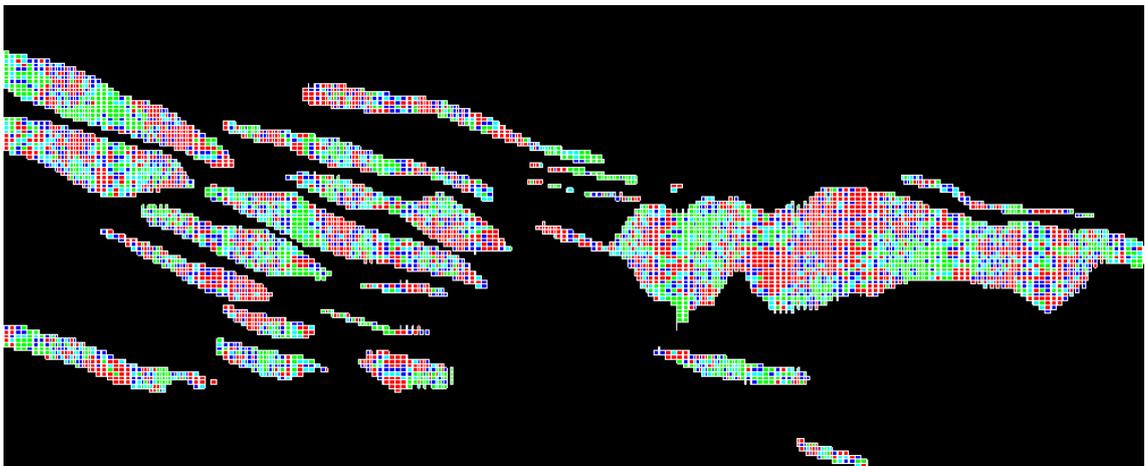


Imagen 28: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable "simulación N°14", zona central de la mineralización.



Imagen 29: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable “simulación N°20”, zona central de la mineralización.

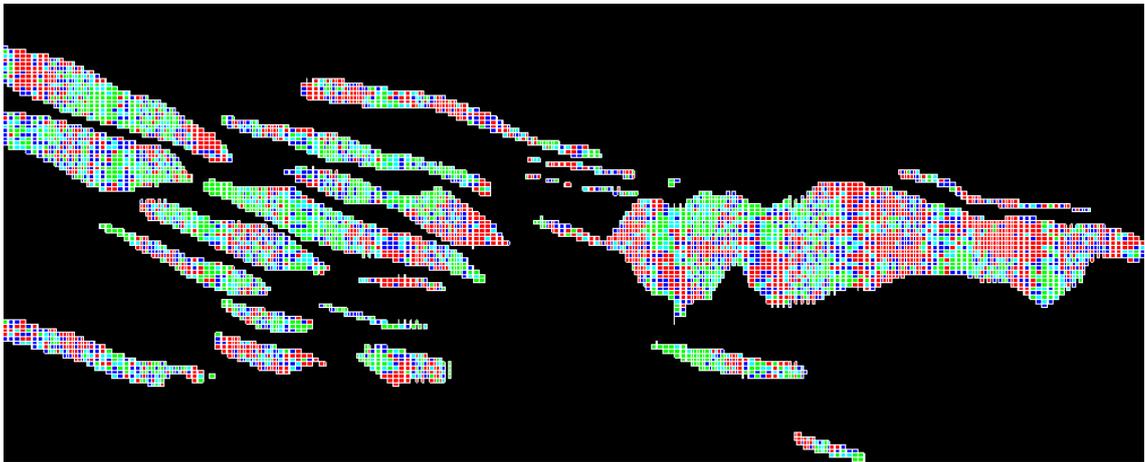


Imagen 30: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable “simulación N°23”, zona central de la mineralización.



Imagen 31: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable “simulación N°26”, zona central de la mineralización.



Imagen 32: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable “simulación N°29”, zona central de la mineralización.



Imagen 33: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable “simulación N°33”, zona central de la mineralización.



Imagen 34: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable “simulación N°35”, zona central de la mineralización.

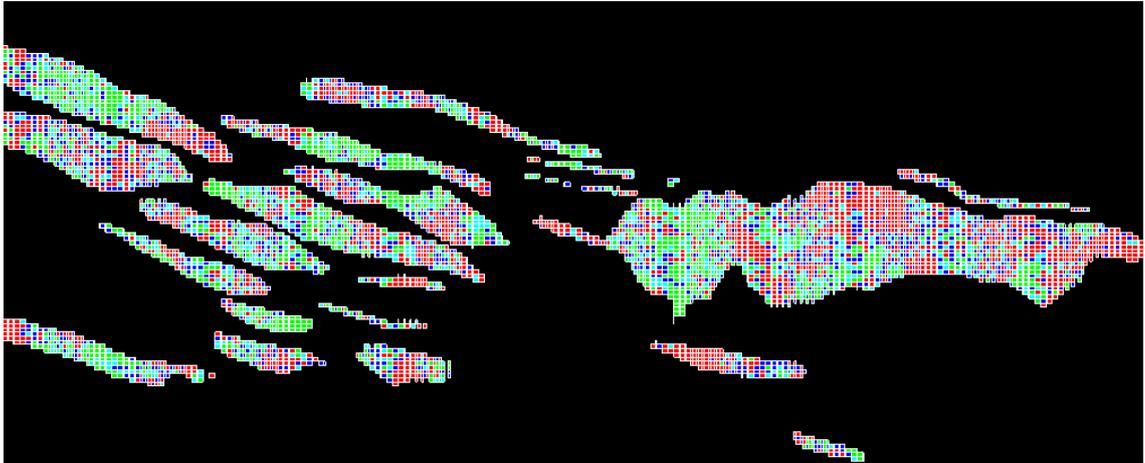


Imagen 35: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable "simulación N°40", zona central de la mineralización.

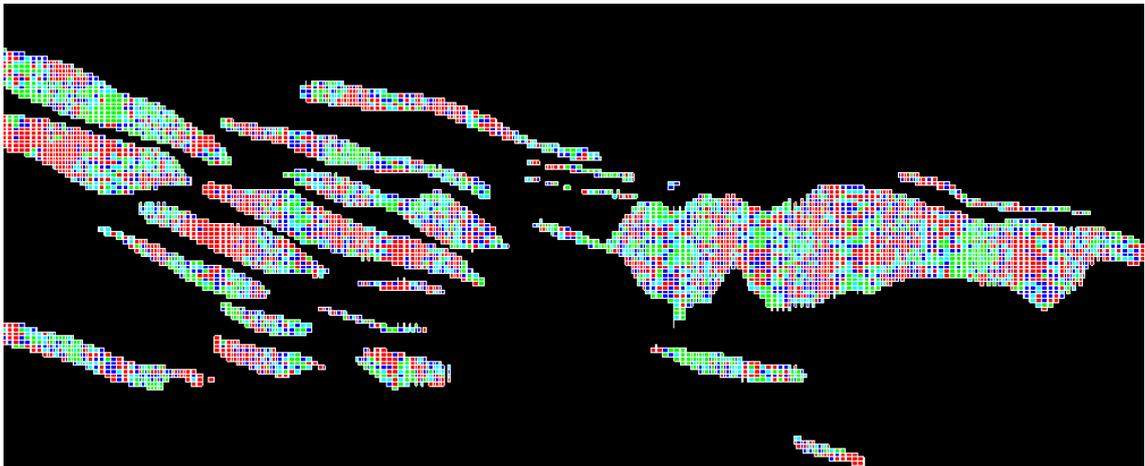


Imagen 36: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable "simulación N°42", zona central de la mineralización.

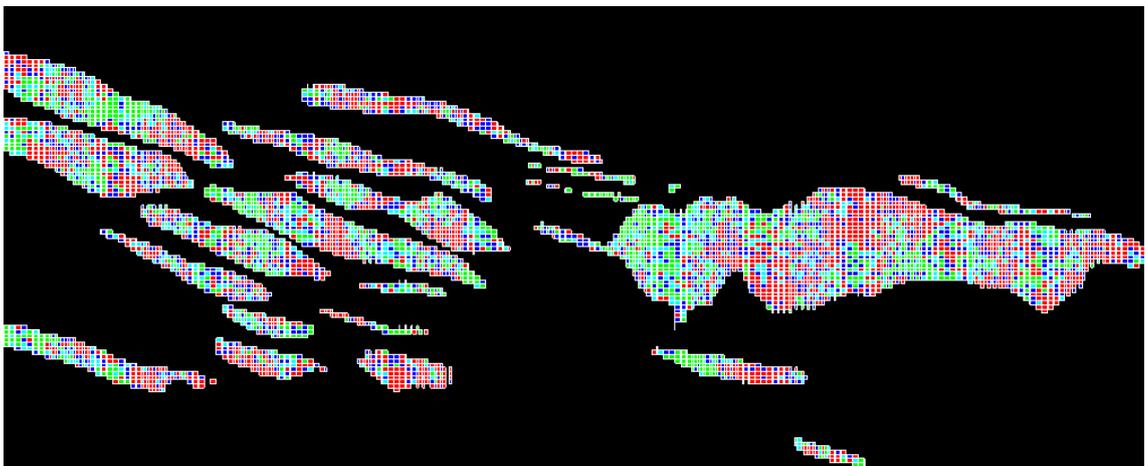


Imagen 37: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable "simulación N°44", zona central de la mineralización.



Imagen 38: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable “simulación N°46”, zona central de la mineralización.

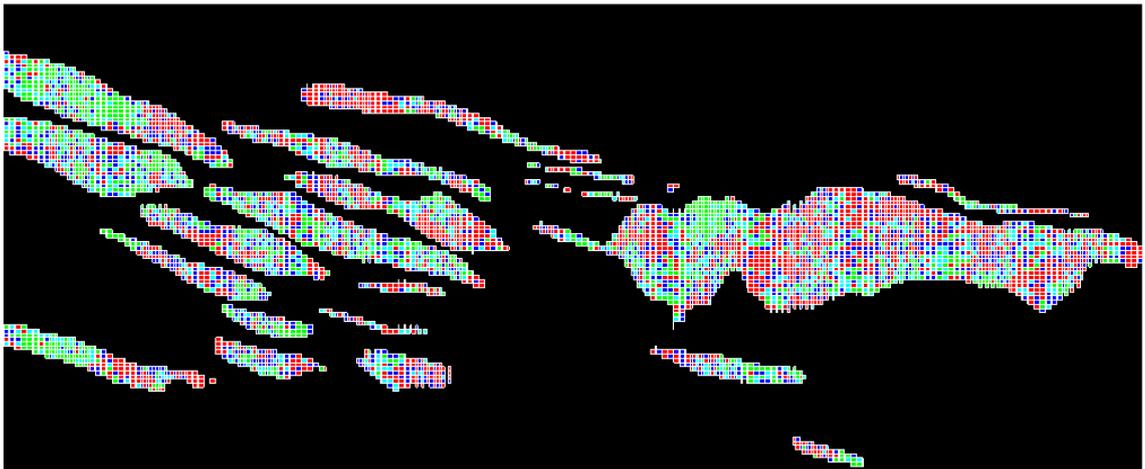


Imagen 39: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable “simulación N°47”, zona central de la mineralización.

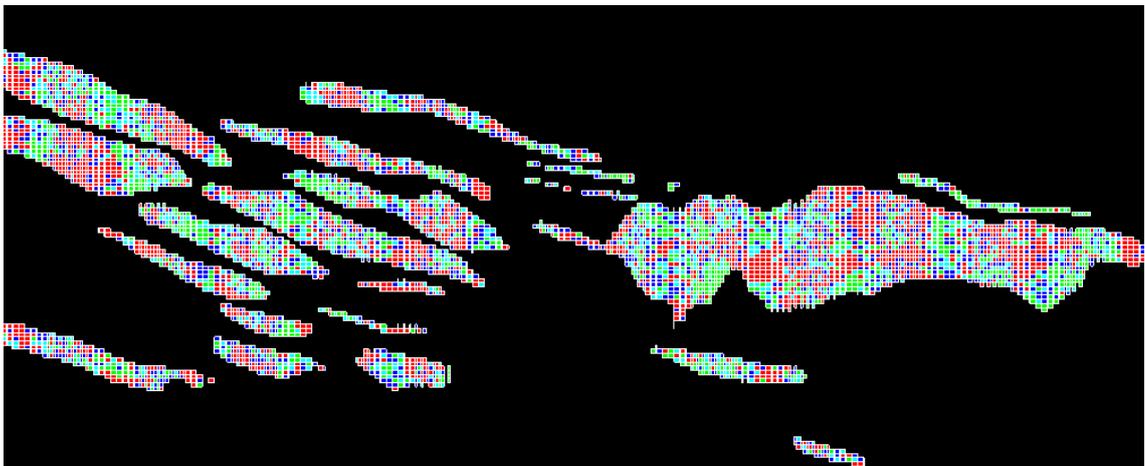


Imagen 40: Corte longitudinal del modelo de bloques, variable “simulación N°48”, zona central de la mineralización.

4.5 Creación de una unidad básica de explotación.

La creación de una cámara de explotación, tiene como única finalidad limitar el análisis de los resultados obtenidos a esta unidad y la determinación de la incertidumbre y confiabilidad de la estimación, debido a la extensión del depósito y la cantidad de resultados obtenidos.

A partir del estudio geomecánico conceptual del proyecto, se diseñó una cámara, considerada para un método de explotación sub level stoping.

Las dimensiones de la cámara obtenidas a través del método de grafico de estabilidad (método de Mathews) son las siguientes: $H=40$, $L=30$ y $W=25$, indicados en la imagen 41.

Se consideró ubicar la cámara en un sector de leyes altas, como se muestra en la imagen 42. Las coordenadas del centro de la unidad son la siguientes: $X=373.853,934$; $Y=7.539.149,336$; $Z=163,053$.

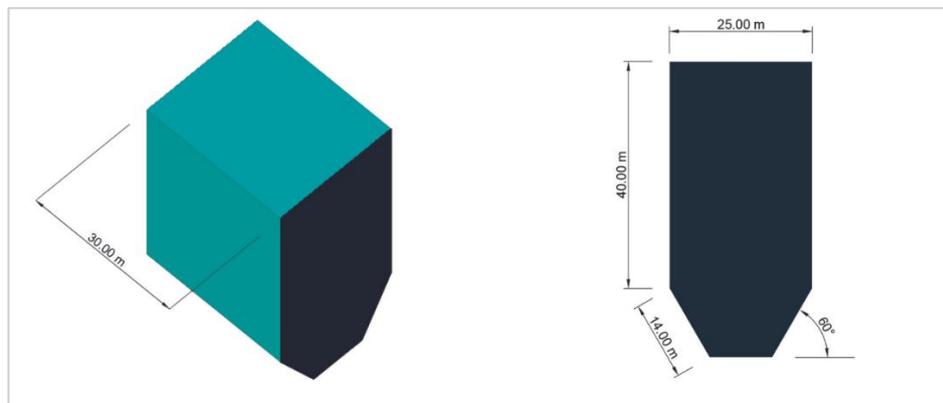


Imagen 41: Unidad básica de explotación.

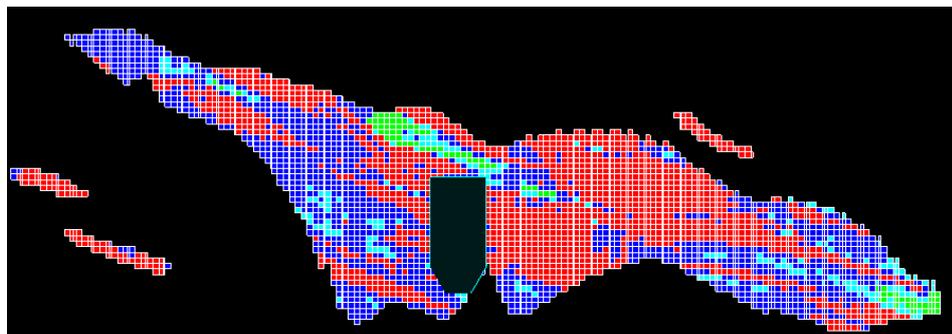


Imagen 42: Ubicación de la unidad básica de explotación.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



4.6 Determinación de la incertidumbre.

4.6.1 Procesamiento de datos.

Una vez validada la simulación, se realizó el análisis de los datos obtenidos, para ello, se exportaron a una planilla Excel los valores de leyes estimados de los bloques por kriging y las leyes obtenidas por las simulaciones, contenidos en la unidad básica de explotación.

El total de bloques contenidos dentro de la cámara es de 2.383, despreciando aquellos cuya ley es menor a 0% el número se redujo a 2.161.

En la tabla 13, se muestra de forma parcial los datos obtenidos luego de realizar la exportación, la misma contiene las coordenadas de cada bloque, y sus respectivas leyes estimadas (cut) y simuladas (sim_1; sim_2;...:sim_50).

xcentre	ycentre	zcentre	cut	sim_1	sim_2	sim_3	sim_4	sim_5	sim_6	sim_7
373849,0798	7539142,062	138,75	0,67315805	0,22000073	1,43878007	0,330001	0,49000064	2,72000051	1,0200001	0,46000054
373851,429	7539142,917	138,75	0,62097901	1,39000001	1,70000041	0,30000073	0,27000085	3,84000015	1,16000021	0,45000079
373848,2247	7539144,411	138,75	0,70700359	0,82000089	0,28000095	1,74000025	0,61000043	0,64000064	1,99785757	0,28000039
373850,574	7539145,266	138,75	0,67854977	0,66000009	1,69000053	1,37000036	0,16000059	0,95000007	0,75000006	0,31000024
373849,7189	7539147,615	138,75	0,79594791	1,38000035	1,08000016	0,79000014	0,06000026	2,64000034	0,48000029	0,31000027
373853,7783	7539143,772	138,75	0,64177454	0,74000072	1,38999999	0,59000051	0,03000065	4,46856308	0,31000039	0,04000026
373852,9232	7539146,121	138,75	0,65520018	3,00000072	0,14976132	0,34000066	0,21668975	1,38345766	0,78000051	0,02000083
373855,2724	7539146,976	138,75	0,56200075	0,47000057	0,05	0,10000064	1,55000079	1,01000094	1,17000055	0,26000074
373852,0682	7539148,47	138,75	0,74986678	0,44000059	0,77999997	0,55000079	0,03000011	0,60000008	2,07000065	0,36000004
373854,4174	7539149,325	138,75	0,53742456	0,88000041	0,21834734	1,39000046	0,23000063	1,34000087	1,22000039	0,16000028
373856,7666	7539150,18	138,75	0,54028964	0,74000078	1,26000035	1,73829222	1,36000049	0,88000017	1,49000072	0,89017808
373848,8639	7539149,964	138,75	1,09968638	0,08000053	1,60714197	0,38000068	1,24000049	0,35472643	0,90000087	0,16000005
373848,0088	7539152,314	138,75	1,25490963	0,33000043	1,67000031	0,34000018	0,22000003	0,50000054	1,98000062	0,82000005
373851,2131	7539150,819	138,75	0,95490068	0,20000003	0,17000099	0,61000079	0,39000061	0,51000082	1,06000054	0,33000004
373853,5623	7539151,674	138,75	0,6088447	0,99000001	0,51000071	2,60000062	0,15000075	1,64000046	2,60000062	0,12000008
373855,9116	7539152,53	138,75	0,33356777	1,35000038	0,50000066	2,41000056	1,24000013	1,06489003	1,68000054	0,12000079
373850,3581	7539153,169	138,75	1,25893152	1,92902243	1,01000071	1,4791621	0,56000096	0,54000092	1,06000006	0,52000004
373852,7073	7539154,024	138,75	0,81182539	0,59000063	0,18000062	1,44000041	0,60000085	0,62000008	0,37191904	0,07000036
373855,0565	7539154,879	138,75	0,47007233	0,22000003	0,22000003	0,22000003	0,22000003	0,22000003	0,22000003	0,22000003
373849,503	7539155,518	138,75	1,25422502	1,46000075	1,46000075	1,46000075	1,46000075	1,46000075	1,46000075	1,46000075
373851,8522	7539156,373	138,75	0,98932689	1,56998897	0,30000079	1,23000005	0,35000083	0,25000051	1,27000082	0,56000036
373854,2015	7539157,228	138,75	0,66343653	0,39000002	0,73000079	0,32000095	1,83000052	0,64000088	0,58000588	1,09000087
373848,648	7539157,867	138,75	1,02705026	0,77000004	0,79000056	0,56000012	3,96000028	2,22000051	3,4272747	0,39000079
373850,9972	7539158,722	138,75	0,88975501	1,06000018	2,00999999	0,30000076	0,19000034	0,35000086	1,61000013	1,88000047
373853,3464	7539159,577	138,75	0,6801849	0,57000017	1,54000092	0,88000011	0,37000093	1,71000016	0,08000043	0,84000009
373850,1421	7539161,071	138,75	0,69138455	0,55000019	0,61000073	0,37000033	0,88000023	1,42000002	0,50000048	0,27000001
373852,4914	7539161,926	138,75	0,6532374	1,04568613	0,38000074	0,62000036	4,17000055	2,23000026	0,69000089	0,39000007
373849,2871	7539163,421	138,75	0,55179518	0,69000041	0,05000028	0,33000001	0,28000012	0,31000081	0,10000001	0,03000025
373848,432	7539165,77	138,75	0,46187493	0,64000058	0,74000067	0,14000049	0,07000028	1,51000059	0,03000055	0,15000094
373849,0798	7539142,062	141,25	0,66502964	0,32000089	1,38000023	1,45000052	0,17000087	0,46000037	0,07000004	0,37000057

Tabla 13: Datos de los bloques contenidos en la cámara.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



$S_i =$ Valor asignado a cada simulación (0 o 1)

$i = 1, 2, \dots, n$

$$\text{Incertidumbre} = 100\% - \text{Probabilidad}$$

En la tabla 15 se muestran algunos de los resultados obtenidos, para cada bloque.

xcentre	ycentre	zcentre	cut	probabilidad	Incertidumbre
373849,0798	7539142,062	138,75	0,67315805	54%	46%
373851,429	7539142,917	138,75	0,62097901	56%	44%
373848,2247	7539144,411	138,75	0,70700359	56%	44%
373850,574	7539145,266	138,75	0,67854977	56%	44%
373849,7189	7539147,615	138,75	0,79594791	54%	46%
373853,7783	7539143,772	138,75	0,64177454	54%	46%
373852,9232	7539146,121	138,75	0,65520018	56%	44%
373855,2724	7539146,976	138,75	0,56200075	58%	42%
373852,0682	7539148,47	138,75	0,74986678	46%	54%
373854,4174	7539149,325	138,75	0,53742456	50%	50%
373856,7666	7539150,18	138,75	0,54028964	64%	36%
373848,8639	7539149,964	138,75	1,09968638	28%	72%
373848,0088	7539152,314	138,75	1,25490963	38%	62%
373851,2131	7539150,819	138,75	0,95490068	38%	62%
373853,5623	7539151,674	138,75	0,6088447	56%	44%
373855,9116	7539152,53	138,75	0,33356777	72%	28%
373850,3581	7539153,169	138,75	1,25893152	36%	64%
373852,7073	7539154,024	138,75	0,81182539	44%	56%
373855,0565	7539154,879	138,75	0,47007233	0%	100%
373849,503	7539155,518	138,75	1,25422502	100%	0%
373851,8522	7539156,373	138,75	0,98932689	42%	58%
373854,2015	7539157,228	138,75	0,66343653	40%	60%
373848,648	7539157,867	138,75	1,02705026	54%	46%
373850,9972	7539158,722	138,75	0,88975501	62%	38%
373853,3464	7539159,577	138,75	0,6801849	56%	44%
373850,1421	7539161,071	138,75	0,69138455	34%	66%
373852,4914	7539161,926	138,75	0,6532374	50%	50%
373849,2871	7539163,421	138,75	0,55179518	44%	56%
373848,432	7539165,77	138,75	0,46187493	38%	62%
373849,0798	7539142,062	141,25	0,66502964	44%	56%
373851,429	7539142,917	141,25	0,69494569	52%	48%
373848,2247	7539144,411	141,25	0,70950431	58%	42%
373850,574	7539145,266	141,25	0,7829439	56%	44%
373847,3697	7539146,76	141,25	0,82127929	54%	46%
373849,7189	7539147,615	141,25	0,88835293	40%	60%
373849,0798	7539142,062	143,75	0,8430199	52%	48%
373851,429	7539142,917	143,75	0,79280102	54%	46%
373845,8755	7539143,556	143,75	0,85197562	44%	56%

Tabla 15: Incertidumbre

4.7 Incertidumbre como un atributo del modelo de bloques.

En el modelo de bloques se creó un nuevo atributo denominado INCERTIDUMBRE, en el cual se importaron los valores de incertidumbre obtenidos en la planilla de cálculos de Excel.

La visualización de los resultados se realizó de igual manera que para las leyes estimadas, simuladas y las categorías, en este caso se realizaron 3 cortes transversales y 3 cortes longitudinales, a través de la cámara de explotación, como se indican en la imagen 43.

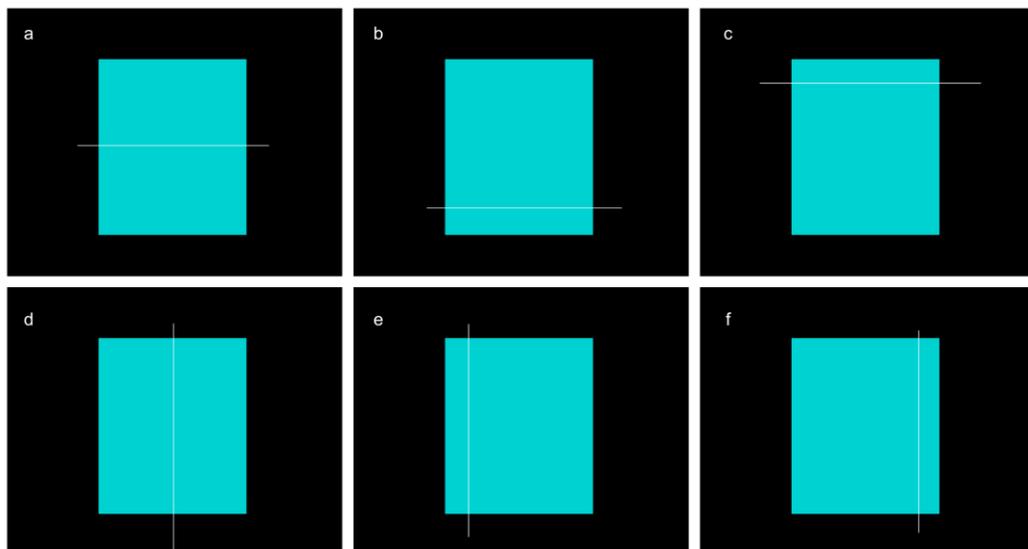


Imagen 43: Vista en planta de la cámara, ubicación de los planos de corte. a) transversal 1, b) transversal 2, c) transversal 3, d) longitudinal 1, e) longitudinal 2, f) longitudinal 3.

En las siguientes imágenes se muestran el modelo de bloques limitado a la cámara de explotación y para cada corte, se representan las vistas, considerando como variable el cobre total, la incertidumbre y las leyes obtenidas de algunas de las simulaciones.

Referencias:

	75,00 % ≤ Incertidumbre < 100,00 %		0,00 % ≤ CUT < 0,25 %
	50,00 % ≤ Incertidumbre < 75,00 %		0,25 % ≤ CUT < 0,50 %
	25,00 % ≤ Incertidumbre < 50,00 %		0,50 % ≤ CUT < 1,00 %
	0,00 % ≤ Incertidumbre < 25,00 %		1,00 % ≤ CUT < 20,00 %

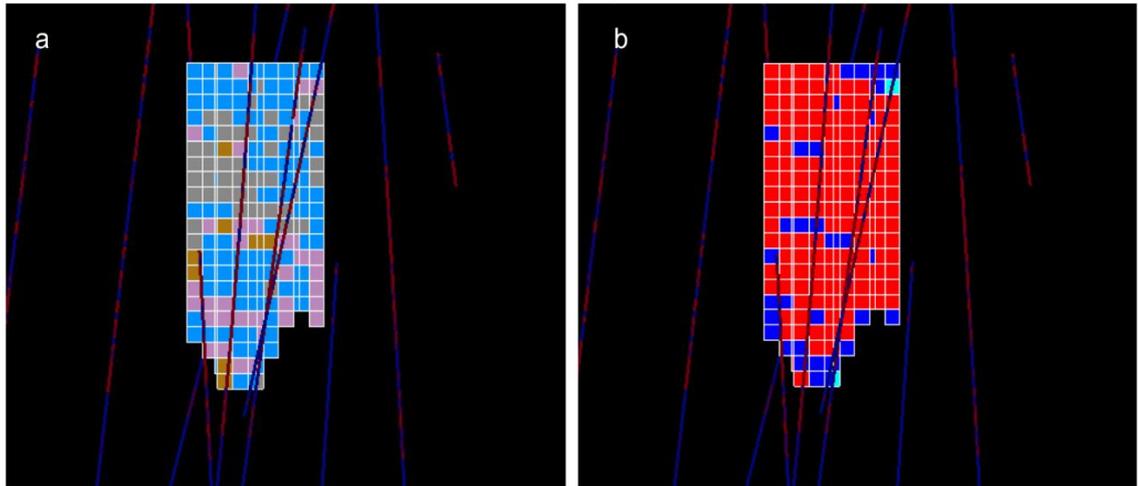


Imagen 44: Corte transversal 1 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable “incertidumbre”, b) variable “cobre”.

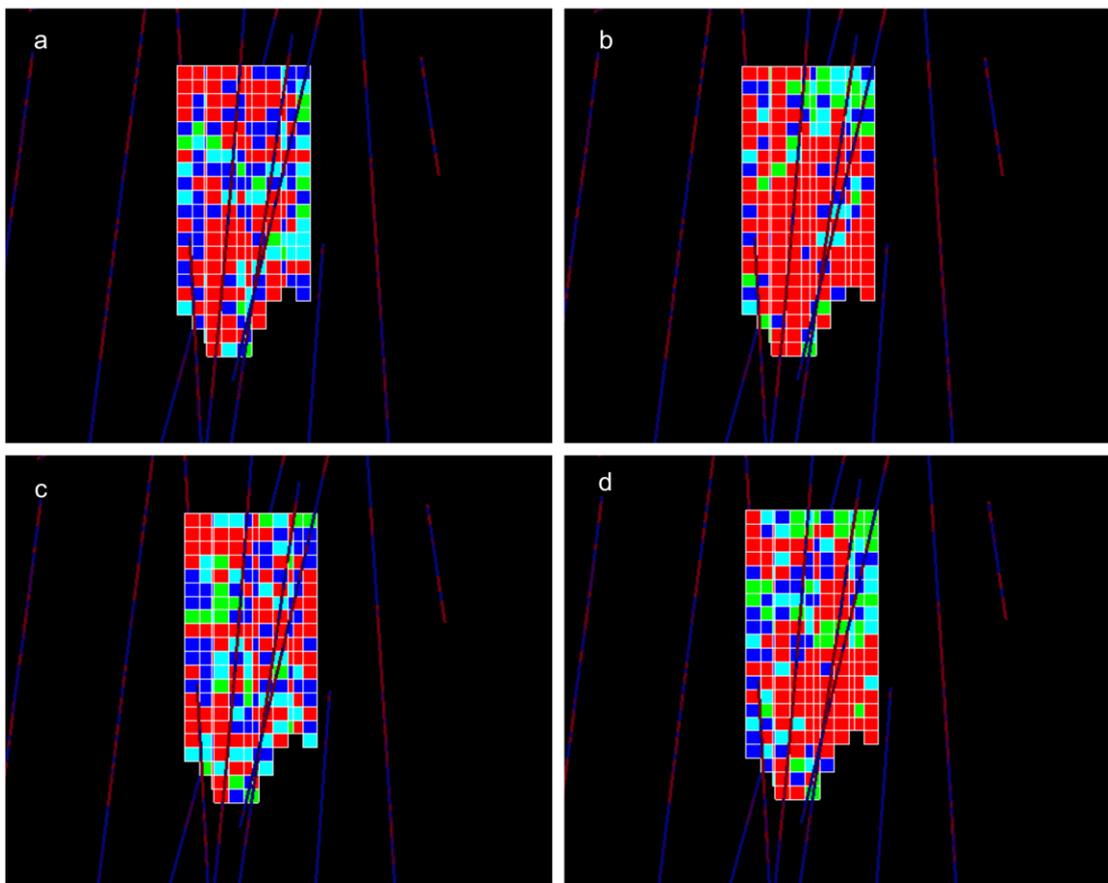


Imagen 45: Corte transversal 1 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable “simulación N° 2”, b) variable “simulación N° 25”, c) variable “simulación N° 32”, d) variable “simulación N° 48”.

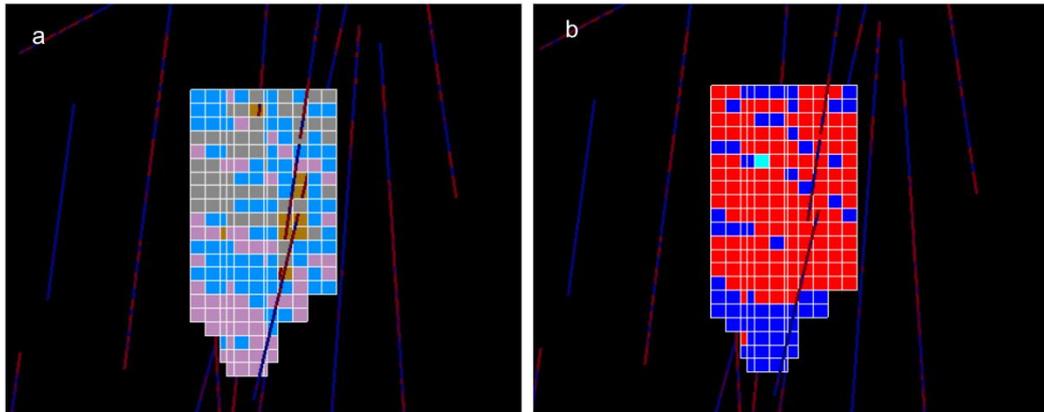


Imagen 46: Corte transversal 2 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable "incertidumbre", b) variable "cobre".

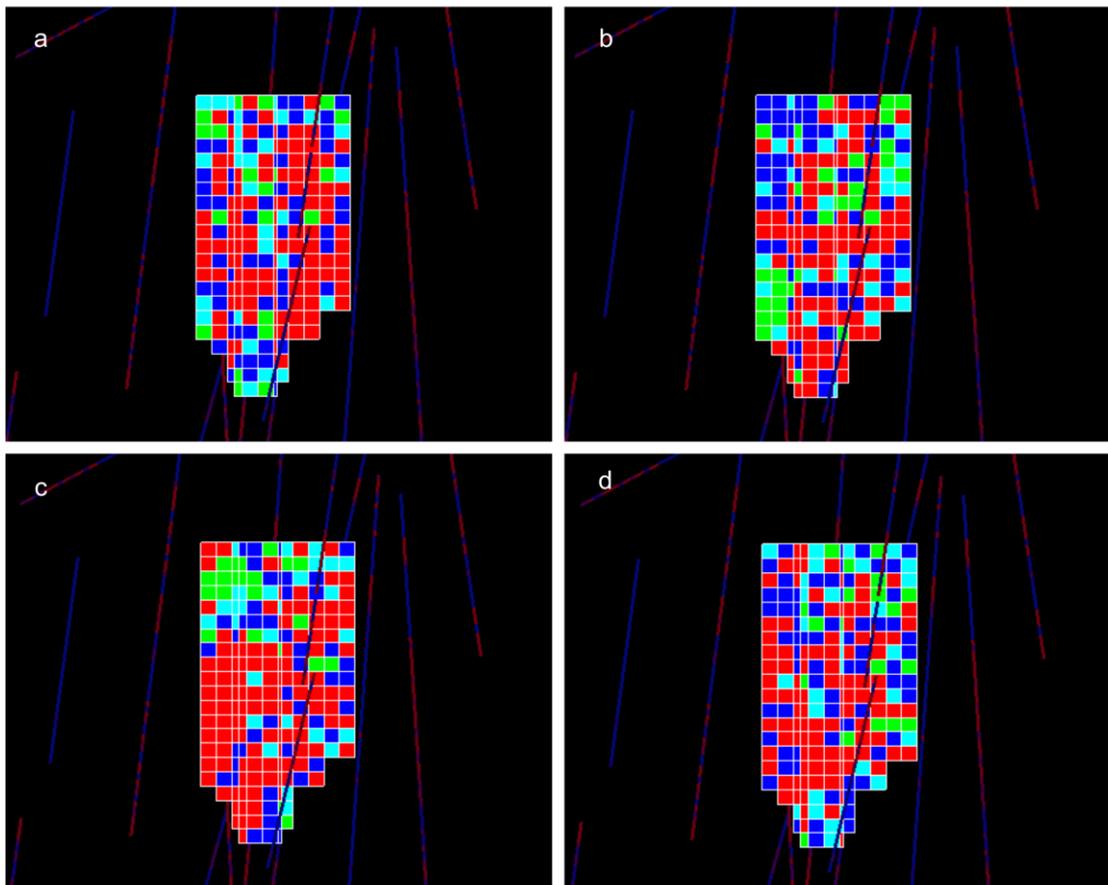


Imagen 47: Corte transversal 2 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable "simulación N° 9", b) variable "simulación N° 15", c) variable "simulación N° 23", d) variable "simulación N° 41".

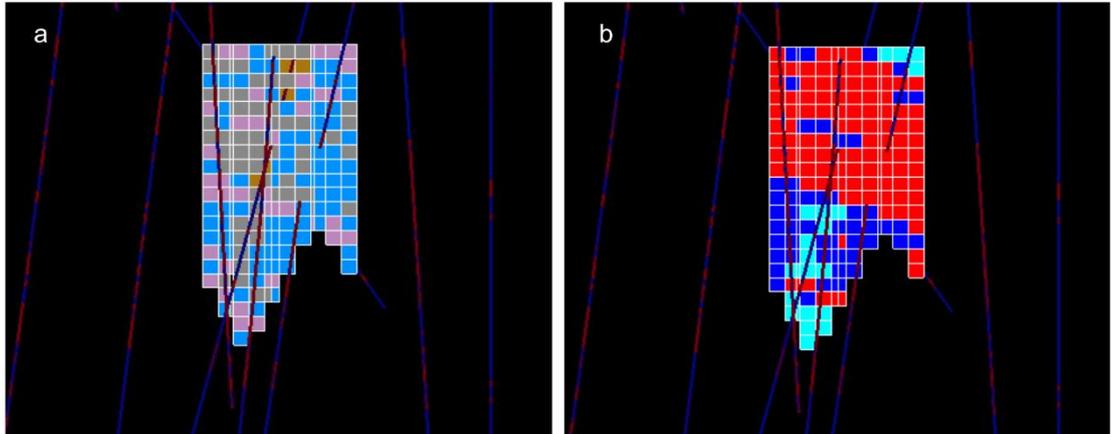


Imagen 48: Corte transversal 3 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable "incertidumbre", b) variable "cobre".

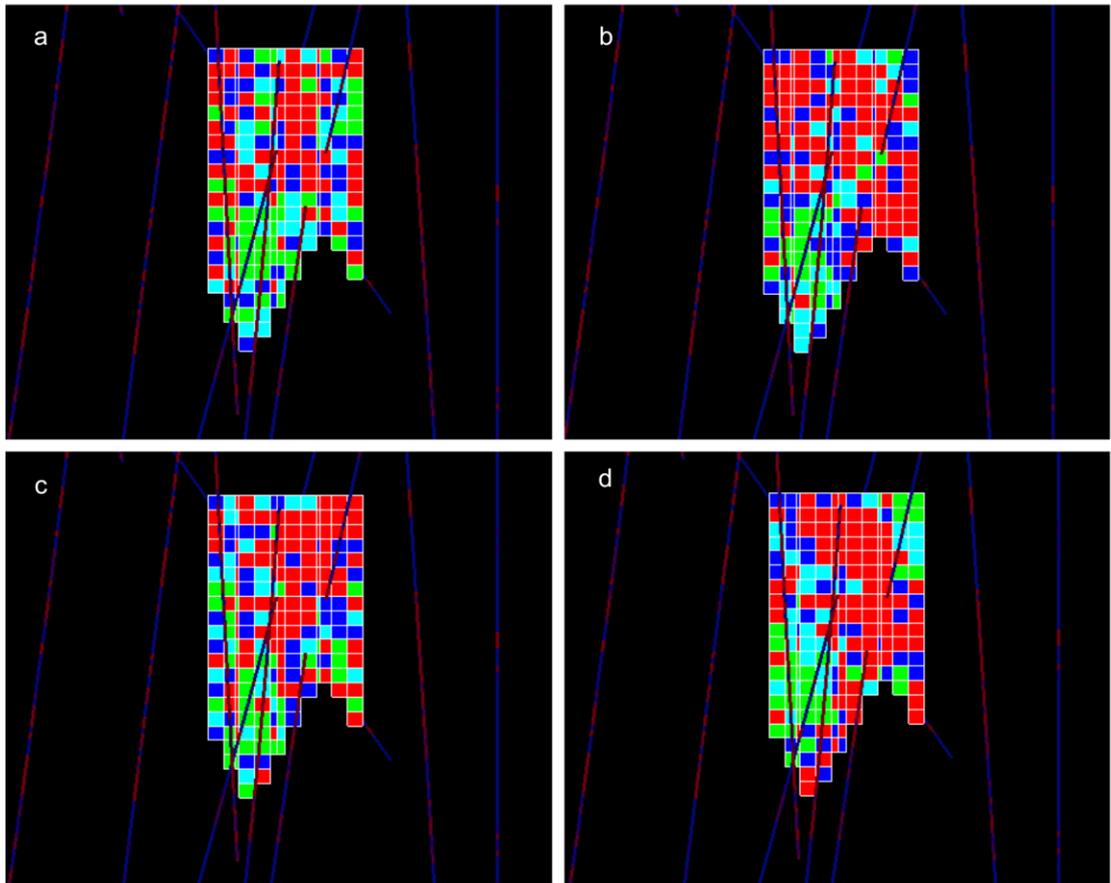


Imagen 49: Corte transversal 3 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable "simulación N° 1", b) variable "simulación N° 20", c) variable "simulación N° 39", d) variable "simulación N° 44".

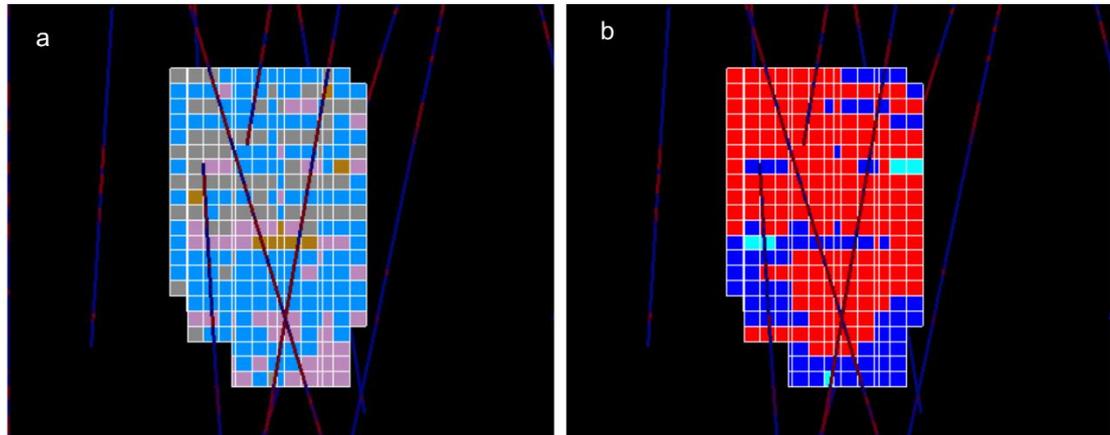


Imagen 50: Corte longitudinal 1 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable "incertidumbre", b) variable "cobre".

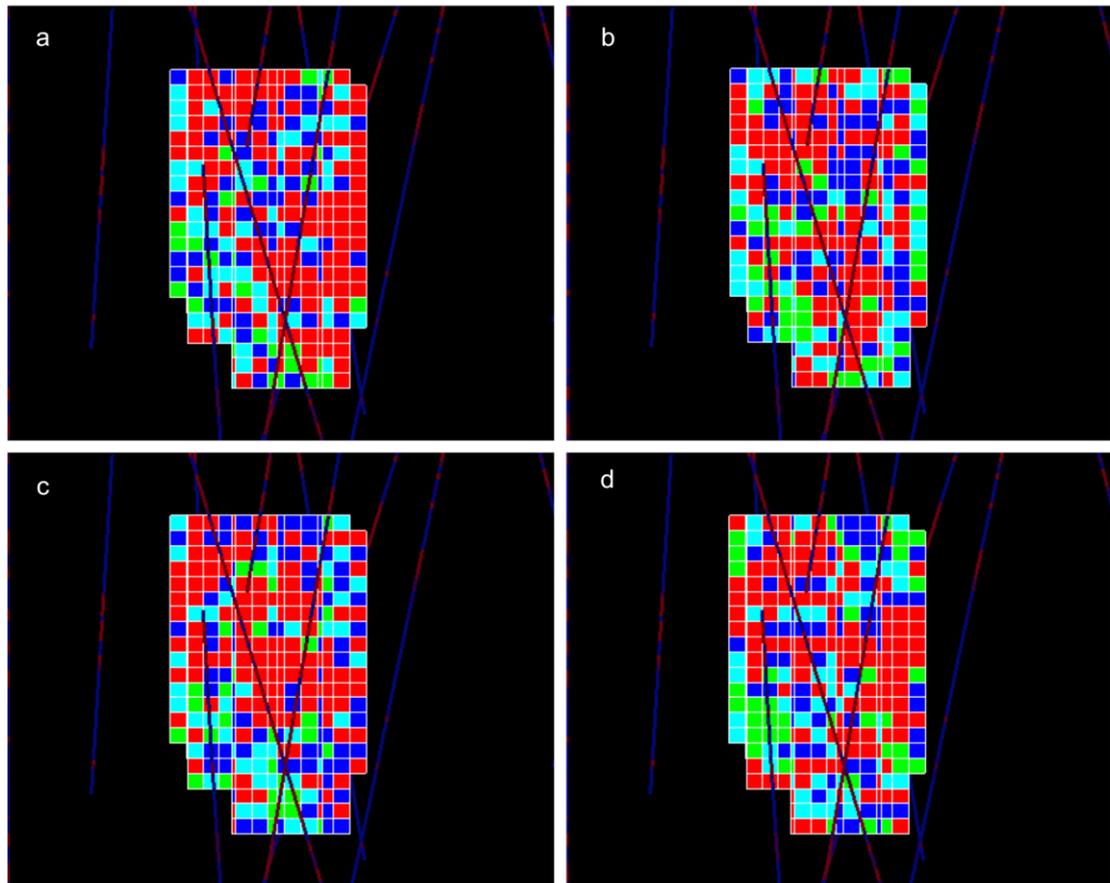


Imagen 51: Corte longitudinal 1 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable "simulación N° 2", b) variable "simulación N° 11", c) variable "simulación N° 30", d) variable "simulación N° 47".

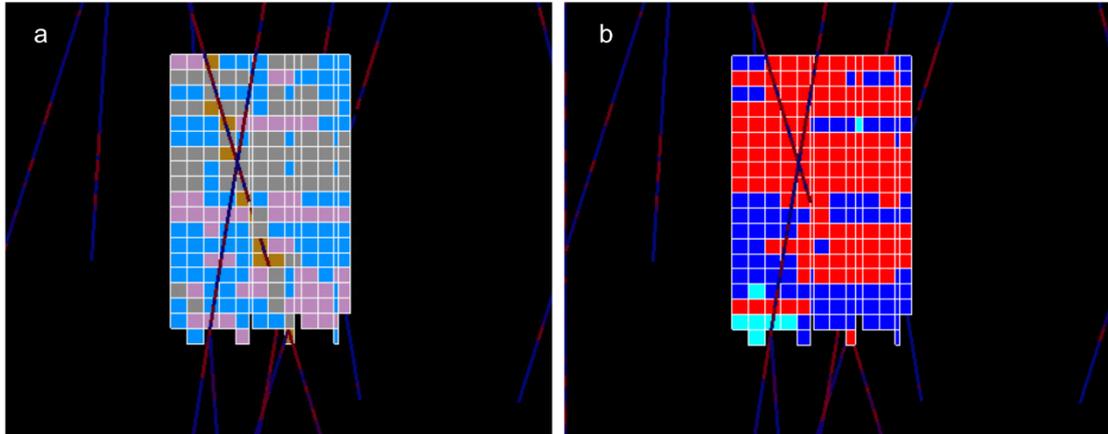


Imagen 52: Corte longitudinal 2 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable "incertidumbre", b) variable "cobre".

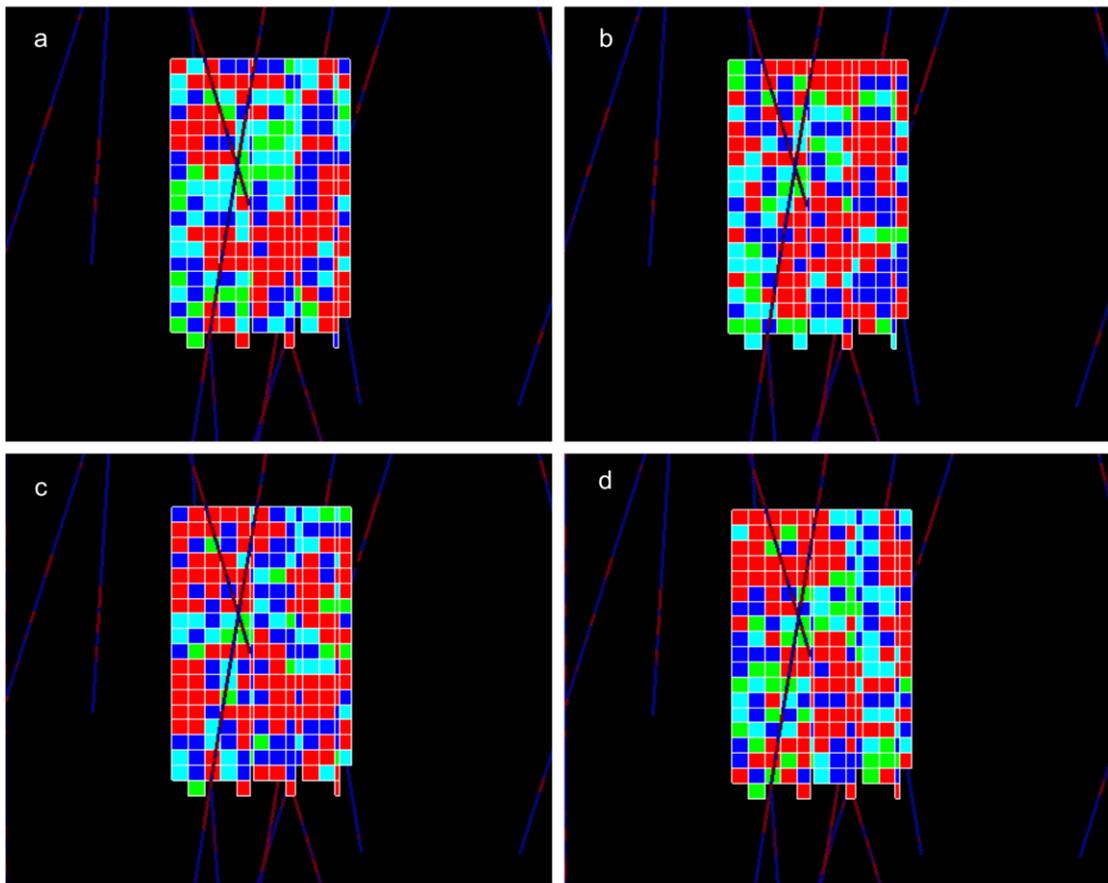


Imagen 53: Corte longitudinal 2 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable "simulación N° 3", b) variable "simulación N° 17", c) variable "simulación N° 35", d) variable "simulación N° 47".

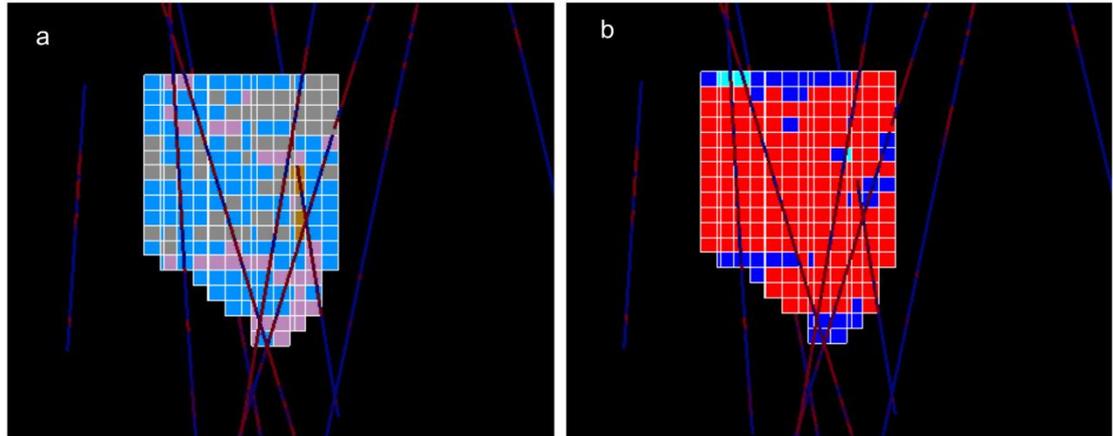


Imagen 54: Corte longitudinal 3 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable "incertidumbre", b) variable "cobre".

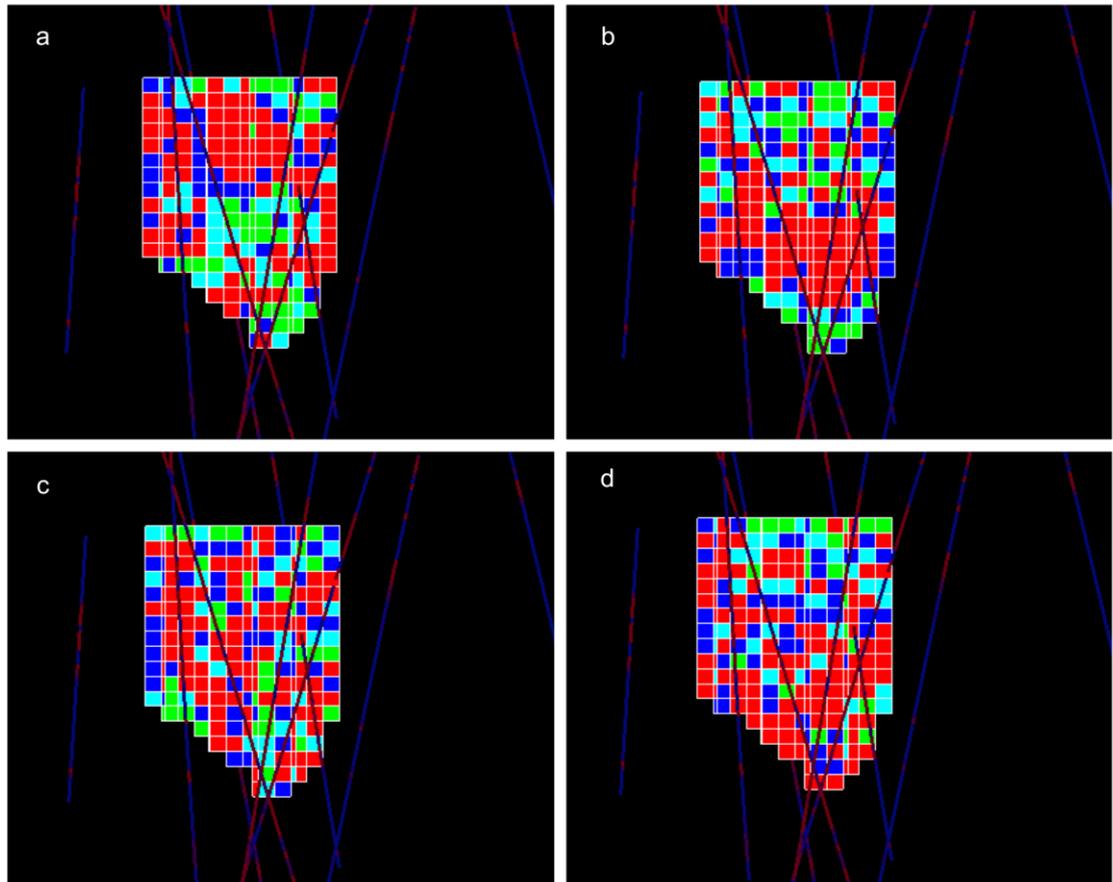


Imagen 55: Corte longitudinal 3 de los bloques contenidos dentro de la cámara. a) variable "simulación N° 7", b) variable "simulación N° 14", c) variable "simulación N° 28", d) variable "simulación N° 50".



CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

5.1 Compósitos de muestras.

5.1.1 Análisis estadístico.

En el histograma obtenido (figura 31, pág. 54) se observa que se trata de una distribución de leyes del tipo lognormal, con una acumulación de valores bajos, que representa una distribución muy común en este tipo de yacimientos.

El gráfico de caja (figura 32, pág. 55) muestra la presencia de valores atípicos a partir de leyes mayores a 4%.

5.1.2 Análisis geoestadístico.

En la figura 34, pag. 58, se observa la presencia del efecto pepita o nugget, esto se debe a que existen micro variaciones a muy poca distancia o a errores de medición en la variable.

El mayor alcance (25,14 m) se presenta en la dirección del eje mayor del elipsoide, esto indica que existe mayor continuidad espacial en esa dirección, como se puede observar en las imágenes 11 y 12, pág. 55 y 56.

Se observa que hay una anisotropía geométrica debido a que los variogramas realizados en diferentes direcciones presentan la misma meseta, pero distintos alcances ($\text{meseta}_1 = \text{meseta}_2 = \text{meseta}_3 = 1,32$).

La meseta (1,32) y la varianza estadística (1,26) presentan valores muy cercanos, difieren únicamente en 0,06. Teóricamente estos deberían ser iguales, pero no se cumple siempre debido a que ambos valores se obtienen estimándolos, es decir, no se conocen los valores reales, pero si una aproximación de estos.

5.2 Valores estimados.

5.2.1 Leyes estimadas mediante kriging.

En la siguiente figura se puede observar el histograma de la base de datos de los compósitos (a) y el histograma de las leyes estimadas de los bloques (b).

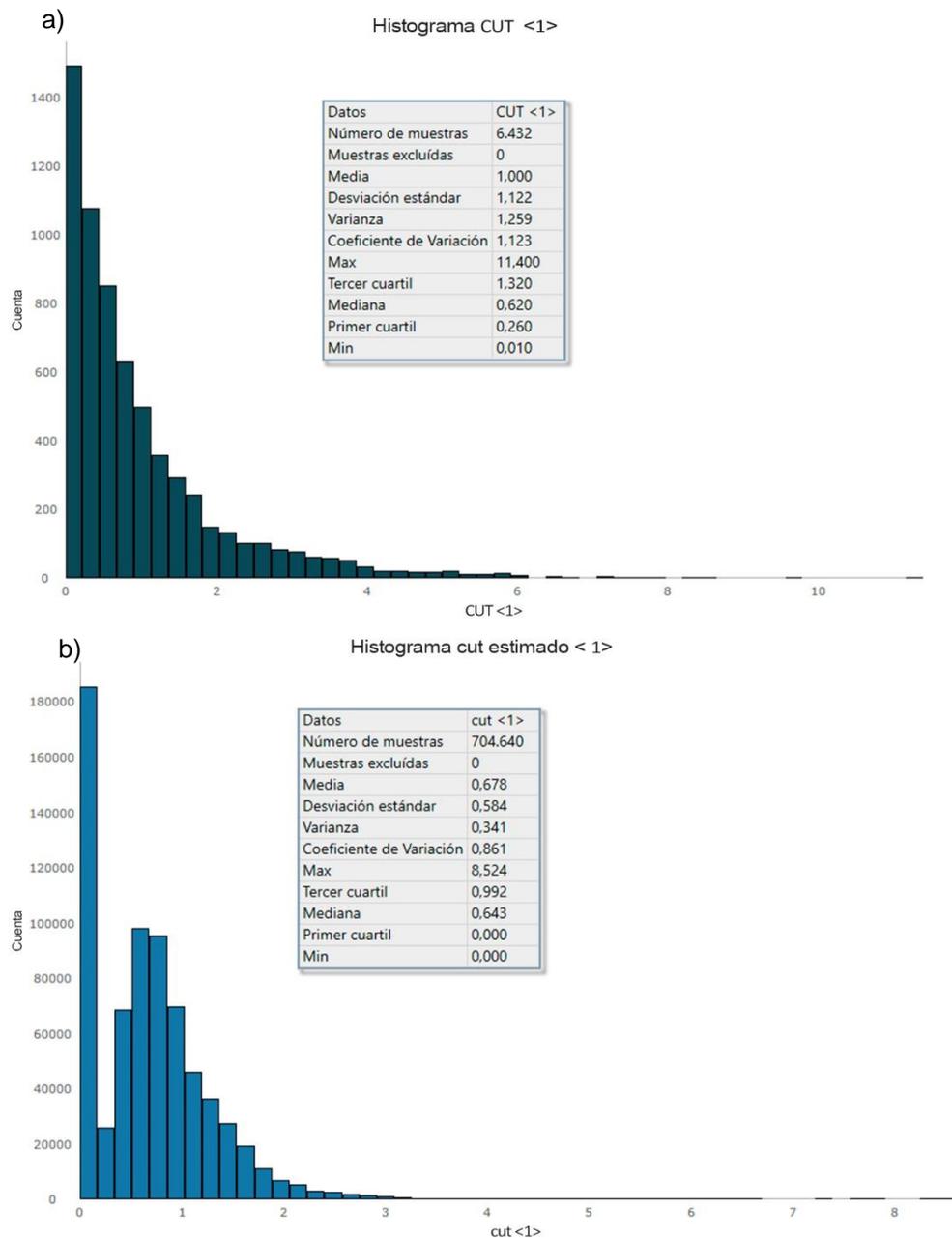


Figura 41: Comparación entre el histograma de la base de datos de los compósitos (a) y el histograma de las leyes estimadas de los bloques (b).



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Realizado la comparación entre ambos se determina:

- Las distribuciones son diferentes.
- La ley media de los compósitos es 1,00, mientras que la ley media de las leyes estimadas en los bloques es igual a 0,678, puesto que el proceso de krigeado genera un efecto de alisado de los valores.
- La varianza pasó de 1,259 a 0,341, se minimizó considerablemente, debido a que este es uno de los propósitos de la estimación mediante kriging.
- El valor máximo de la distribución se redujo de 11,4 a 8,52 ya que una de las consideraciones al momento de realizar la estimación fue que los valores que se encontraran por encima del umbral (denominación del software) tuvieran una menor influencia, con el fin de evitar sobreestimaciones.

5.2.2 Categorización de los recursos.

De acuerdo a la categorización de recursos realizada en el capítulo anterior, ítem 4.3.2, se procedió con el cálculo del porcentaje de bloques correspondientes a cada categoría, como se puede observar en la figura 42.

El 29% de los bloques corresponden a recursos medidos, el 51% a recursos indicados y el 20% a recursos inferidos.

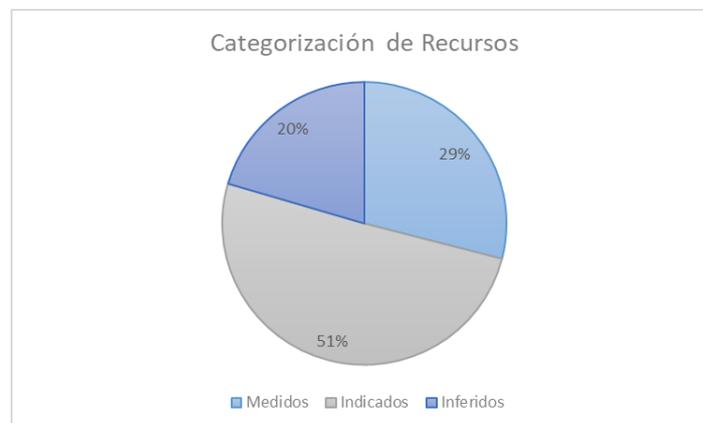


Figura 42: Gráfico del porcentaje de recursos correspondiente a cada categoría.



5.3 Valores transformados.

La transformación de los datos a una distribución normal se realizó correctamente, esto se puede verificar visualmente mediante el histograma (figura 36, pág. 67) y considerando los parámetros estadísticos de la distribución, media igual a 0 y varianza igual a 1, características propias de una distribución normal estandarizada.

5.3.1 Modelo variográfico de los datos transformados.

Los parámetros descriptivos de los variogramas de los datos originales y de los datos transformados muestran valores muy similares, como se muestra en la siguiente tabla.

Parámetros descriptivos	Datos originales			Datos transformados		
	Dirección			Dirección		
	Eje mayor	Semi eje	Eje menor	Eje mayor	Semi eje	Eje menor
Efecto pepita	0,46	0,46	0,46	0,42	0,42	0,42
Meseta	1,32	1,32	1,32	1,12	1,12	1,12
Varianza espacial	0,86	0,86	0,86	0,7	0,7	0,7
Alcance	25,14	23,99	13,94	25,66	23,94	16,25

Tabla 16: parámetros descriptivos de los diferentes variogramas.

En el variograma de los datos transformados, se observa que hay una anisotropía geométrica ($meseta_1=meseta_2=meseta_3= 1,12$), al igual que en el caso de los variogramas de los compósitos.

5.4 Comparación entre el histograma de los compósitos y los histogramas de las simulaciones.

Al observar el histograma de los datos de los compósitos (figura 31, pág. 54) y los histogramas de la de las figuras 39 y 40 (pág. 71 y pág. 72), las cuales



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



muestran los histogramas de 16 simulaciones, se verifica visualmente que estas reproducen el comportamiento de la variable original. Esto se puede comprobar también, analizando la similitud que existe entre los parámetros estadísticos del conjunto de los datos originales y de las 50 realizaciones, como se indica en la (tabla 17).

	Número de muestras	Media	Desviación estándar	Varianza	Coficiente de variación	Valor máximo	Tercer cuartil	Mediana	Primer cuartil	Valor mínimo
Cut	6.432	1,000	1,122	1,259	1,123	11,400	1,320	0,620	0,260	0,010
Sim 1	525.695	1,016	1,151	1,324	1,133	11,400	1,338	0,620	0,260	0,010
Sim 2	525.695	0,968	1,089	1,186	1,124	11,400	1,280	0,600	0,250	0,010
Sim 3	525.695	0,995	1,113	1,238	1,118	11,400	1,310	0,620	0,260	0,010
Sim 4	525.695	1,029	1,143	1,307	1,111	11,400	1,360	0,640	0,270	0,010
Sim 5	525.695	1,010	1,127	1,271	1,117	11,400	1,330	0,630	0,270	0,010
Sim 6	525.695	1,002	1,136	1,290	1,133	11,400	1,320	0,620	0,260	0,010
Sim 7	525.695	1,012	1,132	1,282	1,119	11,400	1,330	0,630	0,270	0,010
Sim 8	525.695	0,982	1,112	1,237	1,132	11,400	1,290	0,600	0,250	0,010
Sim 9	525.695	0,979	1,117	1,248	1,141	11,400	1,290	0,600	0,240	0,010
Sim 10	525.695	1,011	1,140	1,300	1,128	11,400	1,330	0,620	0,260	0,010
Sim 11	525.695	1,014	1,134	1,286	1,118	11,400	1,340	0,630	0,270	0,010
Sim 12	525.695	1,036	1,172	1,375	1,131	11,400	1,360	0,640	0,270	0,010
Sim 13	525.695	1,000	1,130	1,278	1,130	11,400	1,320	0,610	0,250	0,010
Sim 14	525.695	1,017	1,147	1,315	1,128	11,400	1,340	0,630	0,260	0,010
Sim 15	525.695	1,015	1,147	1,315	1,130	11,400	1,331	0,620	0,260	0,010
Sim 16	525.695	1,013	1,144	1,308	1,129	11,400	1,330	0,620	0,260	0,010
Sim 17	525.695	1,019	1,144	1,308	1,123	11,400	1,340	0,630	0,260	0,010
Sim 18	525.695	1,019	1,140	1,300	1,119	11,400	1,340	0,638	0,270	0,010
Sim 19	525.695	1,006	1,143	1,307	1,137	11,400	1,320	0,617	0,250	0,010
Sim 20	525.695	0,993	1,115	1,244	1,123	11,400	1,310	0,610	0,260	0,010
Sim 21	525.695	1,054	1,182	1,397	1,121	11,400	1,380	0,660	0,280	0,010
Sim 22	525.695	1,001	1,135	1,287	1,133	11,400	1,310	0,620	0,260	0,010
Sim 23	525.695	0,979	1,105	1,222	1,129	11,400	1,290	0,600	0,250	0,010
Sim 24	525.695	1,012	1,131	1,280	1,119	11,400	1,330	0,630	0,261	0,010
Sim 25	525.695	1,017	1,144	1,309	1,125	11,400	1,340	0,630	0,260	0,010
Sim 26	525.695	0,999	1,154	1,331	1,154	11,400	1,310	0,600	0,240	0,010
Sim 27	525.695	0,976	1,110	1,233	1,138	11,400	1,280	0,600	0,240	0,010
Sim 28	525.695	1,013	1,145	1,311	1,130	11,400	1,330	0,620	0,260	0,010
Sim 29	525.695	1,019	1,146	1,313	1,125	11,400	1,340	0,630	0,260	0,010
Sim 30	525.695	1,043	1,174	1,378	1,125	11,400	1,360	0,650	0,270	0,010
Sim 31	525.695	1,019	1,128	1,273	1,108	11,400	1,350	0,640	0,270	0,010
Sim 32	525.695	1,005	1,132	1,281	1,127	11,400	1,323	0,620	0,260	0,010
Sim 33	525.695	1,029	1,151	1,324	1,118	11,400	1,358	0,640	0,270	0,010
Sim 34	525.695	1,002	1,144	1,309	1,142	11,400	1,310	0,610	0,250	0,010
Sim 35	525.695	0,989	1,105	1,221	1,117	11,400	1,310	0,620	0,260	0,010
Sim 36	525.695	1,003	1,126	1,267	1,123	11,400	1,320	0,620	0,260	0,010
Sim 37	525.695	1,016	1,141	1,301	1,123	11,400	1,340	0,630	0,260	0,010
Sim 38	525.695	1,002	1,136	1,290	1,133	11,400	1,320	0,610	0,250	0,010
Sim 39	525.695	1,030	1,146	1,312	1,112	11,400	1,350	0,650	0,280	0,010
Sim 40	525.695	1,033	1,164	1,354	1,127	11,400	1,359	0,640	0,270	0,010
Sim 41	525.695	1,022	1,149	1,321	1,124	11,400	1,340	0,635	0,270	0,010
Sim 42	525.695	1,075	1,191	1,418	1,107	11,400	1,400	0,680	0,290	0,010
Sim 43	525.695	1,010	1,147	1,315	1,135	11,400	1,330	0,620	0,260	0,010
Sim 44	525.695	1,017	1,139	1,296	1,120	11,400	1,340	0,630	0,270	0,010
Sim 45	525.695	1,029	1,148	1,316	1,116	11,400	1,360	0,640	0,270	0,010
Sim 46	525.695	1,043	1,168	1,363	1,120	11,400	1,370	0,650	0,280	0,010
Sim 47	525.695	1,028	1,139	1,297	1,108	11,400	1,353	0,650	0,280	0,010
Sim 48	525.695	1,040	1,156	1,336	1,111	11,400	1,370	0,654	0,280	0,100
Sim 49	525.695	0,981	1,118	1,249	1,139	11,400	1,290	0,600	0,250	0,100
Sim 50	525.695	1,006	1,125	1,265	1,117	11,400	1,320	0,630	0,270	0,010

Tabla 17: Parámetros estadísticos de la base de datos y de doce simulaciones condicionales.

5.5 Comparación entre las leyes estimadas y simuladas.

En las imágenes 14 y 15 (pág. 61 y 62) del modelo de bloques considerando como variable la ley de cobre estimada se puede apreciar el efecto de alisado que produce el kriging. Mientras que en las imágenes 25 a 40 (pág. 73 a 78) correspondientes a algunas de las simulaciones realizadas, se observa que respetan la variabilidad y el histograma, ya que las zonas de baja ley son más que las zonas de alta ley. Se observa también la presencia de un efecto pepita que el kriging no puede reflejar.

En la siguiente imagen se puede visualizar lo analizado anteriormente.

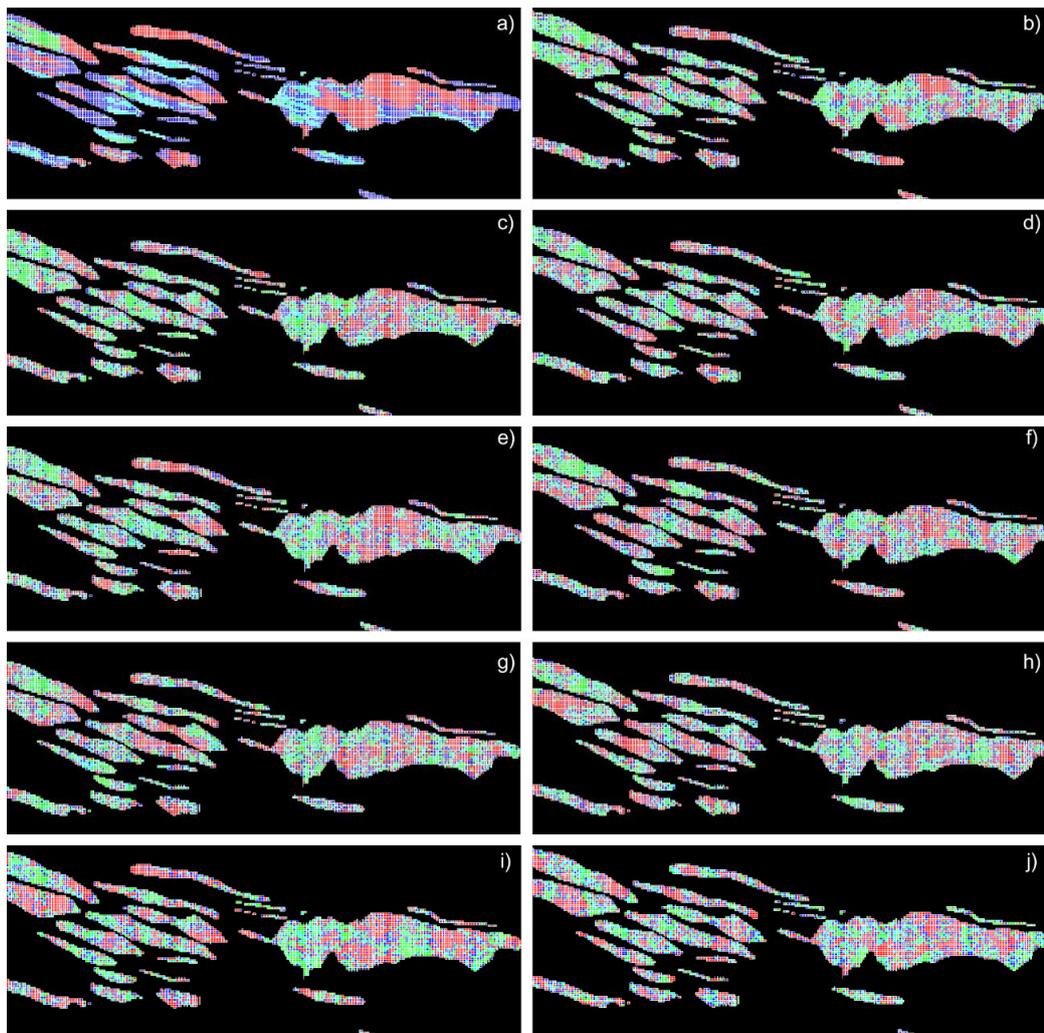


Imagen 56: Comparación entre el modelo de bloques de las leyes estimadas (a) y el modelo de bloques de algunas simulaciones: b) simulación 2, c) simulación 9, d) simulación 14, e) simulación 26, f) simulación 33, g) simulación 35, h) simulación 42, i) simulación 46 y j) simulación 48.



5.6 Incertidumbre.

5.6.1 Análisis estadístico.

La tabla 17 representa la distribución de frecuencia de los resultados obtenidos de incertidumbre y la figura 43 el histograma correspondiente. A partir de estos, se determina:

- Los valores presentan un valor medio de 63,39%.
- El 23,8% de los bloques contenidos en la cámara de explotación, presentan una incertidumbre menor a 50%.
- En el 16,9% de los bloques la incertidumbre es mayor a 80%.

N° Clase	Clase (%)		Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa(%)	Frecuencia abs. acumulada	Frecuencia relat. acumulada (%)
	Lim. inf.	Lim. sup.				
1	0	10	45	2,1	45	2,1
2	10	20	9	0,4	54	2,5
3	20	30	36	1,7	90	4,2
4	30	40	120	5,6	210	9,7
5	40	50	305	14,1	515	23,8
6	50	60	411	19,0	926	42,9
7	60	70	443	20,5	1369	63,4
8	70	80	426	19,7	1795	83,1
9	80	90	232	10,7	2027	93,8
10	90	100	134	6,2	2161	100,0

Tabla 17: Distribución de frecuencia de los valores de incertidumbre.

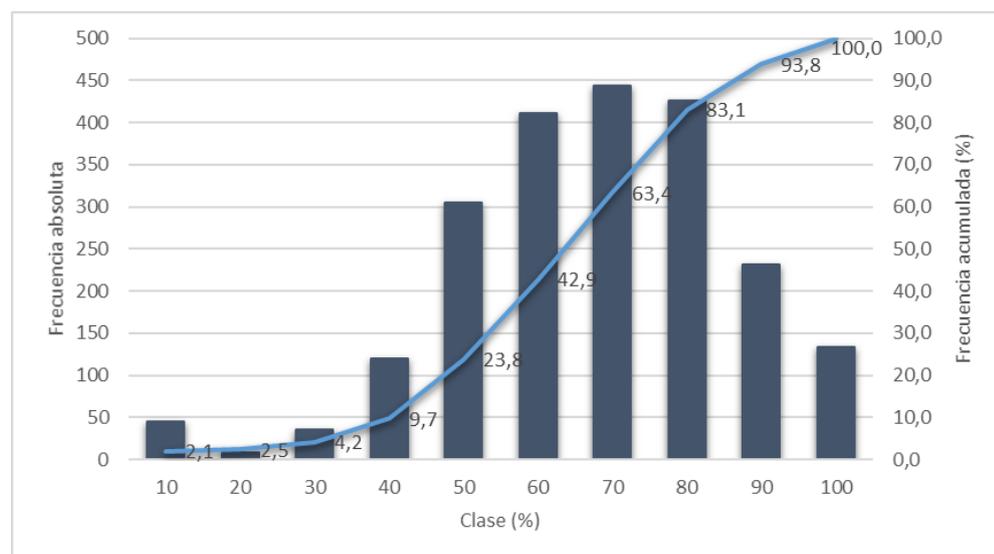


Figura 43: Histograma de los valores de incertidumbre.



5.6.2 Mapa de incertidumbre.

A continuación, se realiza un análisis de los mapas de incertidumbre resultantes (ítem 4.7), esto permite alertar sobre aquellos sectores en los que la incertidumbre es alta.

- Imagen 44 (pág. 84): La mayoría de los bloques corresponden a leyes altas (>1%). En la zona superior la incertidumbre es alta (50%-100%), se observa que únicamente un bloque muestra un valor bajo (0%-25%). La zona inferior muestra mayor variabilidad en los valores (25%-75%) y 5 bloques corresponden a una incertidumbre baja.
- Imagen 46 (pág. 85): La mayoría de los bloques correspondientes a la zona central y superior presentan leyes altas (>1%), en la zona superior la incertidumbre es alta. En la zona central se podría considerar una incertidumbre media. Mientras que la zona inferior presenta baja incertidumbre para leyes que se encuentran entre un 0,5 % - 1%.
- Imagen 48 (pág. 86): En la zona central y superior, la mayoría de los bloques presentan leyes altas (>1%) y una incertidumbre de media a alta. La zona inferior izquierda cuenta con leyes medias y una incertidumbre media.
- Imagen 50 (pág. 87): Se observa que la mayoría de los bloques de la zona superior presentan leyes altas y una incertidumbre de media a alta. La zona inferior cuenta con leyes medias y altas con una incertidumbre media a baja.
- Imagen 52 (pág. 88): En la zona superior la mayoría de los bloques presentan leyes altas y una incertidumbre de media a alta. La zona inferior derecha presenta leyes altas y la izquierda leyes medias, con una incertidumbre variable.
- Imagen 54 (pág. 89): La mayoría de los bloques presentan leyes altas. En la zona superior se observa una incertidumbre media a alta, mientras que en la zona inferior es media a baja.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



5.7 Conclusiones y recomendaciones.

Las simulaciones realizadas muestran las mismas propiedades estadísticas que las de los datos, es decir son estadísticamente equivalentes. Esto permite poder utilizar la información entregada por las realizaciones como una herramienta para cuantificar la incertidumbre asociada a la estimación, además también se puede visualizar esta incertidumbre en el modelo de bloques.

El análisis de la incertidumbre a partir de las simulaciones, determina que el riesgo de obtener las leyes que fueron estimadas, dentro de la cámara de explotación, es alto. Ya que a los yacimientos del tipo estratos ligados, lo mínimo que se les exige es una incertidumbre menor al 50%, en este caso solo el 23,8% de los bloques cumple con esa condición.

Lo indicado anteriormente, sumado a que solo el 29% de los bloques corresponde a la categoría de recurso medido, permite establecer que es necesario efectuar futuras campañas de sondajes.

En cuanto a la determinación de los sectores de mayor riesgo, dentro de la unidad básica de explotación, en todos los casos analizados, es en la zona superior de la cámara donde se observan valores altos de incertidumbre. En estos sectores se deberá priorizar la densificación de la malla de perforación.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Bibliografía consultada y citada

- 1- Dr. Alfaro Sironvalle, M. A. (1991). Geoestadística práctica. Santiago.
- 2- Dr. Alfaro Sironvalle, M. A. (2000). Estadística. Santiago.
- 3- Dr. Alfaro Sironvalle, M. A. (2008). La Simulación Condicional en un Depósito Minero. Santiago.
- 4- Dra. Lazarte, I. (2020). Apuntes de Cátedra Probabilidad y Estadística. Universidad Nacional de Catamarca. San Fernando del Valle de Catamarca.
- 5- Ing. Martínez, R. (2020). Apuntes de Cátedra Planificación de Minas. Universidad Nacional de Catamarca. San Fernando del Valle de Catamarca.
- 6- Nube Minera. (s.f.). Nube Minera, plataforma de aprendizaje en línea. Obtenido de <https://nubeminera.cl>
- 7- SRK Consulting, Engineers and Scientists. (2010). Estudio Geomecánico Conceptual. Santiago.
- 8- Vllivallo, W., & Henríquez, F. (1998). Génesis común de los yacimientos estratoligaod y vetiformes de cobre del jurásico medio a superior en la Cordillera de La Costa, Región de Antofagasta, Chile. Revista geológica de Chile v.25 n.2.
- 9- Riquelme Caterina I. C. (2020) Estimación de oro y análisis de incertidumbre mediante simulación gaussiana, Veta Pedro Valencia sur, Alhue, Chile. Universidad de Concepción. Concepción
- 10-Deutsch C. & Journel A. (1992) GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide. New York.
- 11- Montserrat Pineda T. (2010). Métodos de explotación - Sublevel Stopping. Universidad de Chile. Santiago.



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



ANEXOS

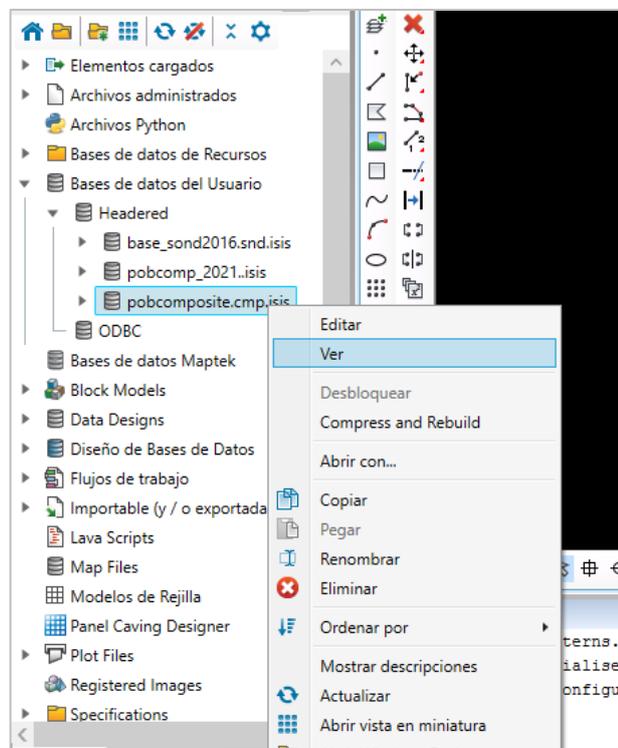
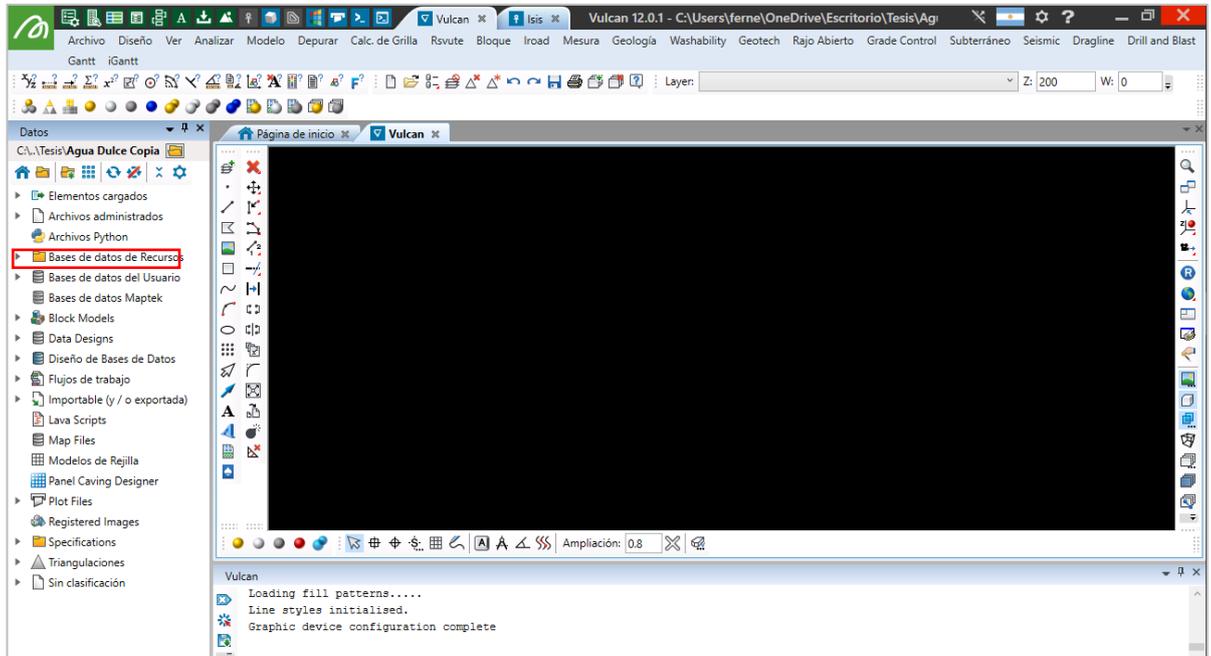


Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



ANEXO N°1

1.1 Visualización de base de datos

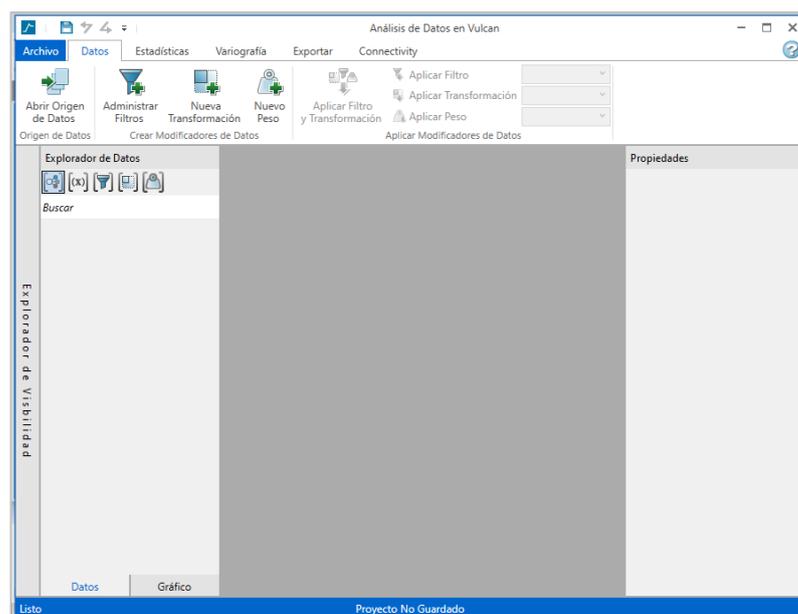
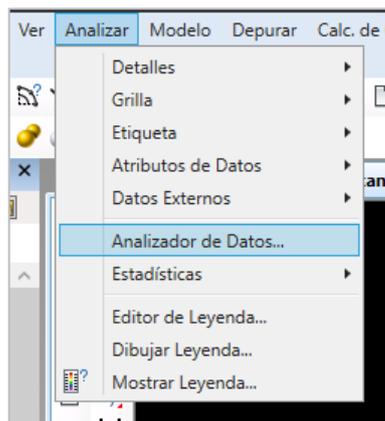
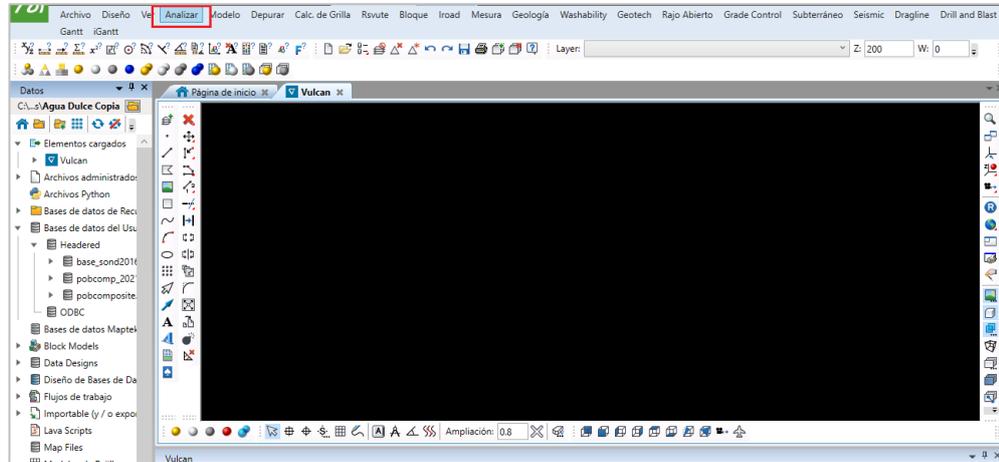




Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



1.2 Análisis estadístico de los compósitos

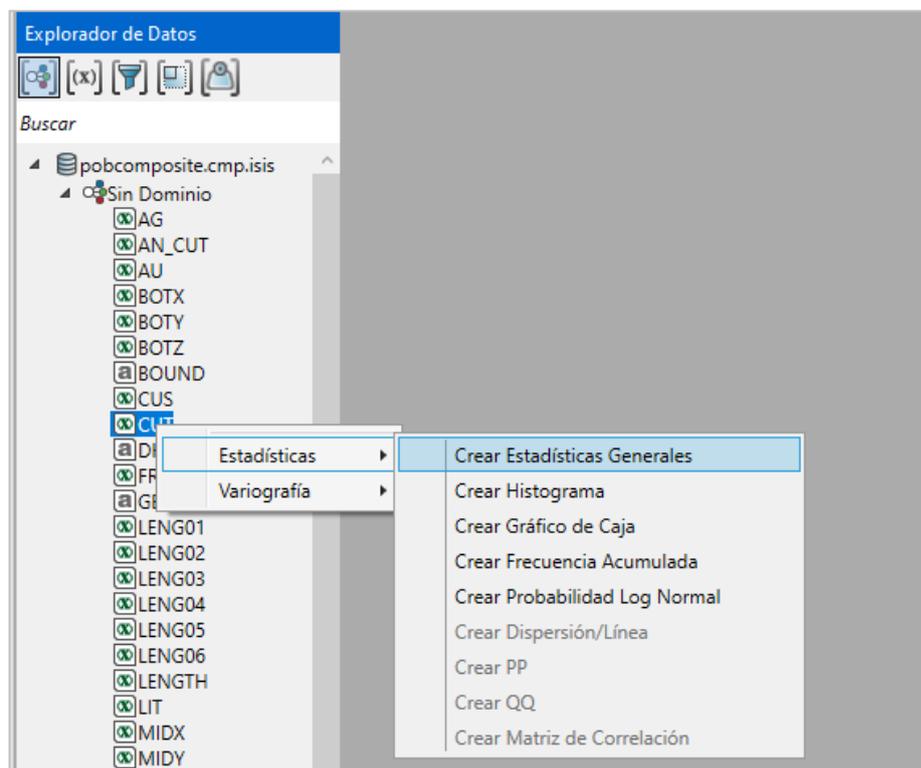




Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.

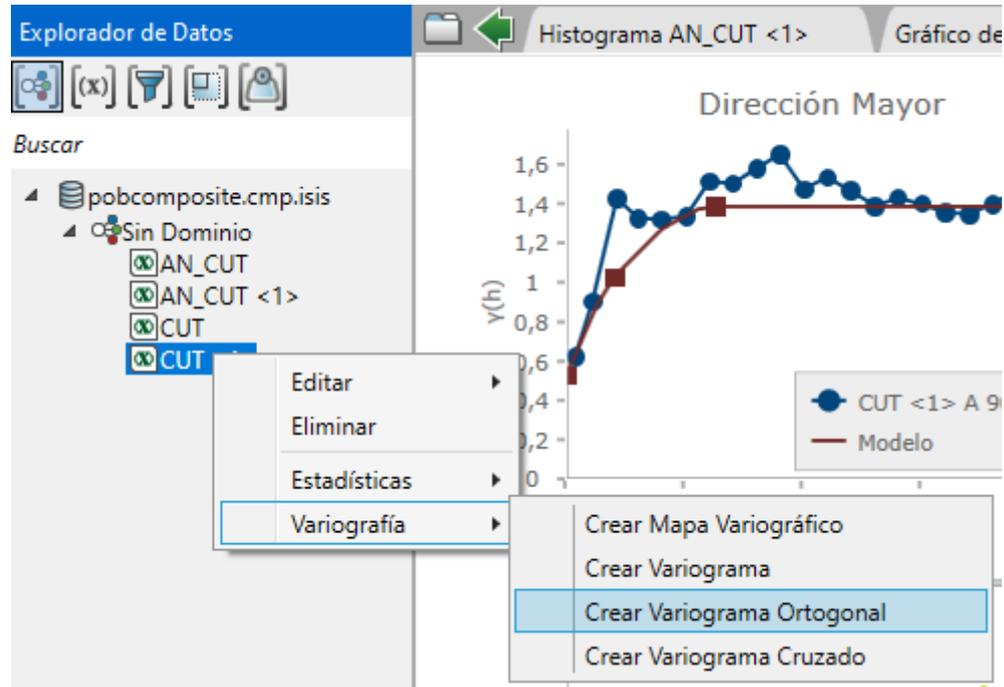


El origen de los datos se trata de un archivo en formato *isis* el cual contiene los datos de los compositos. La variable de interés es aquella que representa las leyes de Cobre, denominada CUT.



ANEXO N°2

2.1 Variografía



En el apartado “propiedades” se ingresan los parámetros de cada uno de los ejes.

Propiedades del Mayor	
Tamaño del Paso	4
Radio de Búsqueda	100
Tolerancia del Paso	2
Tolerancia en el Azimut	44
Tolerancia en Inclinação	44
Tolerancia Horizontal	44
Tolerancia Vertical	44

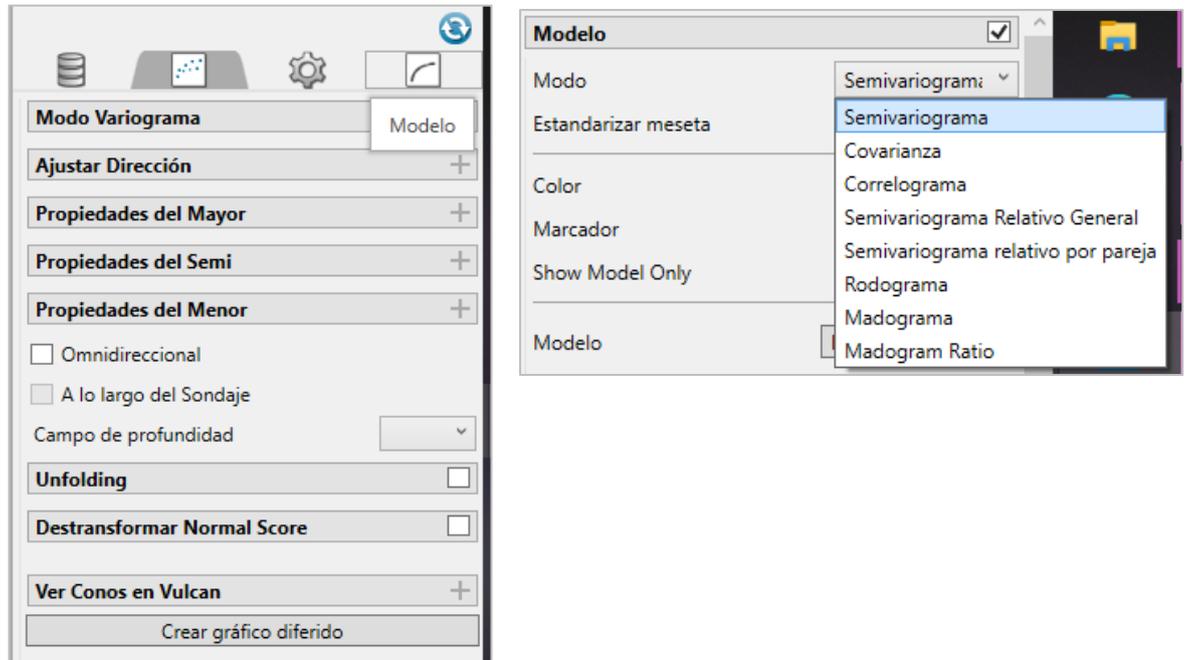
Propiedades del Menor	
Tamaño del Paso	3
Radio de Búsqueda	50
Tolerancia del Paso	1,5
Tolerancia en el Azimut	44
Tolerancia en Inclinação	44
Tolerancia Horizontal	44
Tolerancia Vertical	44



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.

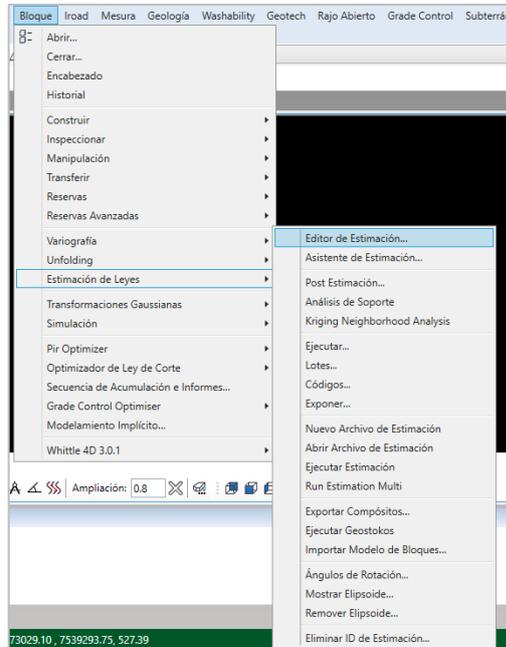


Para realizar el ajuste a un modelo teórico, se debe ingresar a la opción “modelo”

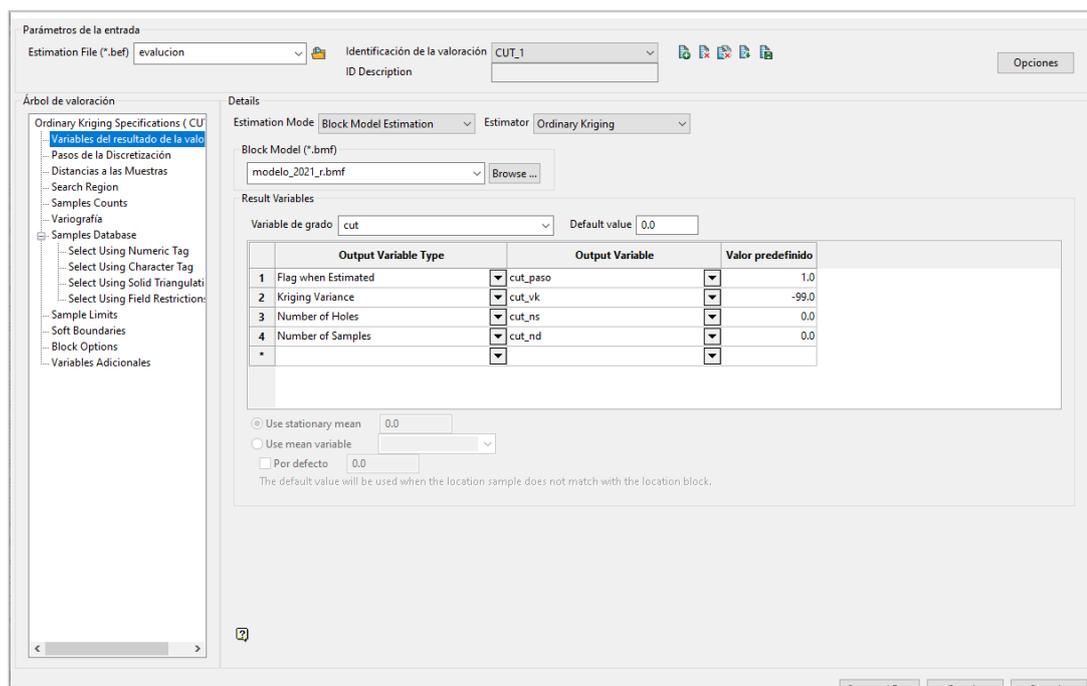


ANEXO N°3

3. 1 Estimación de leyes y categorización de los recursos.



La identificación de la valoración “CUT_1” corresponde a la primera categoría de los recursos.





Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Ordinary Kriging Specifications (CUT)

- Variables del resultado de la valoración
- Pasos de la Discretización
- Distancias a las Muestras**
- Search Region
- Samples Counts
- Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulation
 - Select Using Field Restrictions
- Sample Limits
- Soft Boundaries
- Block Options
- Variables Adicionales

Distancias a las Muestras

Distancias Cartesianas

Average distance:

Distancia promedio ponderada:

Anisotropic distances derived from the search ellipsoid

Average distance:

Distancia promedio ponderada:

Anisotropic distances derived from the anisotropic weights

Average distance:

Distancia promedio ponderada:

Default Distance when no estimate is made:

Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef): Identificación de la valoración: ID Description:

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CUT)
- Variables del resultado de la valoración
- Pasos de la Discretización
- Distancias a las Muestras
- Search Region**
- Samples Counts
- Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulation
 - Select Using Field Restrictions
- Sample Limits
- Soft Boundaries
- Block Options
- Variables Adicionales

Search Region

Search Shape: Ellipsoid Box

Search Orientation

Standard: Rumbo: Inclinación: Buzamiento:

Alternative: Rumbo: Inclinación: Buzamiento:

Positive plunge and dip angles are upwards

Search Distances

Standard: Major axis: Semi-major axis: Minor axis:

Alternative: Major axis: Semi-major axis: Minor axis:

Desarrugar

Unfolding spec file:

Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef): Identificación de la valoración: ID Description:

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CUT)
- Variables del resultado de la valoración
- Pasos de la Discretización
- Distancias a las Muestras
- Search Region
- Samples Counts**
- Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulation
 - Select Using Field Restrictions
- Sample Limits
- Soft Boundaries
- Block Options
- Variables Adicionales

Samples Counts

Minimum number of samples per estimate:

Maximum number of samples per estimate:

Use Octant Based Search

Maximum samples per octant:

Additional restrictions

Minimum octants with samples:

Minimum samples per octant:

Store octants used:

Store octants information:

Select octant rotation type

Rotate axes: Bearing = 45.0, Plunge = 0.0, Dip = 35.0

Cartesian axes: Bearing = 90.0, Plunge = 0.0, Dip = 0.0

Ellipsoid axes: Bearing = 90.0, Plunge = -25.0, Dip = 0.0

Select by anisotropic distance Select by Cartesian distance

Verificar ejemplos duplicados

Distancia para comprobar muestras duplicadas:

Note: The estimation will be stopped if samples are closer than or equal to this distance



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef)

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CU)
- Variables del resultado de la valo
- Pasos de la Discretización
- Distancias a las Muestras
- Search Region
- Samples Counts
- Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulati
 - Select Using Field Restriction:
- Sample Limits
- Soft Boundaries
- Block Options
- Variables Adicionales

Variografía cut.vrg 19/11/2022 19:39 Archivo VRG 1 KB

Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef) Identificación de la valoración ID Description

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CU)
- Variables del resultado de la valo
- Pasos de la Discretización
- Distancias a las Muestras
- Search Region
- Samples Counts
- Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulati
 - Select Using Field Restriction:
- Sample Limits
- Soft Boundaries
- Block Options
- Variables Adicionales

Samples Database

Select Database or Map File ODBC Link

Database field containing the drillhole name:

Sample Fields

Sample group: Location X field: Location Y field: Location Z field: Grade field:

Use variable weighting

Cross Validation Fields

Drillhole field for cross validation:

Sample identifier fields to save in map file

Nombre: From: To:

Estimation Declustering Weights Field

Pesos de desagrupamiento:

Sample Database Manipulation

Apply logarithm Constante:

Cut grade samples Lower cut value: Upper cut value:

Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef) Identificación de la valoración ID Description

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CU)
- Variables del resultado de la valo
- Pasos de la Discretización
- Distancias a las Muestras
- Search Region
- Samples Counts
- Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulati
 - Select Using Field Restriction:
- Sample Limits
- Soft Boundaries
- Block Options
- Variables Adicionales

Sample Selection Using a Numeric Tag

Numeric field:

Use specific numeric values Ignore certain numeric values

Valor	Valor
0.0	0.0

Use a numeric range

Minimum range: Maximum range:



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef) Identificación de la valoración ID Description

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CUT)
 - Variables del resultado de la valo
 - Pasos de la Discretización
 - Distancias a las Muestras
 - Search Region
 - Samples Counts
 - Variografía
 - Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulati
 - Select Using Field Restriction
 - Sample Limits
 - Soft Boundaries
 - Block Options
 - Variables Adicionales

Sample Selection Using Solid Triangulations

Triangulación

Mineral_2021.00t

Examinar Selecc. en Pantalla Limpiar Limpiar Todo

Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef) Identificación de la valoración ID Description

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CUT)
 - Variables del resultado de la valo
 - Pasos de la Discretización
 - Distancias a las Muestras
 - Search Region
 - Samples Counts
 - Variografía
 - Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulati
 - Select Using Field Restriction
 - Sample Limits**
 - Soft Boundaries
 - Block Options
 - Variables Adicionales

Sample Limits

Exclude Distant, High Yield Samples

Field for high yield samples

Threshold for high yield samples

Límites de alto rendimiento

Use angles

Rumbo	<input type="text" value="0.0"/>	Major axis radius	<input type="text" value="15.0"/>
Inclinación	<input type="text" value="0.0"/>	Semi - Major axis radius	<input type="text" value="15.0"/>
Buzamiento	<input type="text" value="0.0"/>	Minor axis radius	<input type="text" value="10.0"/>

Limit Samples by Drillhole ID

Limit number of samples per drillhole

Maximum samples

Limit number of drillholes per estimate

Minimum drillholes

Maximum drillholes

Field for drillhole ID

Para estimar los boques pertenecientes a la segunda categoría se crea una nueva identificación de la valoración denominada "CUT_2", contando con las siguientes consideraciones:



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef) Identificación de la valoración

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CU)
- Variables del resultado de la valo
- Pasos de la Discretización
- Distancias a las Muestras
- Search Region
- Samples Counts
- Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulati
 - Select Using Field Restriction:
- Sample Limits
- Soft Boundaries
- Block Options
- Variables Adicionales

Search Region

Search Shape

Ellipsoid Box

Search Orientation

Standard

Rumbo

Inclinación

Buzamiento

Positive plunge and dip angles are upwards

Alternative

Rumbo

Inclinación

Buzamiento

Search Distances

Standard

Major axis

Semi-major axis

Minor axis

Alternative

Major axis

Semi-major axis

Minor axis

Desarrugar

Unfolding spec file

Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef) Identificación de la valoración

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CU)
- Variables del resultado de la valo
- Pasos de la Discretización
- Distancias a las Muestras
- Search Region
- Samples Counts
- Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulati
 - Select Using Field Restriction:
- Sample Limits
- Soft Boundaries
- Block Options
- Variables Adicionales

Block Options

Use Specific Zone

Variable de Zona

Zone value

Use Condition on Blocks

Condición

Use Bounding Box

Minimum X Maximum X

Minimum Y Maximum Y

Minimum Z Maximum Z

Use Bounding Triangulation

Nombre de Triangulación

Alternative Block Centroids

Coordenada X

Coordenada Y

Coordenada Z



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Por último, se crea la categoría 3 “CUT_3” de la siguiente manera:

Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef) Identificación de la valoración

ID Description

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CU
 - Variables del resultado de la valo
 - Pasos de la Discretización
 - Distancias a las Muestras
 - Search Region**
 - Samples Counts
 - Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulati
 - Select Using Field Restriction
- Sample Limits
- Soft Boundaries
- Block Options
- Variables Adicionales

Search Region

Search Shape

Ellipsoid Box

Search Orientation

Standard

Rumbo

Inclinación

Buzamiento

Alternative

Rumbo

Inclinación

Buzamiento

Positive plunge and dip angles are upwards

Search Distances

Standard

Major axis

Semi-major axis

Minor axis

Alternative

Major axis

Semi-major axis

Minor axis

Desarrugar

Unfolding spec file

Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef) Identificación de la valoración

ID Description

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CU
 - Variables del resultado de la valo
 - Pasos de la Discretización
 - Distancias a las Muestras
 - Search Region
 - Samples Counts**
 - Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulati
 - Select Using Field Restriction
- Sample Limits
- Soft Boundaries
- Block Options
- Variables Adicionales

Samples Counts

Minimum number of samples per estimate

Maximum number of samples per estimate

Use Octant Based Search

Maximum samples per octant

Additional restrictions

Minimum octants with samples

Minimum samples per octant

Store octants used

Store octants information

Select octant rotation type

Rotate axes : Bearing = 45.0, Plunge = 0.0, Dip = 35.0

Cartesian axes : Bearing = 90.0, Plunge = 0.0, Dip = 0.0

Ellipsoid axes : Bearing = 90.0, Plunge = -25.0, Dip = 0.0

Select by anisotropic distance Select by Cartesian distance

Verificar ejemplos duplicados

Distancia para comprobar muestras duplicadas

Note: The estimation will be stopped if samples are closer than or equal to this distance



Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef) Identificación de la valoración ID Description

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CU)
- Variables del resultado de la valo
- Pasos de la Discretización
- Distancias a las Muestras
- Search Region
- Samples Counts
- Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulati
 - Select Using Field Restriction
- Sample Limits
- Soft Boundaries
- Block Options**
- Variables Adicionales

Block Options

Use Specific Zone
Variable de Zona
Zone value

Use Condition on Blocks
Condición

Use Bounding Box
Minimum X Maximum X
Minimum Y Maximum Y
Minimum Z Maximum Z

Use Bounding Triangulation
Nombre de Triangulación

Alternative Block Centroids
 Coordenada X
 Coordenada Y
 Coordenada Z

Parámetros de la entrada

Estimation File (*.bef) Identificación de la valoración ID Description

Árbol de valoración

- Ordinary Kriging Specifications (CU)
- Variables del resultado de la valo
- Pasos de la Discretización
- Distancias a las Muestras
- Search Region
- Samples Counts
- Variografía
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulati
 - Select Using Field Restriction
- Sample Limits**
- Soft Boundaries
- Block Options
- Variables Adicionales

Sample Limits

Exclude Distant, High Yield Samples
Field for high yield samples
Threshold for high yield samples

Límites de alto rendimiento

Use angles
Rumbo Major axis radius
Inclinación Semi - Major axis radius
Buzamiento Minor axis radius

Limit Samples by Drillhole ID

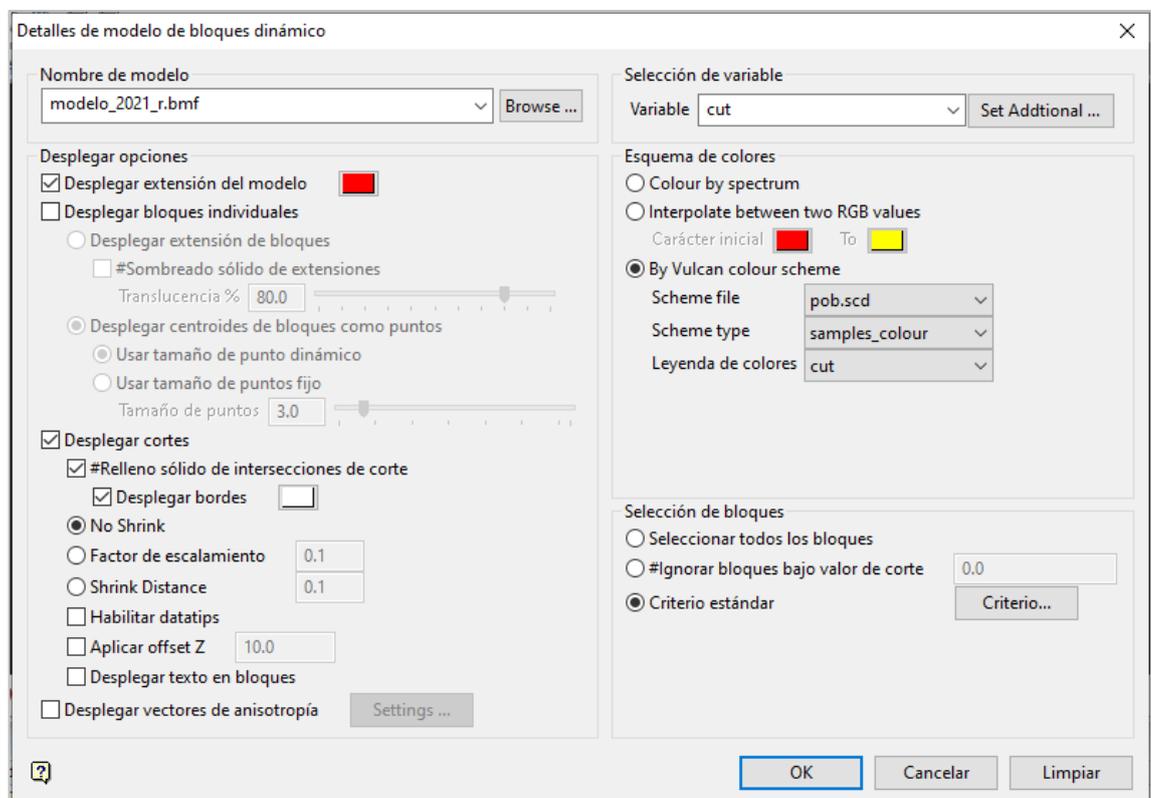
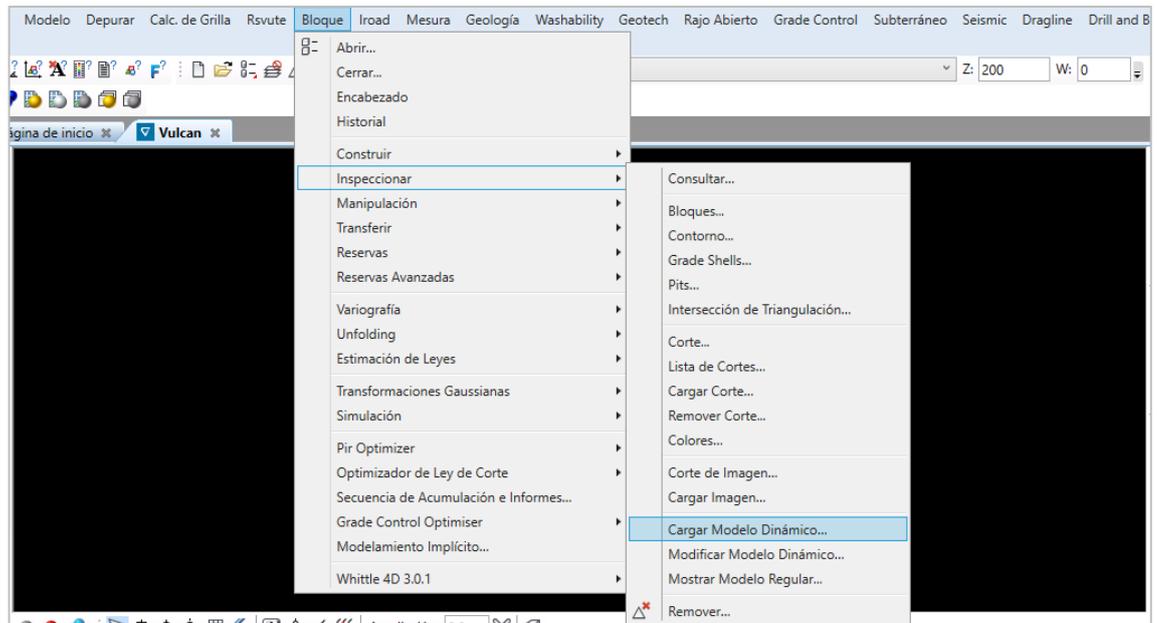
Limit number of samples per drillhole
Maximum samples

Limit number of drillholes per estimate
Minimum drillholes
Maximum drillholes

Field for drillhole ID

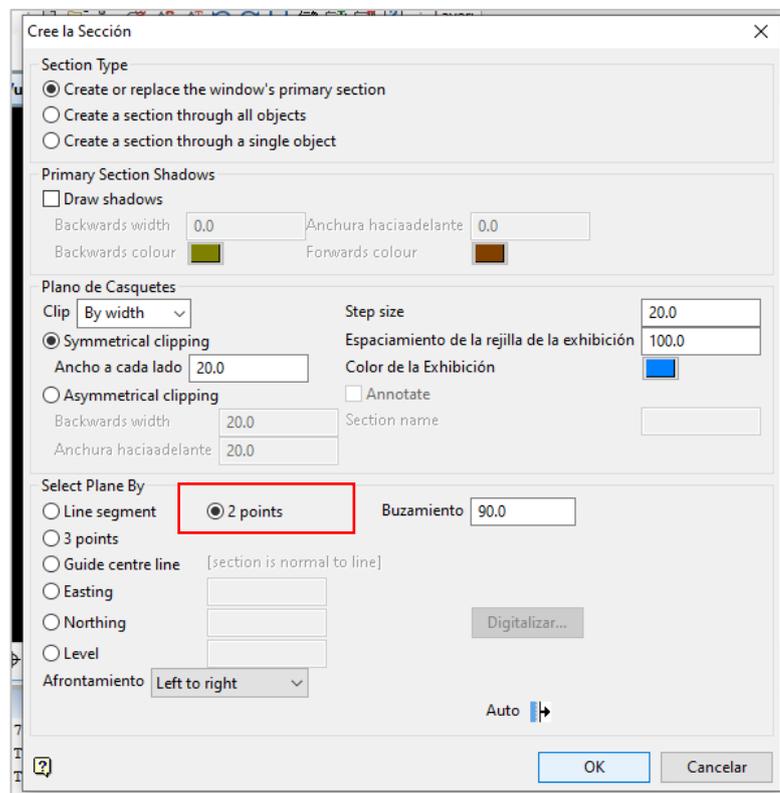
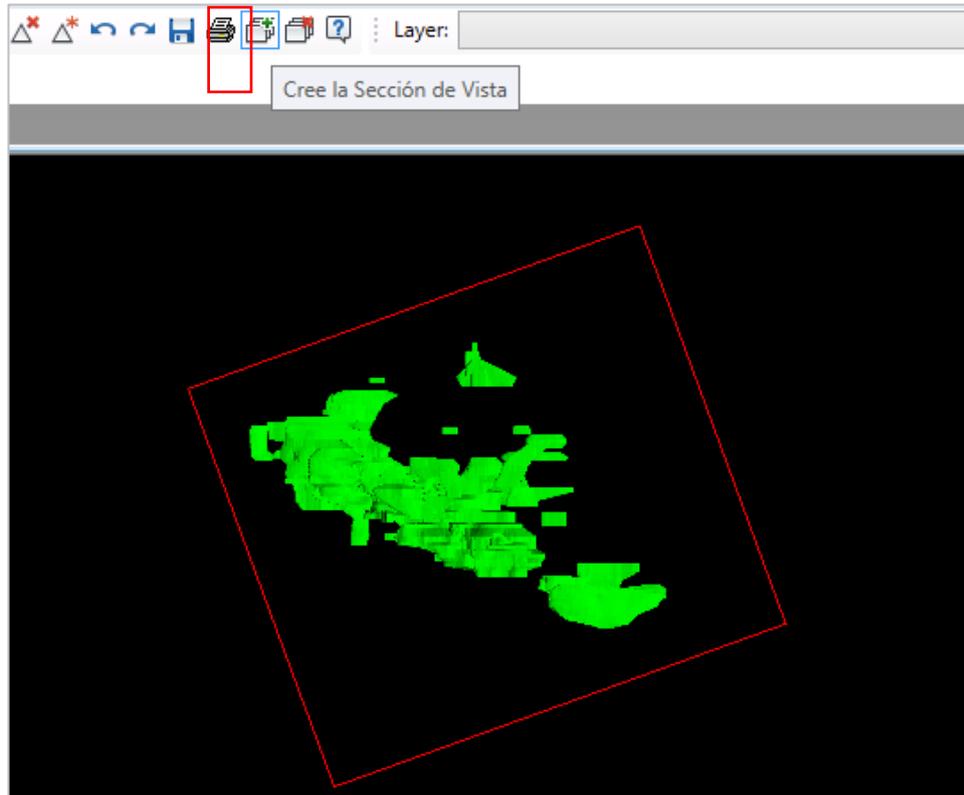
ANEXO N°4

4.1 Visualización del modelo de bloques.



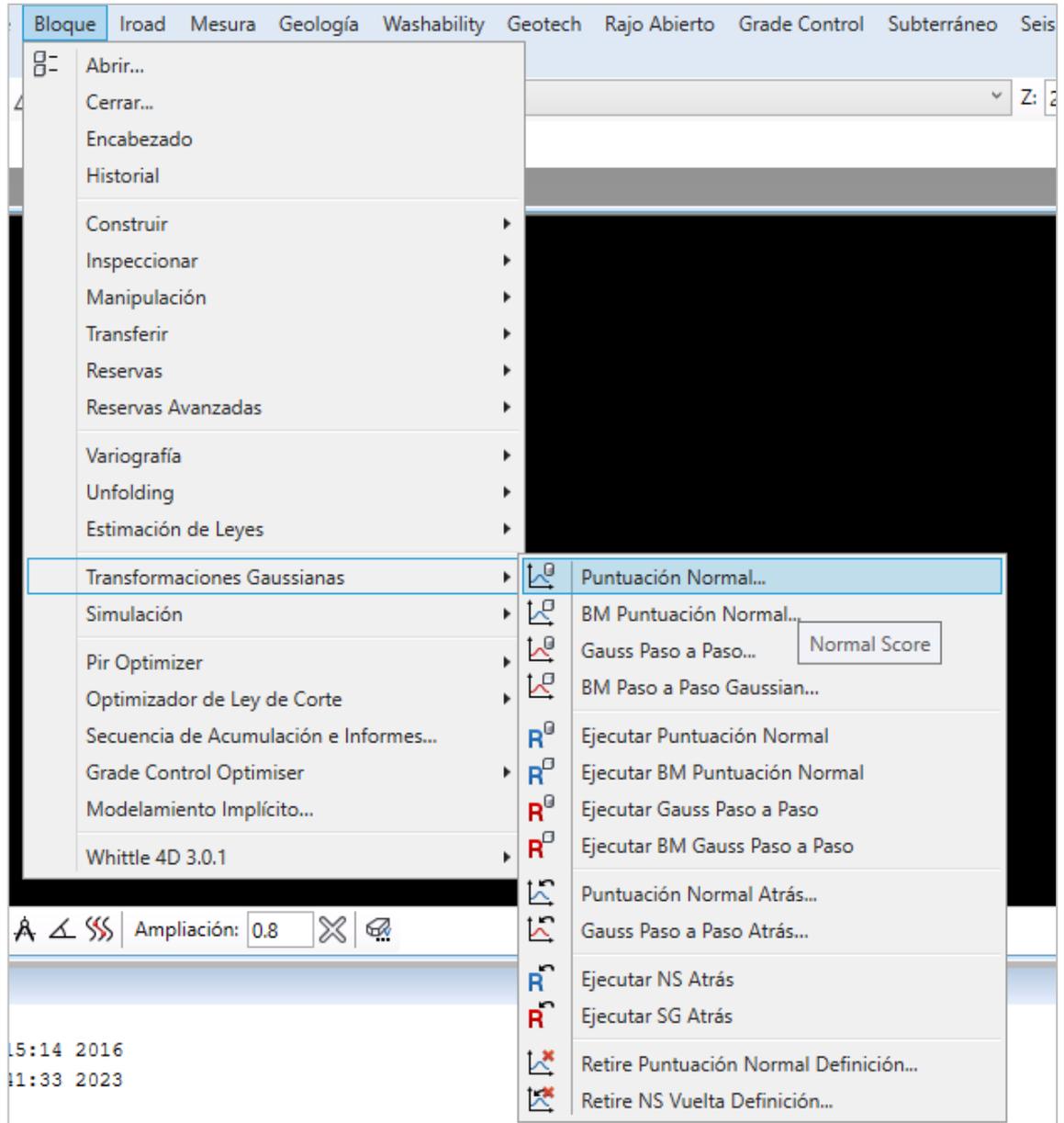


Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



ANEXO N°5

5.1 Transformación gaussiana





Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Normal Score Transformation

Normal Score Files

- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulation
 - Select Using Field Restrictions
- Reference Distribution
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulation
 - Select Using Field Restrictions

Samples Database

Use Database

ISIS file

Nombre del Archivo: pobcomposite.cmp.isis

ODBC Link

Diseño:

Use Map File

Optional map file identifier:

Samples Fields

Sample group: CMP_1 Normal score value: AN_CUT

Grade field: CUT

Apply weights

Weights field:

Save transformation table: salvar gaussiana.ns.tfn

Sample database manipulation

Apply logarithm constant 0.0

Cut samples

Lower cut value: 1.0 Upper cut value: 20.0

Normal Score Transformation

Normal Score Files

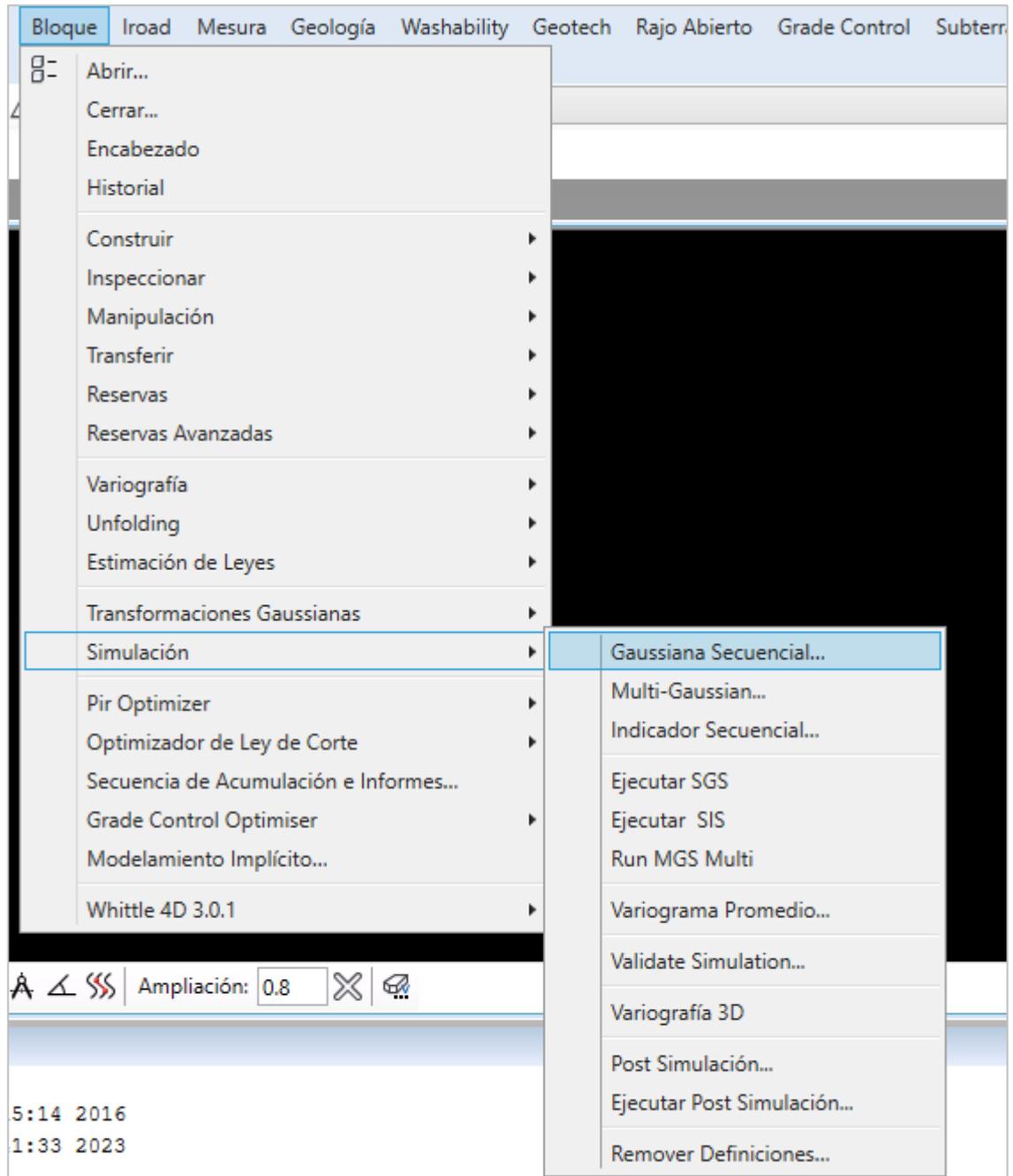
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulation
 - Select Using Field Restrictions
- Reference Distribution
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulation
 - Select Using Field Restrictions

Sample Selection Using Field Restrictions

	Campo	Attributes
1	CUT	0&100
*		



5.2 Simulación gaussiana secuencial





Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Acceso rápido	Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
Escritorio	dgd_backup	1/2/2023 21:24	Carpeta de archivos	
Bibliotecas	Estadísticas	9/3/2023 18:12	Carpeta de archivos	
Este equipo	graficos	26/2/2023 19:38	Carpeta de archivos	
Red	presentacion	1/2/2023 21:24	Carpeta de archivos	
	scrip	1/2/2023 21:24	Carpeta de archivos	
	modelo_2021_r.bmf	6/4/2023 21:41	Archivo BMF	5.392.234 KB

Nombre: modelo_2021_r.bmf Abrir

Tipo: Vulcan Block Models Cancelar

Sequential Gaussian Simulation Parameters Editor

Simulation Files

- Simulation Parameters
- Results Variables
- Search Region
- Variograma
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulations
 - Select Using Field Restrictions
- Transformaciones de función gaussian
 - Reference Distribution
- Sample Counts
- Sample Limits
- Block Selection
- Post Simulation

Simulation Parameters

Data Parameters

Random number seed: 9615380 Generar

Perform unconditional simulation

Assign data to nodes

Transform the data

Use normal score transformation

Use stepwise gaussian transformation

Kriging Types

Kriging type: Simple Kriging Extra variable:

Collocated Cosimulation Kriging

Use a single collocated cosimulation variable for all realisations

Variable:

Correlation coefficient: 0.0

Variance reduction factor: 0.0

Specify a collocated cosimulation variable for each realisation

Aplicar y ejecutar OK Cancelar

Sequential Gaussian Simulation Parameters Editor

Simulation Files

- Simulation Parameters
- Results Variables
- Search Region
- Variograma
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulations
 - Select Using Field Restrictions
- Transformaciones de función gaussian
 - Reference Distribution
- Sample Counts
- Sample Limits
- Block Selection
- Post Simulation

Simulation Results Variables

	Simulation Variable	Collocated Cosimulation Variable	Correlation Coefficient	Varianza Reduction Factor
1	SIM_1		0.5	1.0
2	SIM_2		0.5	1.0
3	SIM_3		0.5	1.0
4	SIM_4		0.5	1.0
5	SIM_5		0.5	1.0
6	SIM_6		0.5	1.0
7	SIM_7		0.5	1.0
8	SIM_8		0.5	1.0
9	SIM_9		0.5	1.0
10	SIM_10		0.5	1.0
11	SIM_11		0.5	1.0

Number of simulations: 50

Generate simulation variable names Generate cosimulation variable names

Prefix: SIM_1 From realisation: 1

Sufijo inicial: 0 To realisation: 50

Ancho: 1 n, 0n, 00n, ...

Create block model simulation variables

Use float type Use double type

Sequential Gaussian Simulation Parameters Editor

Simulation Files

- Simulation Parameters
- Results Variables
- Search Region
- Variograma
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulations
 - Select Using Field Restrictions
- Transformaciones de función gaussian
 - Reference Distribution
- Sample Counts
- Sample Limits
- Block Selection
- Post Simulation

Search Region

Search Shape

Ellipsoid Box

Search Orientation

Standard	Alternative
<input checked="" type="radio"/> Rumbo: 90.0	<input type="radio"/> Rumbo: <input type="text"/>
<input checked="" type="radio"/> Inclinación: -25.0	<input type="radio"/> Inclinación: <input type="text"/>
<input checked="" type="radio"/> Buzamiento: 0.0	<input type="radio"/> Buzamiento: <input type="text"/>

Positive plunge and dip angles are upwards

Search Distances

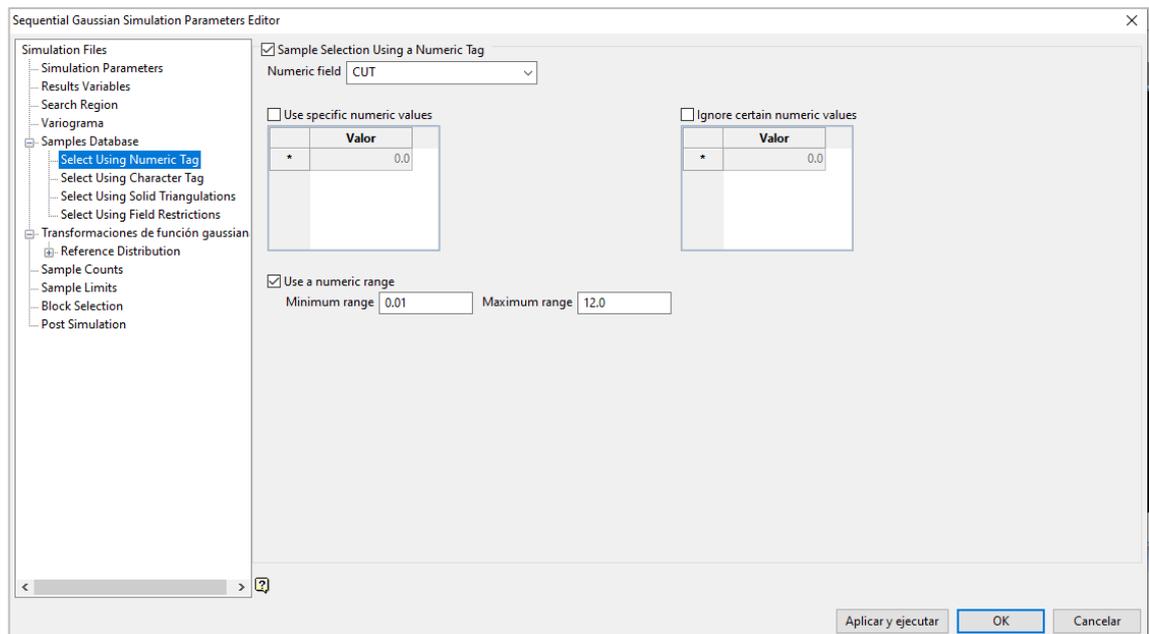
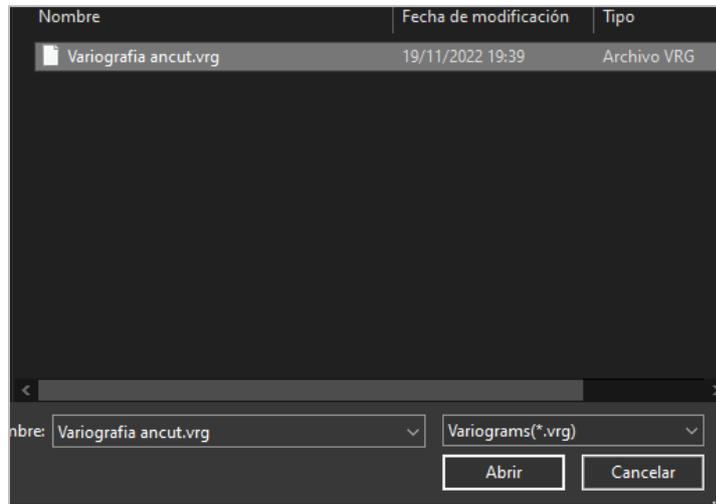
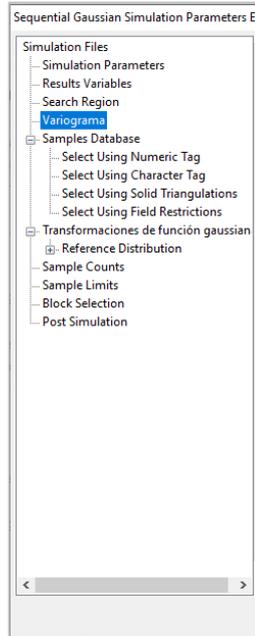
Standard	Alternative
<input checked="" type="radio"/> Major axis: 50.0	<input type="radio"/> Major axis: <input type="text"/>
<input checked="" type="radio"/> Semi-major axis: 45.0	<input type="radio"/> Semi-major axis: <input type="text"/>
<input checked="" type="radio"/> Minor axis: 15.0	<input type="radio"/> Minor axis: <input type="text"/>

Desarrugar

Unfolding spec file:

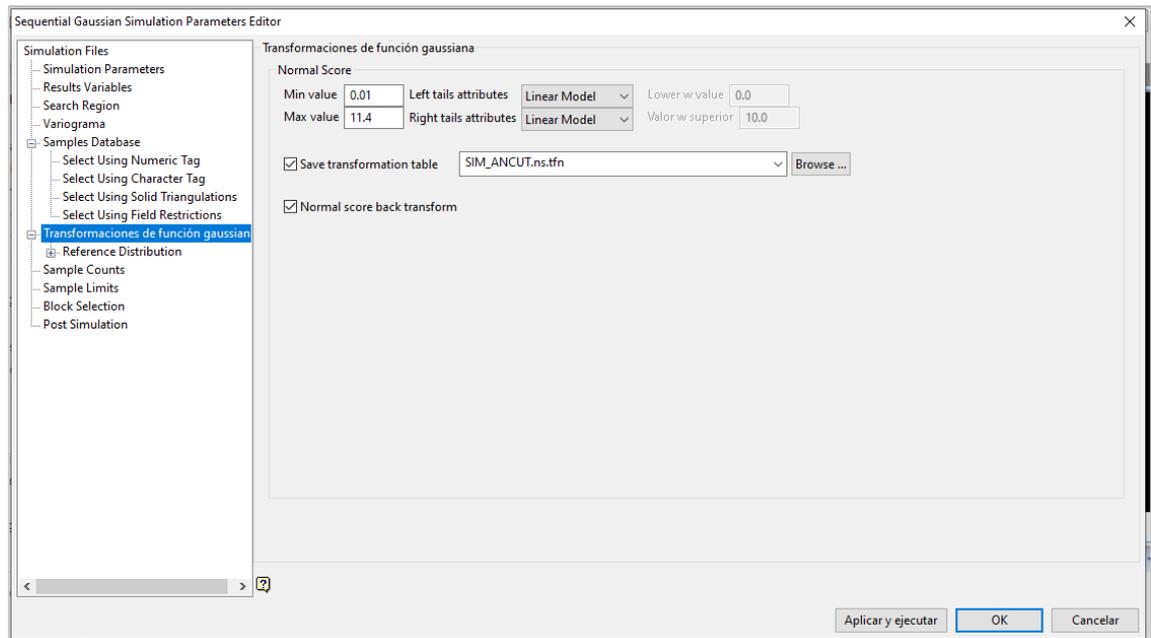
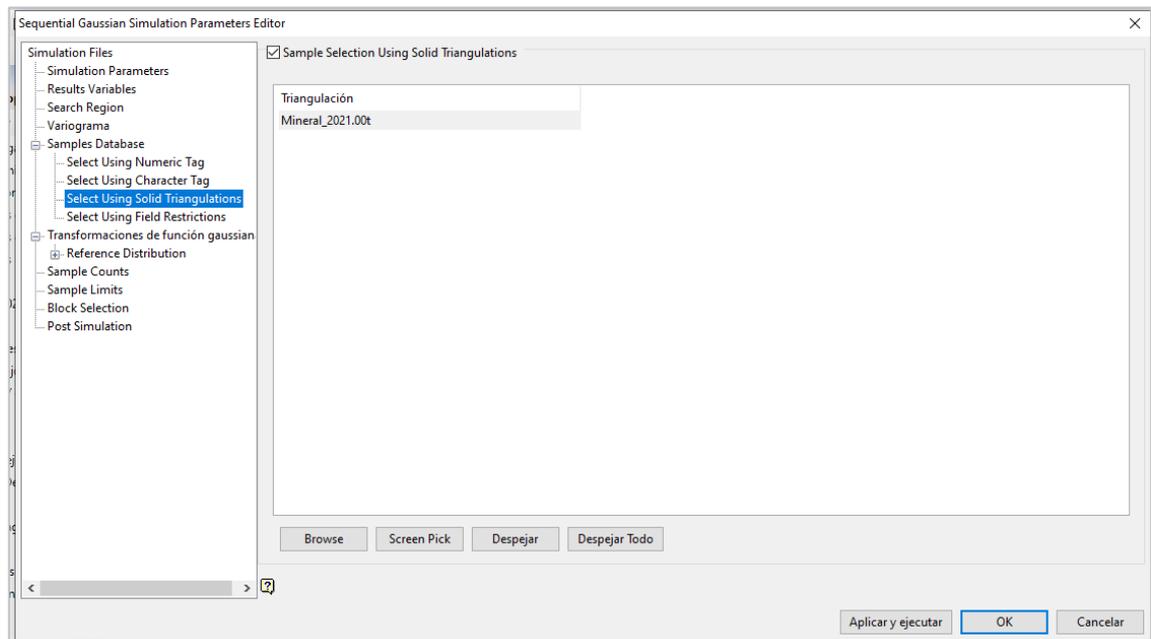


Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.





Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.





Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Sequential Gaussian Simulation Parameters Editor

Simulation Files

- Simulation Parameters
- Results Variables
- Search Region
- Variograma
- Samples Database
 - Select Using Numeric Tag
 - Select Using Character Tag
 - Select Using Solid Triangulations
 - Select Using Field Restrictions
- Transformaciones de función gaussian
 - Reference Distribution
- Sample Counts
- Sample Limits**
- Block Selection
- Post Simulation

Sample Limits

Exclude Distant, High Yield Samples

Field for high yield samples: [dropdown]

Threshold for high yield samples: 0.0

Límites de alto rendimiento

Use angles

Rumbo	0.0	Major axis radius	50.0	Interactivo
Inclinación	0.0	Semi - Major axis radius	50.0	
Buzamiento	0.0	Minor axis radius	50.0	

Limit Samples Per Drillhole

Maximum samples per drillhole: 3.0

Database field containing the drillhole name: DHID [dropdown]

Aplicar y ejecutar OK Cancelar



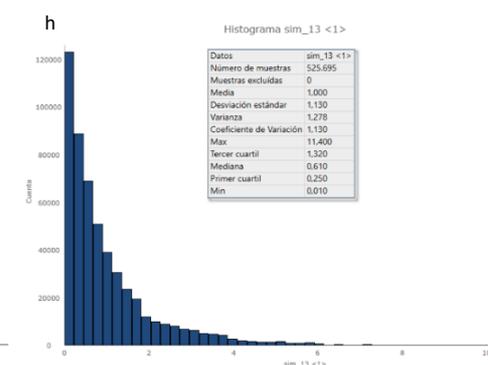
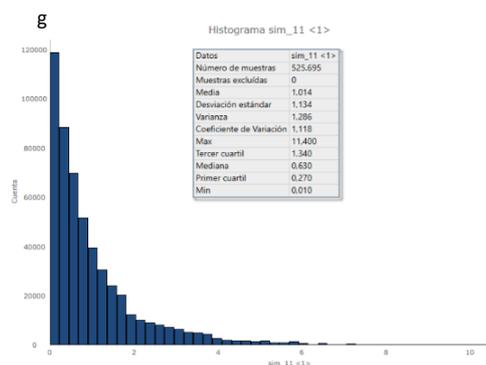
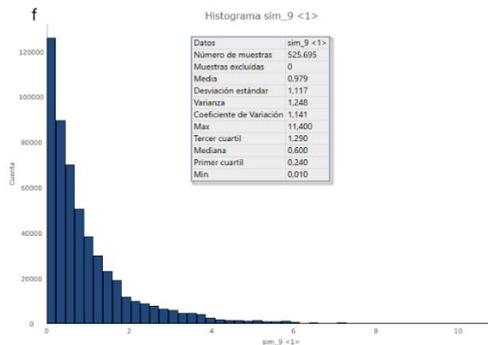
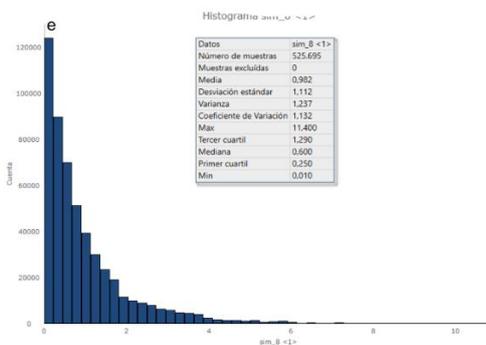
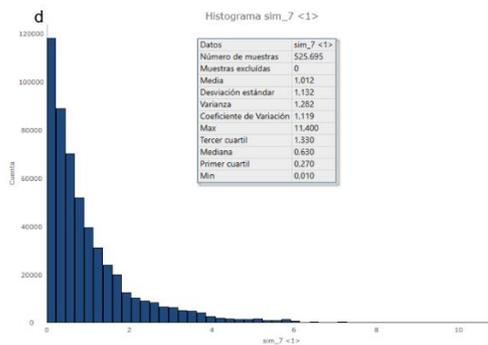
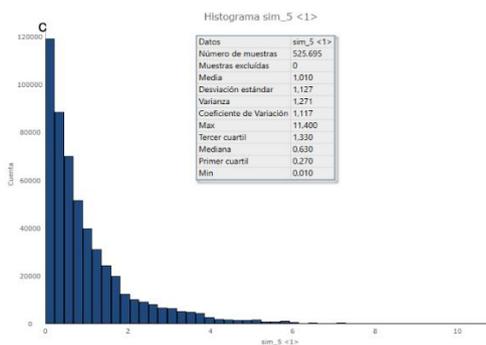
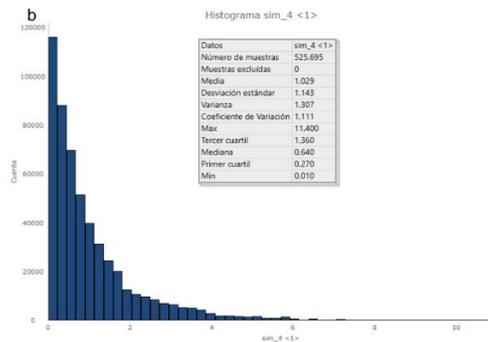
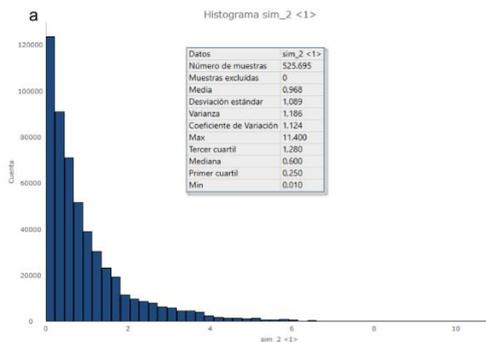
Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



ANEXO N°6

6.1 Histogramas de las simulaciones.

a) simulación 2 - b) simulación 4 - c) simulación 5 - d) simulación 7 - e) simulación 8 - f) simulación 9 - g) simulación 11 - h) simulación 13

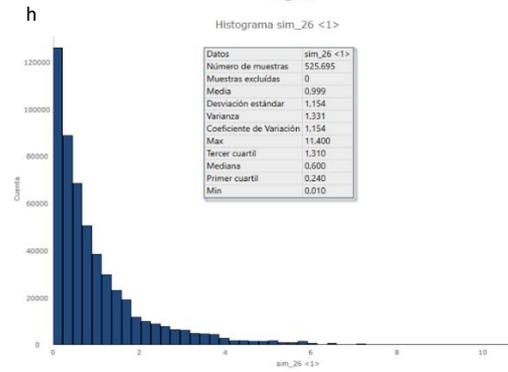
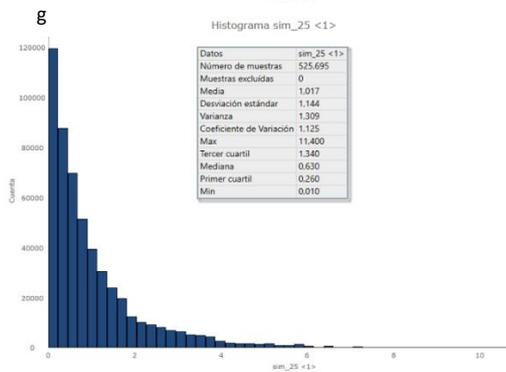
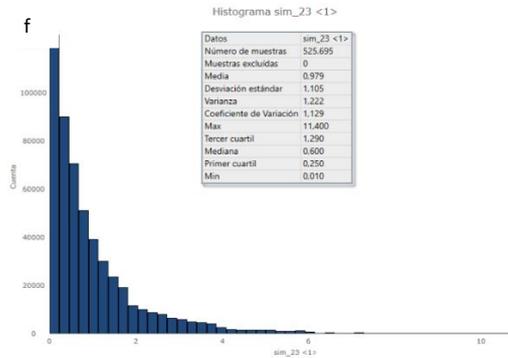
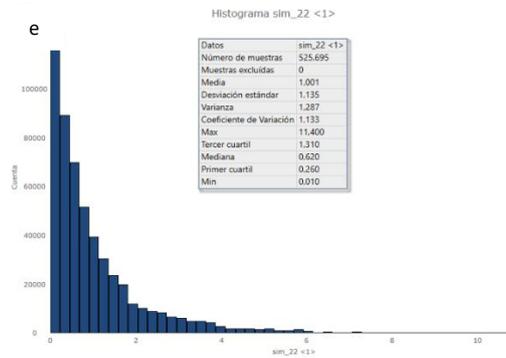
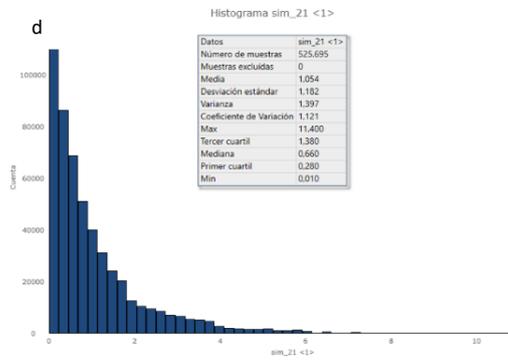
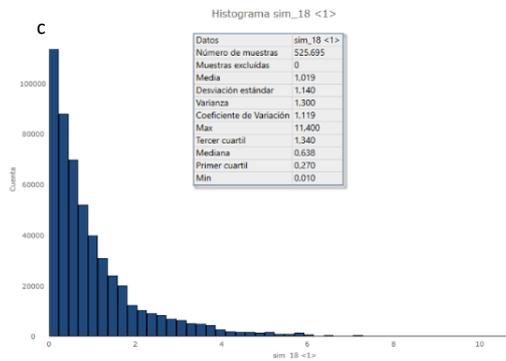
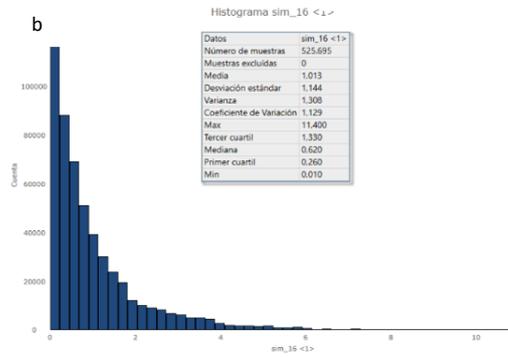
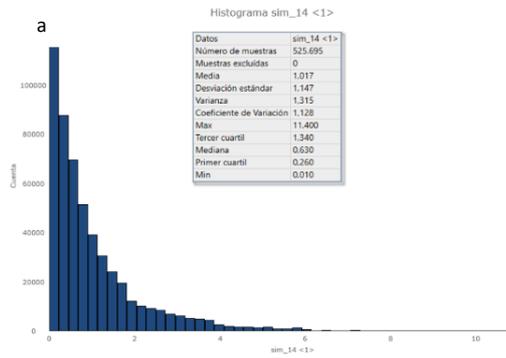




Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



a) simulación 14 - b) simulación 16 - c) simulación 18 - d) simulación 21 - e) simulación 22 - f) simulación 23 - g) simulación 25 - h) simulación 26.

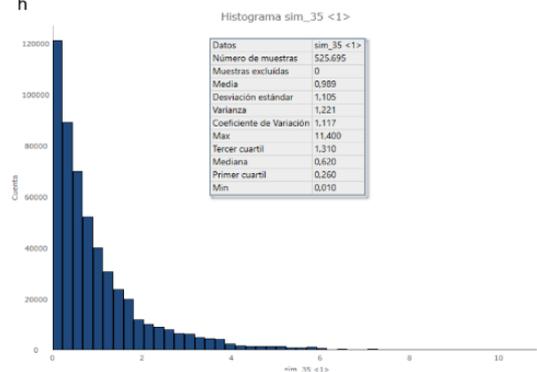
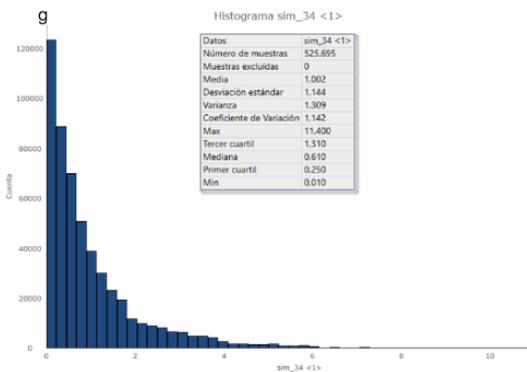
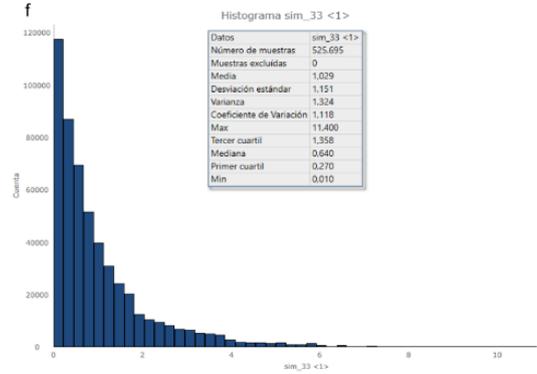
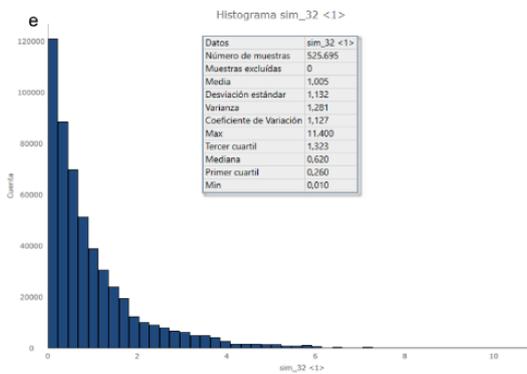
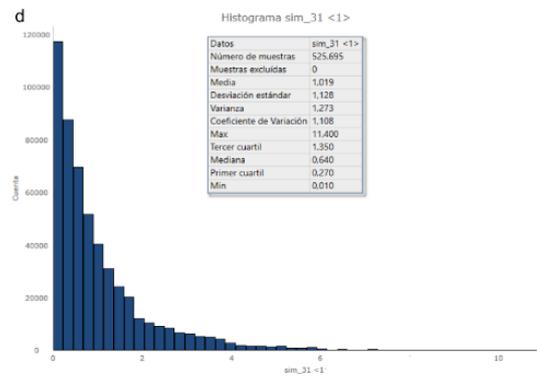
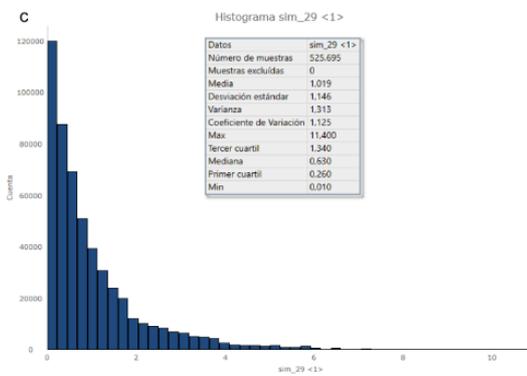
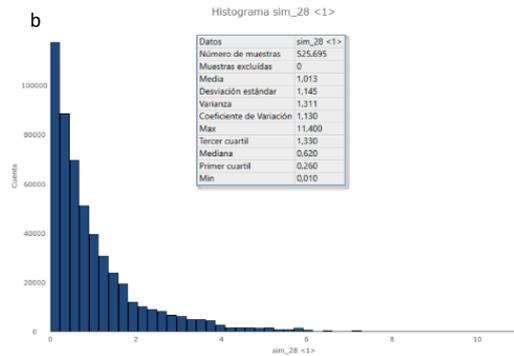
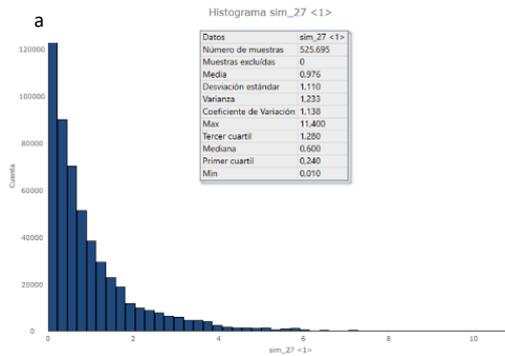




Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



a) simulación 27 - b) simulación 28 - c) simulación 29 - d) simulación 31 - e) simulación 32 - f) simulación 33 - g) simulación 34 - h) simulación 35.

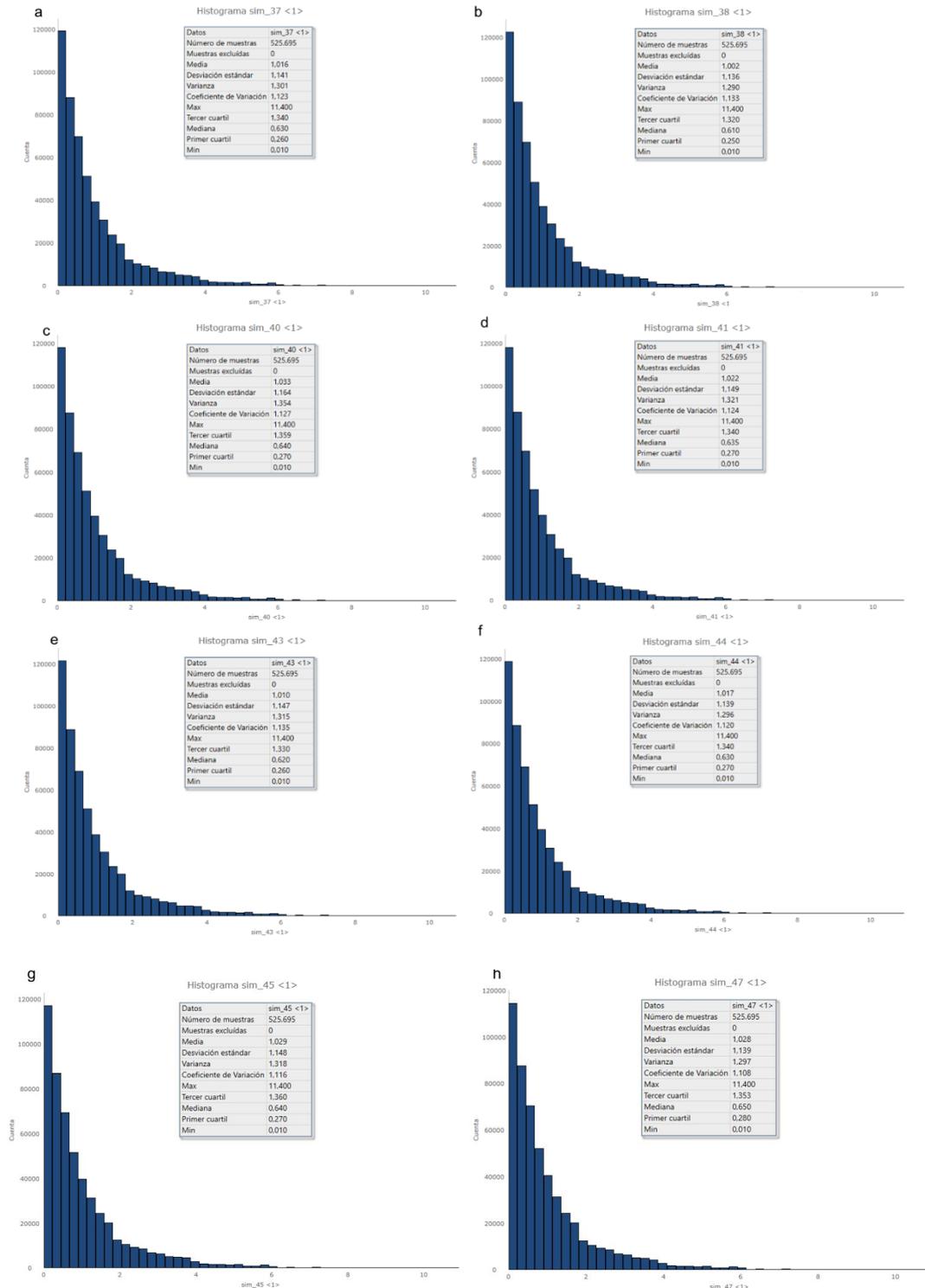




Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



a) simulación 37 - b) simulación 38 - c) simulación 40 - d) simulación 41 - e) simulación 43 - f) simulación 44 - g) simulación 45 - h) simulación 47.

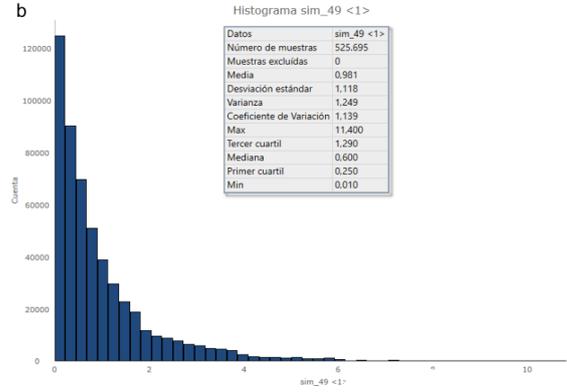
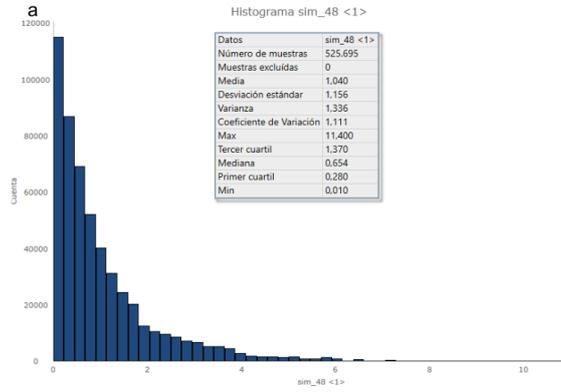




Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



a) simulación 48 - b) simulación 49.

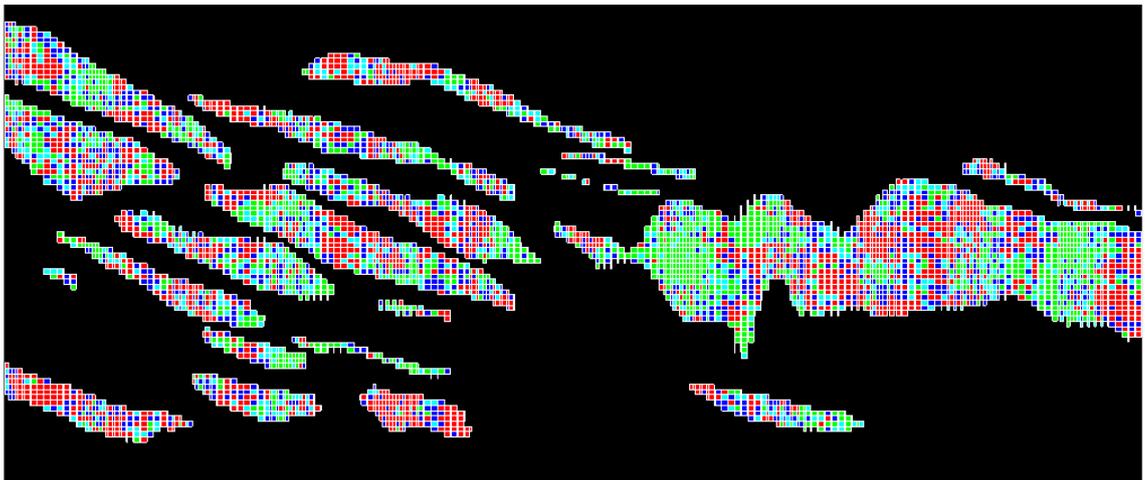




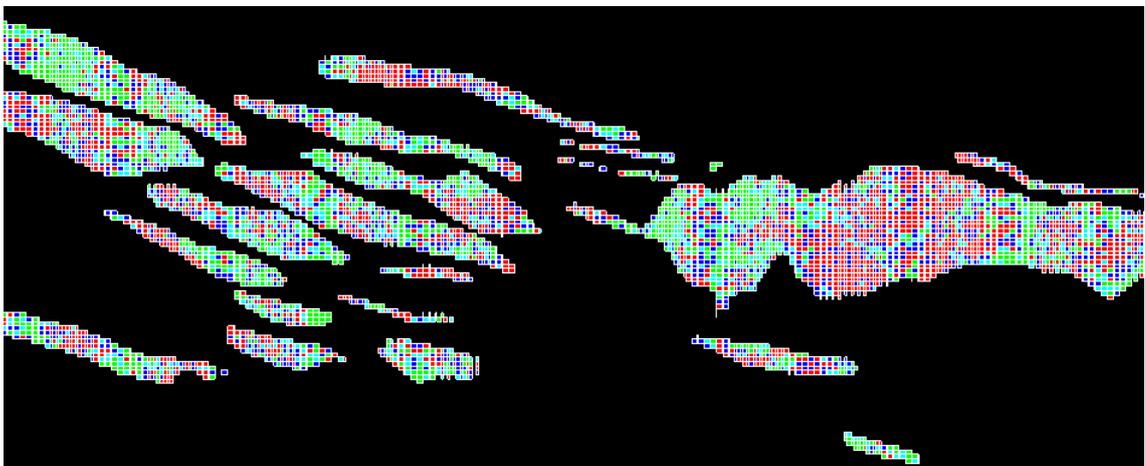
ANEXO N°7

7.1 Simulaciones condicionales.

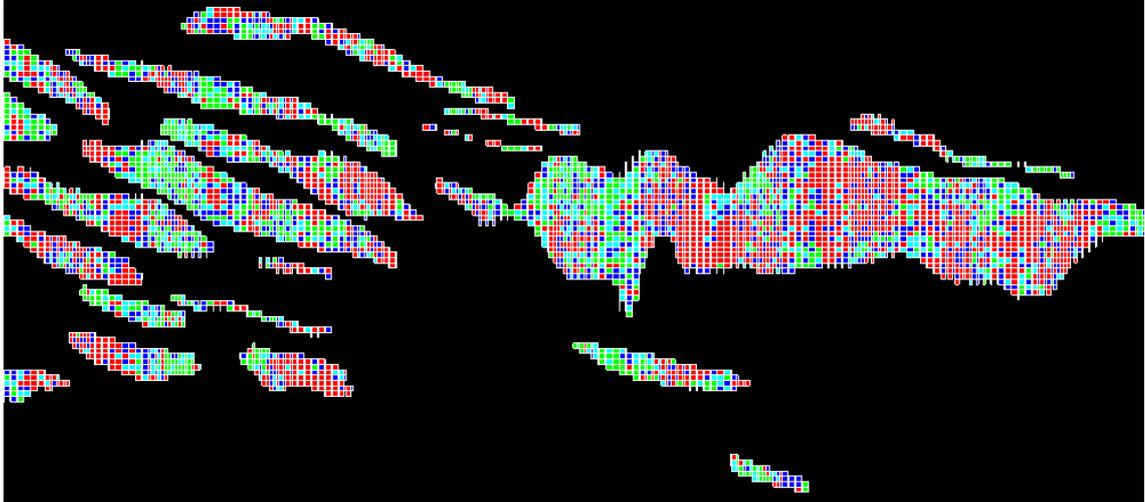
Simulación 1



Simulación 3



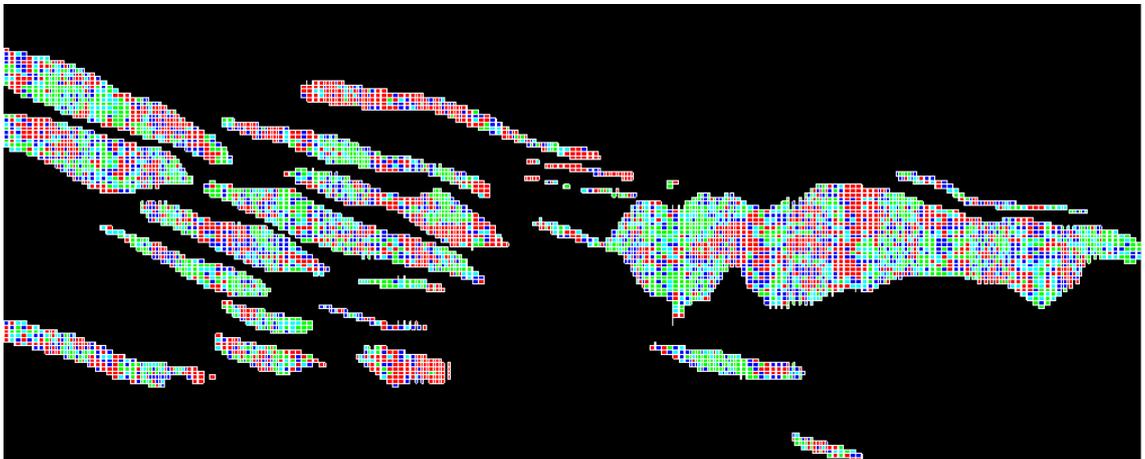
Simulación 4



Simulación 6

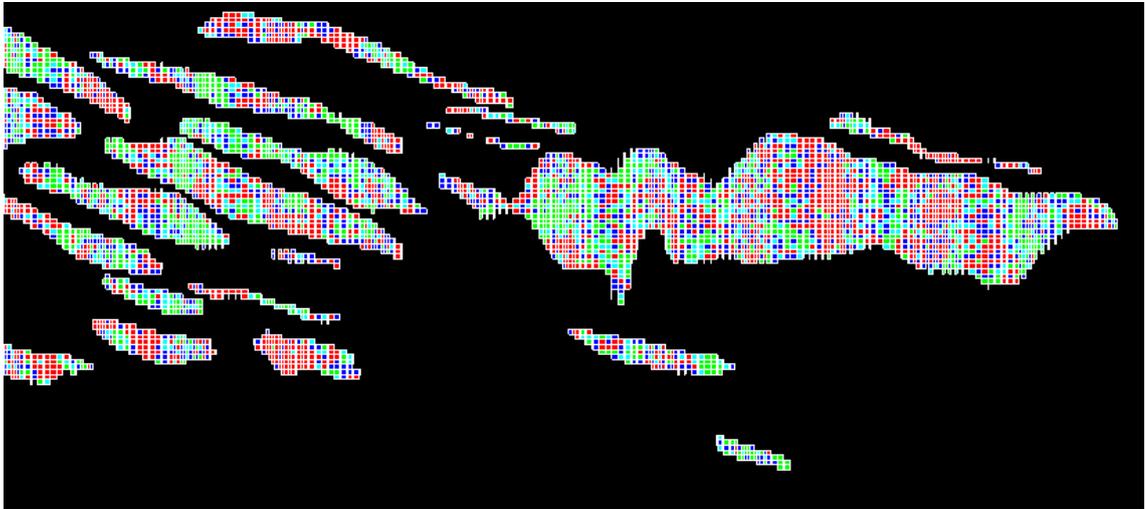


Simulación 7





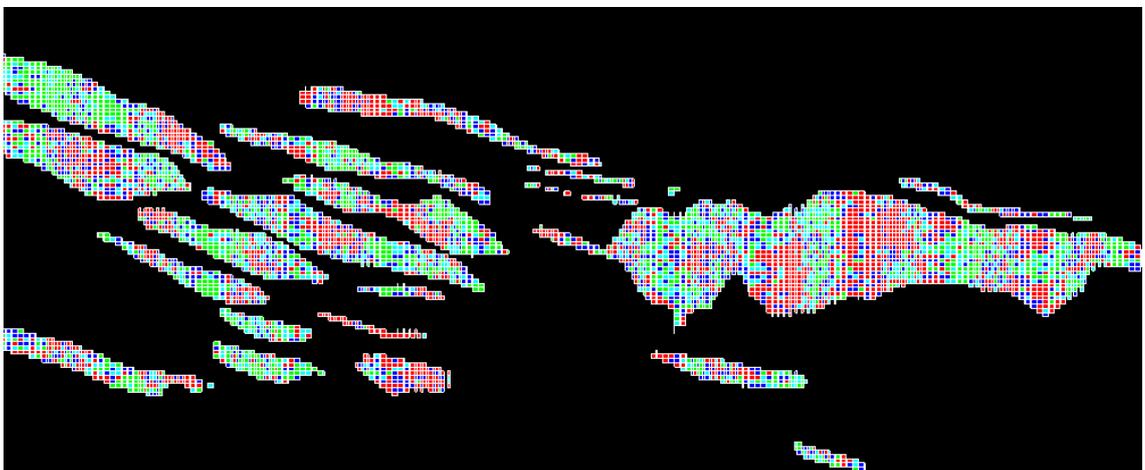
Simulación 8



Simulación 10



Simulación 11



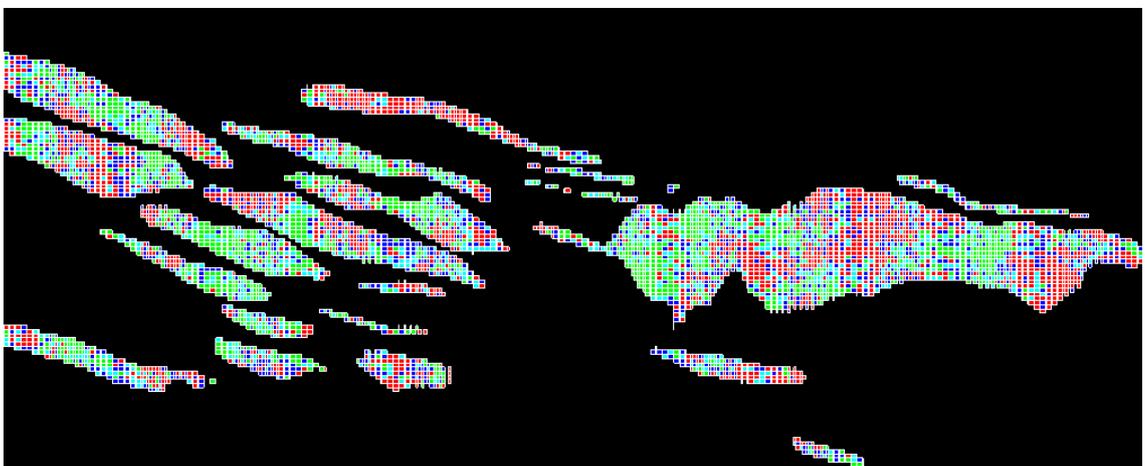
Simulación 12



Simulación 13

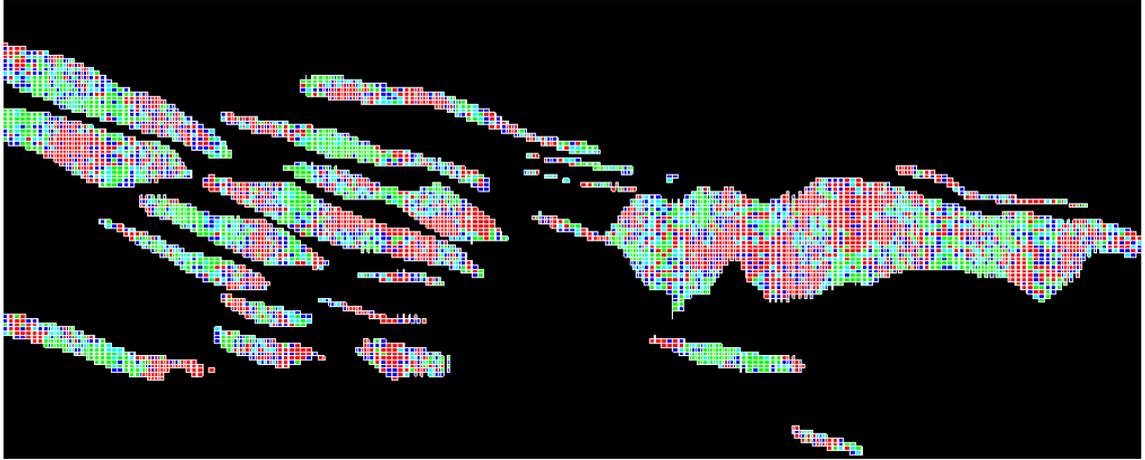


Simulación 15





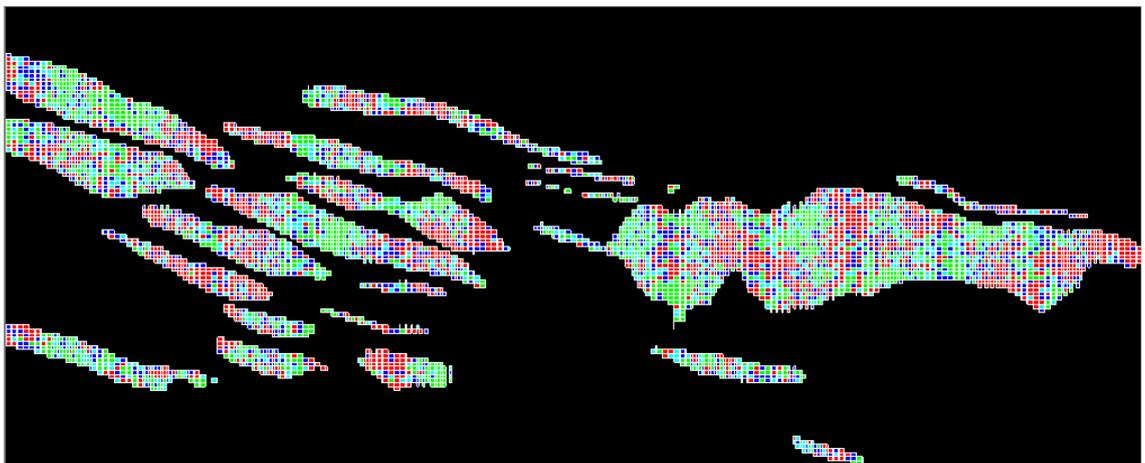
Simulación 16



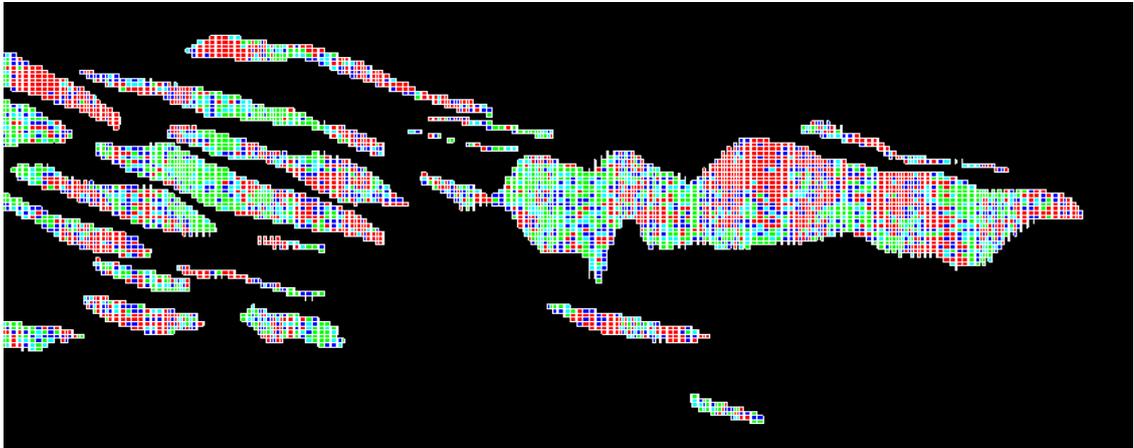
Simulación 17



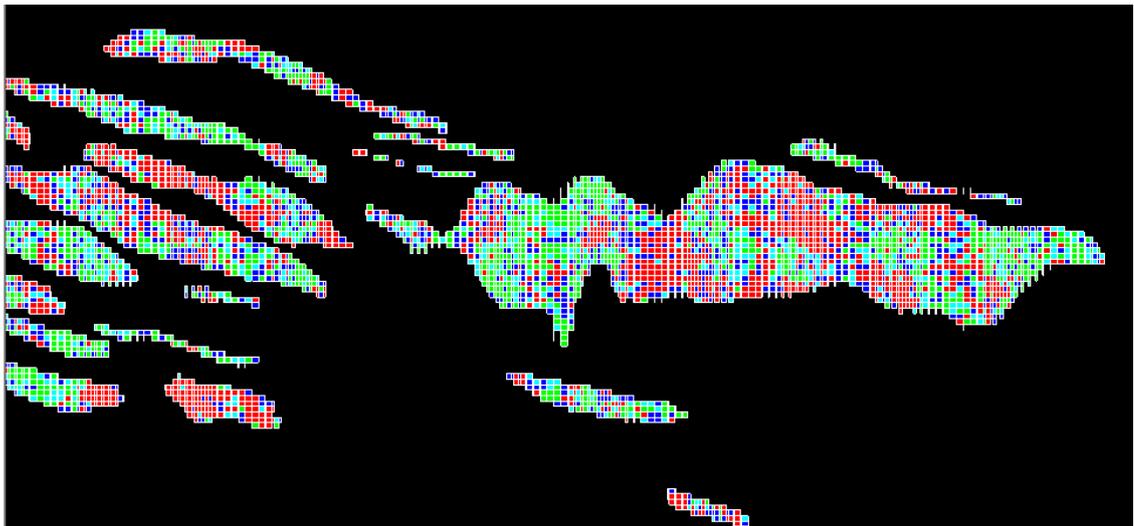
Simulación 18



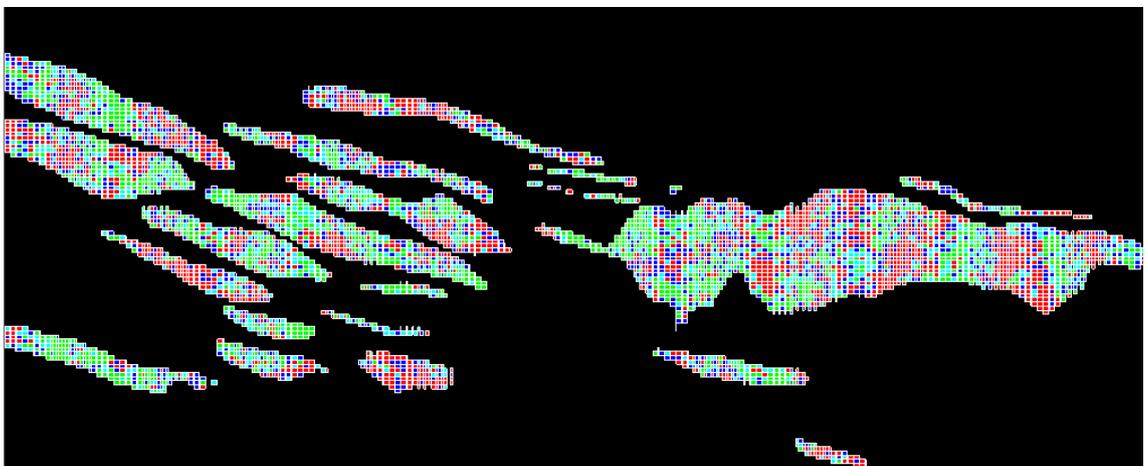
Simulación 19



Simulación 21



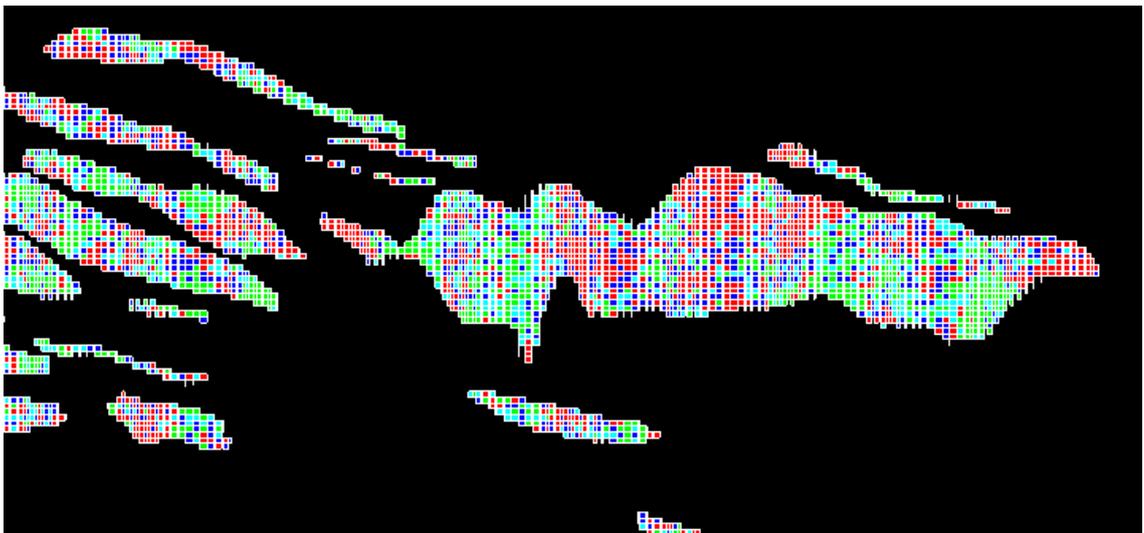
Simulación 22



Simulación 24



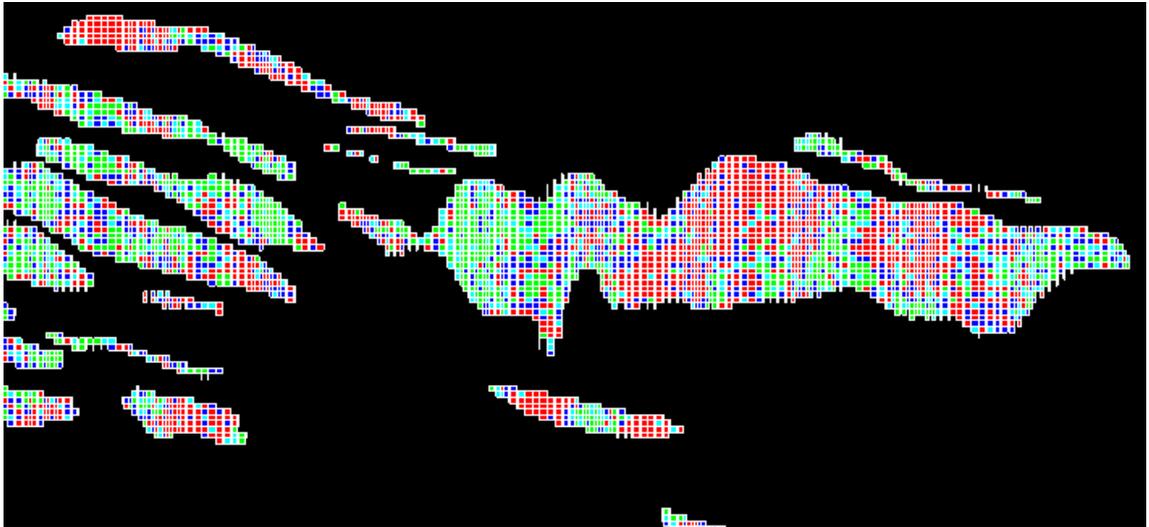
Simulación 25



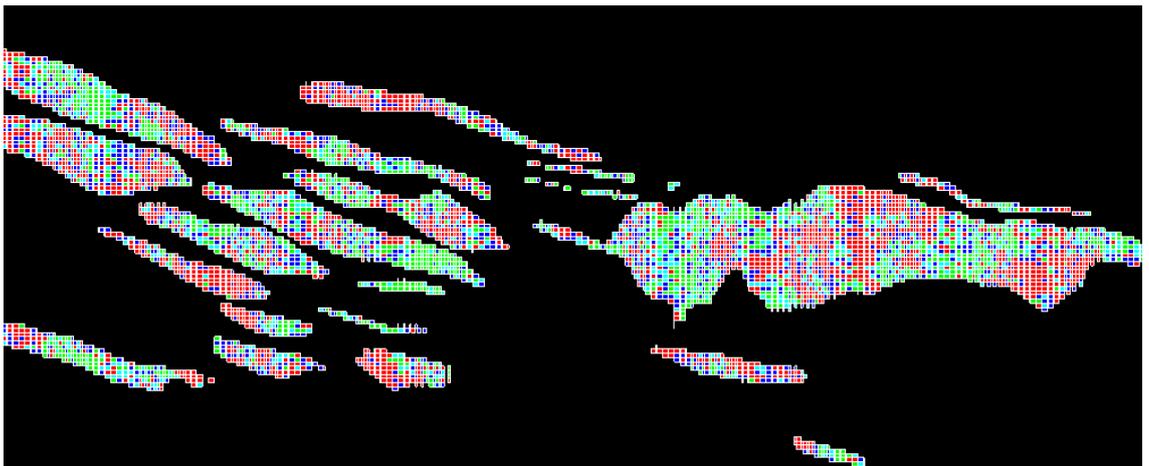
Simulación 27



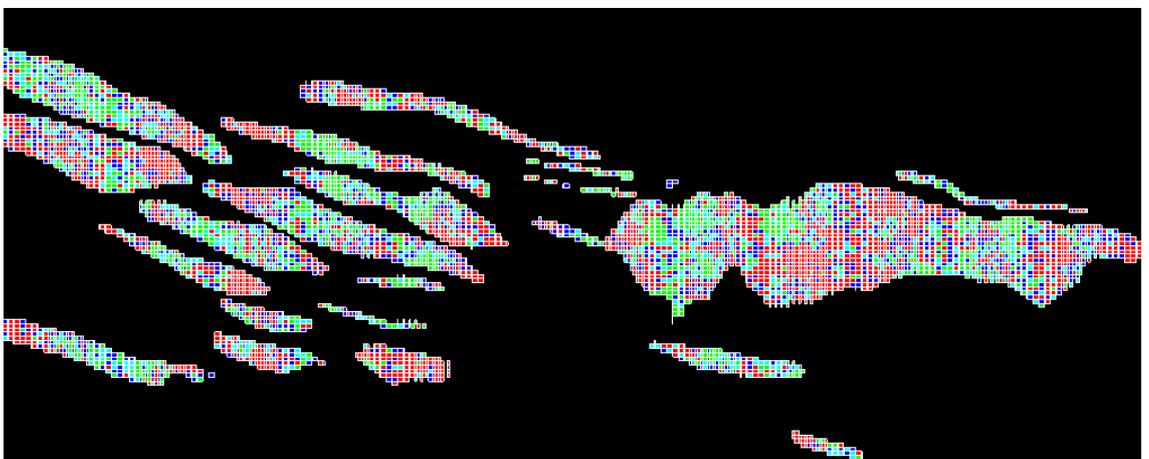
Simulación 28



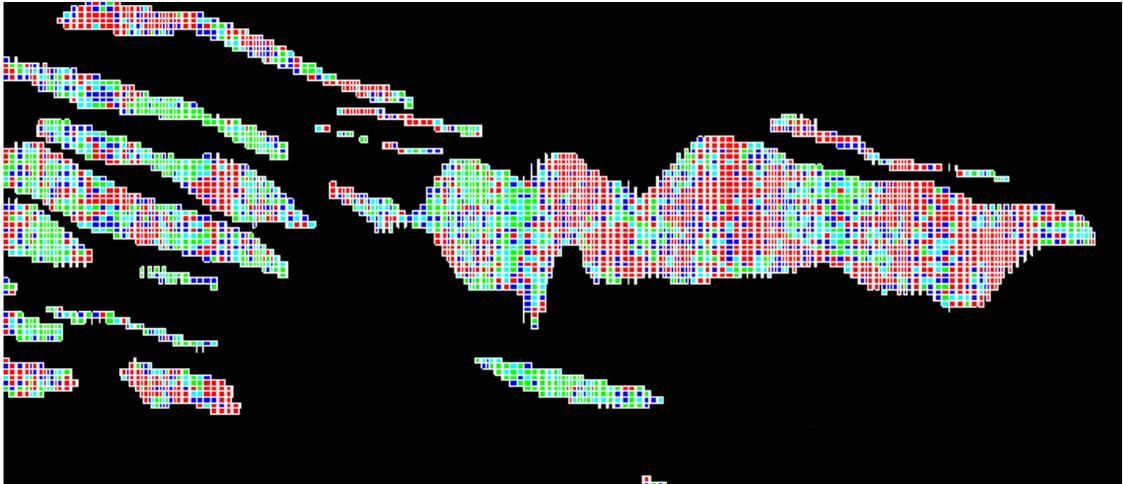
Simulación 30



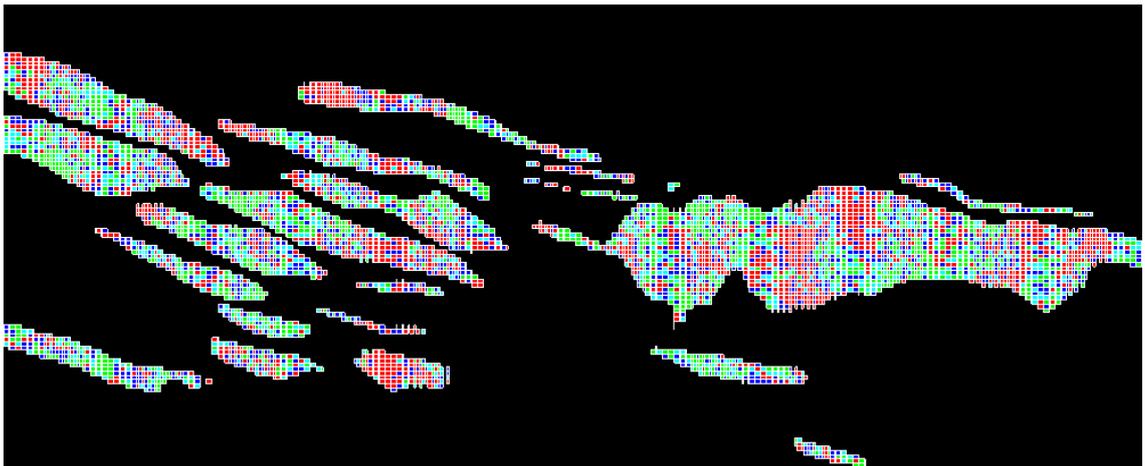
Simulación 31



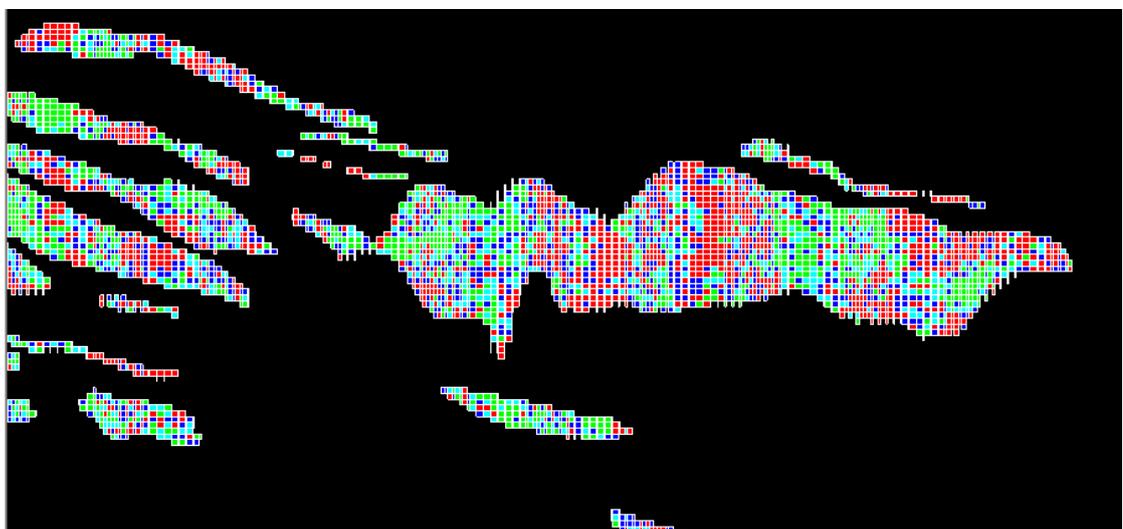
Simulación 32



Simulación 34



Simulación 36



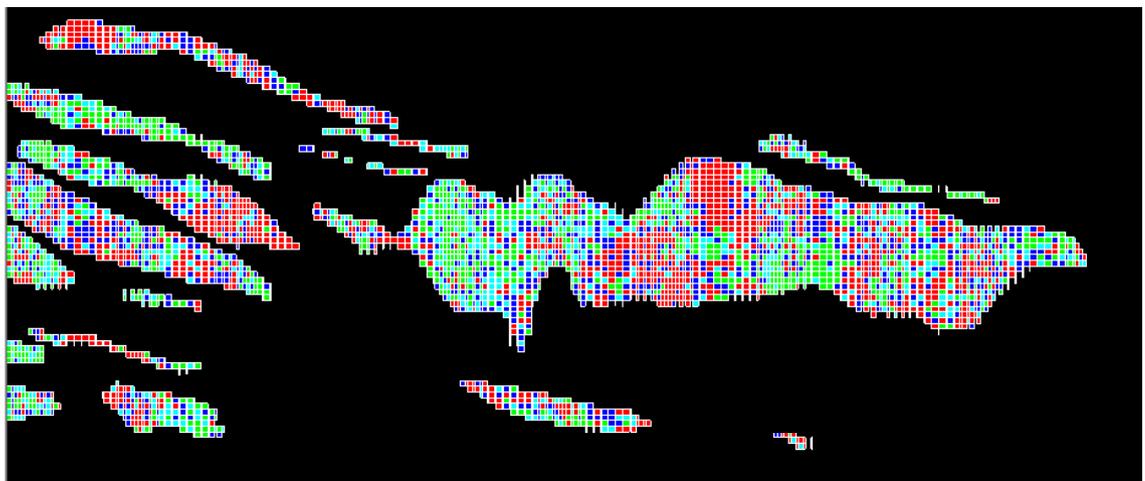
Simulación 37



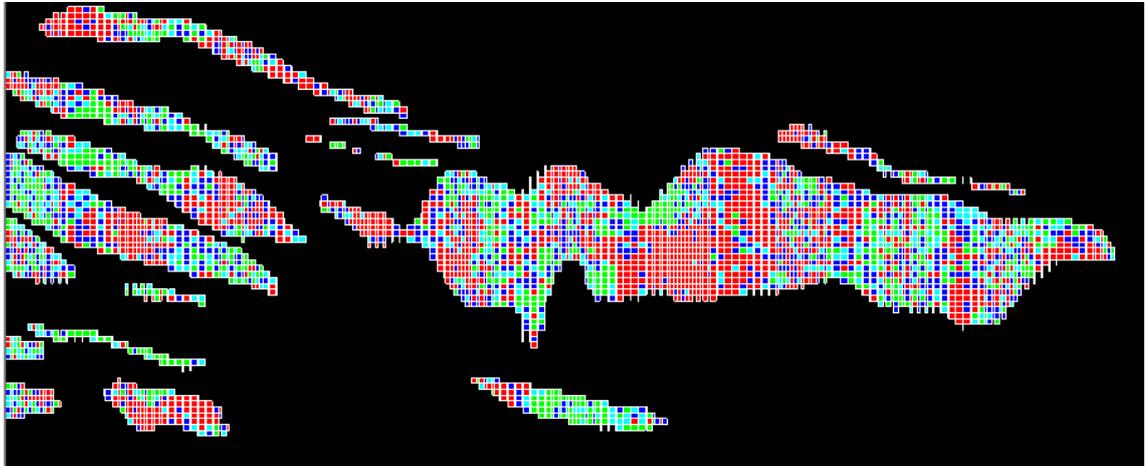
Simulación 38



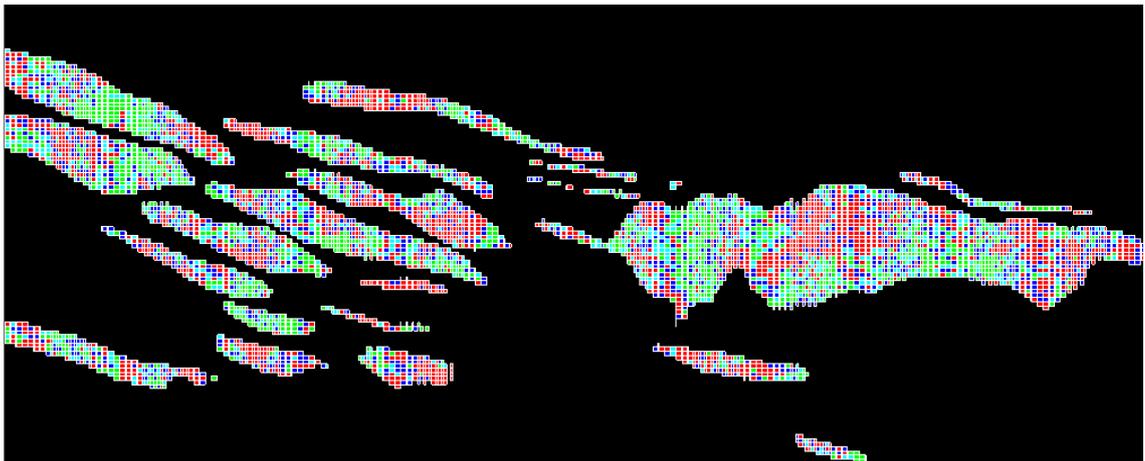
Simulación 39



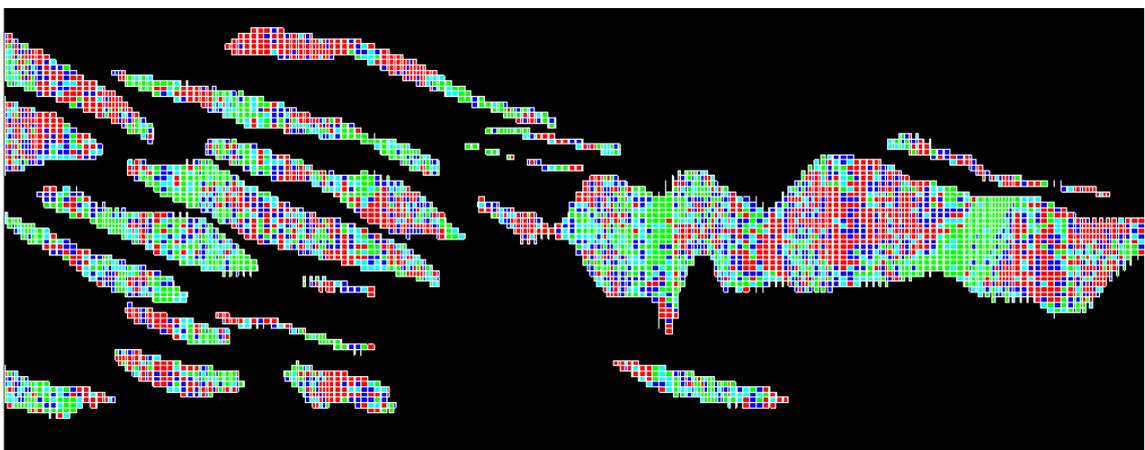
Simulación 41



Simulación 43



Simulación 45

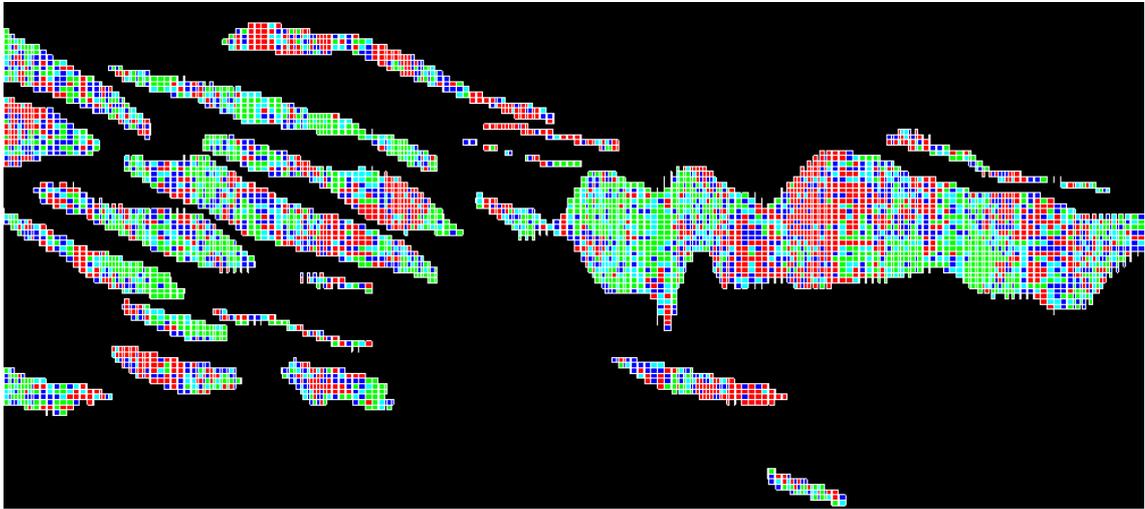




Análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de leyes de una unidad básica de explotación.



Simulación 49



Simulación 50

