

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Sr. Roberto Fustos

**CATEGORIZACIÓN DE RECURSOS MINERALES: ANÁLISIS DE VARIABLES Y VALORES
DE CORTE**



BYRON GABRIEL VEGAS FICA

Informe de Memoria de Título

Para optar al Título de
Ingeniero Civil de Minas

Marzo, 2024

Resumen

La categorización de recursos minerales es una etapa crítica cuando se trata del estudio de un depósito. Dependiendo de todos los procesos anteriores a su realización, es la etapa encargada de la entrega de resultados relacionados con la calidad de la estimación realizada y de la confiabilidad de los recursos obtenidos. Es por ello que una completa metodología de análisis se hace necesaria.

Gracias a múltiples intentos en busca de estandarizar este proceso es que surge la creación del comité de estándares internacionales para reportar reservas minerales CRIRSCO. Los países miembros de este comité comenzaron a crear códigos internacionales en búsqueda del similar entendimiento entre países sobre los conceptos fundamentales al momento de categorizar y en cuanto a entrega de responsabilidades e información mínima a incluir en los informes sobre prospectos de exploración minera.

En la actualidad no existe un método estándar para definir categorías en cualquier tipo de depósito, sino que tanto los métodos para hacerlo como los parámetros o valores de corte utilizados varían de depósito en depósito y de persona en persona.

Mediante la comparación y análisis de métodos de categorización el objetivo de este trabajo es presentar en un caso real el comportamiento de las variables dentro de un depósito, aplicando a su vez diversos métodos de categorización. Esto es posible gracias a la revisión de informes técnicos de prospectos mineros en la base de datos SEDAR de la TSX (Toronto Stock Exchange) canadiense. De donde fueron extraídos los métodos más utilizados (así como también los valores de corte) al momento de categorizar recursos en la industria por parte de las personas competentes responsables de la redacción y firma de dichos informes.

Finalmente, existe un sinnúmero de métodos de categorización cada uno de los cuales está enfocado en distintas variables para lograr su cometido. El análisis de variables realizado lleva a definir como más confiables los sectores mayormente muestreados, dependiendo de la persona que realice el análisis de confiabilidad de los recursos en un depósito las cantidades de recursos asignados en cada una de las categorías. La calidad al momento de la definición de valores de corte para cada una de las variables presentes en el proceso de categorización tiene alta dependencia de la experiencia del profesional encargado del análisis del depósito, así como también la certeza del proceso de categorización.

Abstract

Categorization of mineral resources is a critical stage when it comes to the study of a deposit. Depending on all the processes prior to its completion, it is the stage in charge of delivering results related to the quality of the estimate made and the reliability of the resources obtained. This is why a complete analysis methodology is necessary.

Thanks to multiple attempts to standardize this process, the creation of the international standards committee for reporting mineral reserves CRIRSCO emerged. The member countries of this committee began to create international codes in search of similar understanding between countries on the fundamental concepts when categorizing and regarding the delivery of responsibilities and minimum information to be included in reports on mining exploration prospects.

Currently there is no standard method for defining categories in any type of deposit, but both the methods for doing so and the parameters or cut-off values used vary from deposit to deposit and from person to person.

Through the comparison and analysis of categorization methods, the objective of this work is to present in a real case the behavior of the variables within a deposit, applying various categorization methods. This is possible thanks to the review of technical reports of mining prospects in the SEDAR database of the Canadian TSX (Toronto Stock Exchange). From where the most used methods (as well as the cut-off values) were extracted when categorizing resources in the industry by the competent people responsible for writing and signing said reports.

Finally, there are endless categorization methods, each of which is focused on different variables to achieve its goal. The analysis of variables carried out leads to defining the most sampled sectors as more reliable, depending on the person who performs the reliability analysis of the resources in a deposit, the amounts of resources assigned in each of the categories. The quality at the time of defining cut-off values for each of the variables present in the categorization process is highly dependent on the experience of the professional in charge of analyzing the deposit, as well as the certainty of the categorization process.

Indice

1.	Introducción.....	10
2.	Descripción del problema	12
3.	Motivación	13
4.	Objetivos	13
	4.1 Objetivos generales.....	13
	4.2 objetivos específicos.....	13
5.	Alcance.....	13
6.	Metodología.....	14
7.	Marco teórico y estado del arte.....	15
	7.1 Exploración.....	15
	Técnicas de exploración.....	17
	7.2 Geología – Modelamiento geológico.....	21
	Geología	21
	Modelo Geológico	21
	Metodología de modelamiento geológico explícita	22
	Metodología de modelamiento geológico implícita	23
	Continuidad Geológica.....	24
	7.3 Estudio exploratorio de datos.....	25
	7.4 Interpretación de Resultados.....	27
	7.5 Estimación de recursos minerales	28
	7.5.1 Introducción/Geología	28
	7.5.2 Variables regionalizadas	29
	7.5.3 Análisis variográfico	30
	7.5.4 Estimación por Inverso de la Distancia.....	41
	7.5.5 Estimación por Kriging.....	42
	7.6 Categorización de recursos minerales	46

7.6.1	Códigos guía de Categorización de recursos.....	46
7.6.2	Métodos de categorización de recursos	51
7.6.3	Aplicación o aproximación al problema	54
8.	Aplicación	60
8.1.	Caso de Estudio Real	60
8.1.1	Descripción	60
8.1.2	Análisis.....	64
8.1.3	Estimación de leyes	70
8.1.4	Categorización de recursos.....	83
8.1.5	Análisis de resultados.....	90
9.	Conclusiones y discusiones.....	112
10.	Bibliografía.....	113

Figura 1: Cadena de acciones de una prospección minera.	16
Figura 2: Mina Escondida (Chile)	17
Figura 3: Situación ideal de los sondeos, en relación a la mineralización [Moon, 2006]	19
Figura 4: Ejemplo distribución de muestreo.....	20
Figura 5: Modelo Geológico yacimiento Rio Blanco generado por método implícito con software Leapfrog Geo. Tomado de Solé et al. 2014.....	22
Figura 6: Secciones verticales y plantas utilizadas en la extrusión de sólidos para la metodología de modelamiento explícito. Tomado de Solé et al 2014.....	22
Figura 7: Secciones y plantas utilizadas en la extrusión de sólidos para aplicar modelamiento explícito.	22
Figura 8: Ejemplo gráfico del resultado de Radial Basis Functions (RBF), para la interpolación de superficies, determinando la "superficie de valor 0", que corresponde al contacto entre dos categorías de datos. Tomado de Vukasovic 2015.....	24
Figura 9: Distintos modelos geológicos del yacimiento Rio blando, generados con el método implícito que utiliza interpolador llamado función de base radial. Modificada de Solé et al., 2014	24
Figura 10: Región de tolerancia $T(h)$, vector de búsqueda h	31
Figura 11: Componentes de un variograma.....	31
Figura 12: Variograma experimental de ejemplo (concentraciones de cobalto)	32
Figura 13: Mapa variográfico con direcciones principales de anisotropía	33
Figura 14: Mapas variográficos y variogramas experimentales según anisotropías.....	33
Figura 15: Relación entre la regularidad espacial de una variable regionalizada (arriba) y el comportamiento en el origen del variograma.....	35
Figura 16: Variograma con elementos principales	36
Figura 17: Variograma sin meseta.....	36
Figura 18: Variograma pepítico	37
Figura 19: Variograma esférico	38
Figura 20: Variograma Exponencial.....	38
Figura 21: Variograma Gaussiano	39
Figura 22: Variograma Potencia	40
Figura 23: Países miembros de CRIRSCO.....	46
Figura 24: Relación general entre resultados de exploración, recursos y reservas minerales	48
Figura 25: Ejemplo cuadro general de relación Recursos y Reservas mineras. código Canadiense, Australiano, Chileno, Sudafricano, Estadounidense y Europeo	49

Figura 26: Geología regional área de estudio.....	61
Figura 27: Vista ubicación y forma cuerpo mineralizado.....	63
Figura 28: Despliegue de sondajes interceptando zona mineralizada	64
Figura 29: Histograma Ley Muestras.....	65
Figura 30: Histograma Largo Muestras	66
Figura 31: Histograma Largo Interceptos.....	66
Figura 32: Histograma Compósitos	67
Figura 33: Gráfico cuantil a cuantil Muestras vs Compósitos.....	67
Figura 34: Gráfico probabilidad acumulada, histodrama y diagrama de caja de los compósitos transformados a logaritmo	68
Figura 35: Mapa variográfico	68
Figura 36: Variogramas direccionales	69
Figura 37: Modelo Variograma ajustado.....	69
Figura 38: Gráfico Tonelaje vs Ley modelos bloques obtenidos.....	72
Figura 39:Swath Plot para métodos ID2 y KO (bloque 5x5x5m).....	74
Figura 40: Histograma Compósitos	75
Figura 41: Histogramas de modelos resultantes estimación.....	75
Figura 42: Gráfico cuantil a cuantil Compósitos vs Bloques estimados	76
Figura 43: Vista sección resultados estimación mediante Kriging. Ley de cobre.	77
Figura 44: Secciones de muestra, bloques resultantes de estimación Kriging Ordinario y sondajes	77
Figura 45: Secciones de muestra bloques resultantes estimación por Kriging Ordinario y sondajes	78
Figura 46: Vista sección resultados estimación. Varianza de Kriging	78
Figura 47: Vista sección resultados estimación. Distancia promedio	79
Figura 48: Vista sección resultados estimación. Número de muestras	79
Figura 49: Vista sección resultados estimación. Número sondajes utilizados.....	79
Figura 50: Vista sección resultados estimación por Inverso de la Distancia. Ley de cobre	80
Figura 51: Secciones de muestra bloques resultantes estimación por Inverso de la Distancia y sondajes.....	80
Figura 52: Seccion de muestra bloques resultantes estimación por Inverso de Distancia y Sondajes	81
Figura 53: Sección resultado estimación. Distancia promedio	81
Figura 54: Sección resultados estimación. Número de sondajes.....	82
Figura 55: Sección resultados estimación. Número de muestras	82

Figura 56: Correlación variables resultantes estimación por Kriging Ordinario	83
Figura 57: Correlación variables estimación por Inverso de distancia.....	84
Figura 58: Resumen distribución de tonelajes según método de categorización aplicado	91
Figura 59: Gráfico Tonelaje vs Ley bloques resultantes de categorización por densidad de sondajes (Estimados mediante Kriging Ordinario)	92
Figura 60: Vista sección bloques por categoría y ubicación de sondajes. Bloques resultantes de categorización por densidad de sondajes (Estimados mediante Kriging Ordinario).	93
Figura 61: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por densidad de sondajes de bloques estimados por Inverso de la Distancia	94
Figura 62: Vista sección bloques por categoría y ubicación de sondaje. Bloques resultantes de categorización por densidad de sondajes (Estimados mediante Inverso de la Distancia.	95
Figura 63: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por distancia media, nh y nm - Estimación por Kriging Ordinario	96
Figura 64: Vista bloques resultados Categorización por distancia media, nh y nm - Estimación por Kriging Ordinario. Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.	97
Figura 65: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por distancia media, nh y nm - Estimación por Inverso de la Distancia	97
Figura 66: Vista bloques resultado de Categorización por distancia media, nh y nm - Estimación por Inverso de la Distancia. Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.	98
Figura 67: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por distancia media - Estimación por Kriging Ordinario	99
Figura 68: Vista resultados Categorización por distancia media - Estimación por Kriging Ordinario.	100
Figura 69: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por distancia media - Estimación por Inverso de la Distancia.....	100
Figura 70: Resultados Categorización por distancia media - Estimación por Inverso de la Distancia.	101
Figura 71: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización según distancia variográfica - Estimación por Kriging Ordinario	102
Figura 72: Resultados Categorización por Distancia Variográfica - Estimación por Kriging Ordinario.	103
Figura 73: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización según malla de muestreo - Estimación por Kriging Ordinario	103

Figura 74: Vista resultados categorización por malla de muestreo - Estimación por Kriging Ordinario.	104
Figura 75: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por rangos de varianza media escalados - Estimación por Kriging Ordinario	105
Figura 76: Resultados categorización por varianza media escalada - Estimación por Kriging Ordinario.	106
Figura 77: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por rangos de varianza - Estimación por Kriging Ordinario	106
Figura 78: Resultados categorización por rangos de varianza - Estimación por Kriging Ordinario.	107
Figura 79: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por coeficiente de variación - Estimación Kriging Ordinario	108
Figura 80: Vista sección de bloques Categorización por coeficiente de variación - Estimación Kriging Ordinario.	109
Figura 81: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por Diehl & David - Estimación por Kriging Ordinario	110
Figura 82: Vista sección resultados Categorización por Diehl & David - Estimación por Kriging Ordinario.	111

Tabla 1: Características sondajes sobre veta	65
Tabla 2: Estadísticas básicas muestras y compósitos	66
Tabla 3: Parámetros de modelo ajustado	69
Tabla 4: Características modelos de bloques	70
Tabla 5: Parámetros de estimación utilizados para Kriging Ordinario	70
Tabla 6: Parámetros de estimación para aplicación Inverso de Distancia.....	71
Tabla 7: Tabla valores Tonelaje y Ley media por método de estimación.....	72
Tabla 8: Resumen estadísticas compósitos y bloques	73
Tabla 9: Clasificación de recursos.....	86
Tabla 10: Estimación distancia de corte para categorización	88
Tabla 11: Variables por método de categorización	90
Tabla 12: Resumen resultados Categorización por método	90
Tabla 13: Resultados categorización por densidad de sondajes y estimación por Kriging Ordinario	92
Tabla 14: Resultados categorización por densidad de sondajes y estimación por Inverso de la distancia	94
Tabla 15: Resultados categorización por distancia media, nh y nm y estimación por Kriging Ordinario	96
Tabla 16: Resultados categorización por distancia media, nm y nh, estimación por Inverso de la distancia	97
Tabla 17: Resultados categorización por distancia media y estimación por Kriging Ordinario	99
Tabla 18: Resultados categorización por distancia media y estimación por Inverso de la distancia	100
Tabla 19: Resultados categorización por distancia variográfica y estimación por Kriging Ordinario	102
Tabla 20: Resultados categorización por mallas de muestreo y estimación por Kriging Ordinario	104
Tabla 21: Resultados categorización por varianza media escalada y estimación por Kriging Ordinario	105
Tabla 22: Resultados categorización por rangos de varianza y estimación por Kriging Ordinario	107
Tabla 23: Resultados categorización por coeficiente de variación y estimación por Kriging Ordinario	108
Tabla 24: Resultados categorización por Diehl & David y estimación por Kriging Ordinario	110

1. Introducción

La categorización de recursos minerales es una etapa crítica dentro de la evaluación de un depósito, ya que se encarga de analizar la información disponible sobre este y determinar qué tan confiable son los recursos resultantes de la estimación. Con esto, permite tomar la decisión de llevar a cabo o no la explotación de un depósito [3].

En el marco nacional e internacional, existen códigos que corresponden a documentos normativos, aplicables a la emisión de información de carácter público de activos mineros. Como una búsqueda de estandarizar las regulaciones y las prácticas al momento de entregar la información en bolsas de intercambio internacionales, estos códigos están además relacionados la similitud en cuanto a sus definiciones e interpretaciones de lo que son recursos, reservas y las categorías de cada clasificación.

Según el criterio de una persona certificada por organismos reguladores (como lo es en Chile la Comisión minera) se clasifican en categorías de recursos medidos, indicados e inferidos los bloques, en orden decreciente de confiabilidad y dependiendo de esta última su categoría.

El siguiente paso en el proceso; mediante la información obtenida del estudio de confiabilidad de recursos. Los bloques categorizados como medidos e indicados, pasan a la etapa de análisis de factibilidad de explotación lo que comúnmente es conocido como categorización de reservas minerales. Consecuencia de que, para transformar un recurso en reserva, se deben aplicar factores modificadores (técnicos, económicos, financieros, regulaciones legales y gubernamentales) aplicados a la minería y a la comercialización. Obteniendo como resultado reservas minerales probadas (provenientes de recursos medidos) y probables (provenientes de recursos indicados y en ocasiones de medidos), en orden decreciente de su factibilidad de explotación [11].

La información analizada al momento de categorizar recursos es propia de todo el proceso previo a esta etapa, por lo que su calidad y sus resultados dependen de las buenas prácticas anteriormente aplicadas.

En la actualidad, es posible encontrar un sinfín de métodos utilizados para asignar categorías a los bloques, dependiendo del tipo de yacimiento. Ya que no existe una guía para hacerlo [15], la elección del mejor método para categorizar los recursos del depósito en estudio se deja a criterio de una persona certificada por un organismo regulador (persona competente).

Si se realiza una clasificación de estos métodos, se separarían en criterios geológicos, criterios geométricos y criterios geoestadísticos, dependiendo de las variables que utilicen para clasificar los recursos. Idealmente, la combinación de más de uno de ellos y la inclusión de la mayor cantidad de información posible, debiese optimizar el proceso.

Estudios anteriores muestran una serie de métodos para definir la categoría de los bloques de un modelo, según distintas variables; pero no existen estudios de comparación de estos métodos, en cuanto a los resultados entregados, ni de análisis en cuanto a la variación de sus parámetros. Es por esto que se plantean las interrogantes: ¿Qué método entrega los mejores resultados al categorizar? ¿Cuáles son las variables más utilizadas para categorizar?

Para llevar a cabo la propuesta y responder a las interrogantes planteadas, se realiza en primera instancia una investigación y recolección de los métodos (y variables) más utilizados al momento de categorizar. Se diseña un caso de estudio en base a datos de sondeos reales, el cual es analizado mediante la aplicación de los métodos producto de esta investigación.

2. Descripción del problema

El problema enfrentado en esta memoria de título tiene relación con la categorización de recursos minerales, mediante la aplicación de métodos usados comúnmente al evaluar proyectos en minería.

Generalmente, al momento de realizar informes de prospectos mineros que posteriormente serán presentados ante un ente público nacional o internacional, como se indica explícitamente en los códigos reguladores internacionales, se debe exponer la mayor cantidad disponible de información referente al depósito estudiado. La persona que realiza dicho informe técnico (Persona Competente), es la responsable de emitir a su juicio inferencias sobre el depósito además de categorizar los recursos y reservas presentes en el depósito con el debido respaldo. De esta forma determina la confiabilidad de cada uno de los bloques. Parte importante de dicho informe (análisis) técnico es la entrega de resultados mediante la categorización de recursos minerales presentes. Al momento de asignar la categoría a los bloques, la persona competente responsable de aquello considera las variables que estime necesarias.

Dependiendo del tipo de depósito en análisis y de la persona responsable de su estudio, es posible la utilización de un gran número de variables para realizar la categorización. Por ejemplo, en el caso de los depósitos epitermales de oro predominan los métodos geométricos, pero no existe la certeza de que sean los métodos óptimos para este tipo de depósito. De esta forma se demuestra que la categorización es un proceso demasiado subjetivo por lo que es necesario que la persona competente responsable de emitir juicio sobre la confiabilidad de los bloques y sus características estimadas, cuente con toda la información posible.

El caso ideal sería que, al momento de asignar categorías a los bloques, se utilice la mayor cantidad de variables posibles. Es por esto que mediante la comparación y análisis tanto de métodos tradicionales de categorización, como de las variables más utilizadas por cada tipo de depósito se entrega una visión más completa sobre de la confiabilidad del modelo.

3. Motivación

Es posible hacer inferencias a través de análisis de resultados de diferentes métodos de categorización acerca del comportamiento de las variables involucradas, y de esta forma entregar una visión más completa (mejor guía) sobre las características del depósito en estudio. La idea además de generar los resultados de un método comúnmente utilizado para categorizar un tipo de depósito, comparar este con distintos métodos para obtener así mayor conocimiento del depósito estudiado.

4. Objetivos

4.1 Objetivos generales

El objetivo general de esta memoria de título es resumir, analizar y comparar los resultados de métodos actualmente utilizados en el proceso de categorización de recursos minerales. Esto se materializa mediante la creación de un código en el software RStudio con el fin de automatizar cada una de las clasificaciones y entregar un resumen de resultados en forma clara.

4.2 objetivos específicos

- Recopilación de metodologías aplicadas actualmente para categorizar recursos.
- Mediante la creación de un código; aplicación de los métodos encontrados a una base de sondeos.
- Comparación y análisis de resultados.

5. Alcance

Los alcances de este trabajo son los siguientes:

- La evaluación de categorización solo se aplica a recursos minerales, no a reservas.
- La etapa de estimación de recursos, se limita a los métodos Kriging Ordinario (KO) e Inverso de la distancia (ID).
- Para categorizar recursos minerales, se aplican las prácticas presentes en información pública de la bolsa canadiense (TSX) [9].
- Se considera para el caso de estudio, que la obtención y tratamiento de información se realiza de manera óptima, es decir, que su aseguramiento y control de calidad es adecuado.
- La etapa de modelamiento, se realiza de manera óptima y no es fuente de incertidumbre.

6. Metodología

El procedimiento de trabajo para abordar el objetivo/problema propuesto consiste la realización de una serie de tareas aplicadas a una base de datos de sondeos para simular el estudio de un depósito.

-Estudio de métodos de categorización más utilizados en la industria extractiva del cobre y las variables que estos incluyen.

-Análisis de variables más utilizadas según tipo de depósito.

-Proceso tradicional de generación de modelo de bloques y estimación de recursos.

-Análisis de variables necesarias a utilizar en el proceso de categorización, así como de sus rangos de interfaces comúnmente utilizados en los informes técnicos estudiados.

-Una vez obtenidas y analizadas las variables de interés, se procederá a aplicar los métodos tradicionales de categorización según corresponda.

-Análisis crítico y comparación de resultados.

7. Marco teórico y estado del arte

7.1 Exploración

Para definir un modelo característico de un depósito en estudio, es necesaria información como la calidad, cantidad y la ubicación espacial del elemento de interés a través de todo el modelo. Es ideal el conocimiento de toda la información real en todo el espacio que abarque. Debido a que esto además de no ser factible económicamente, no lo es operativamente, se realiza mediante la inclusión de toda la información disponible, la cual es obtenida mediante distintos mecanismos.

A través del tiempo, se han creado una gran cantidad de métodos determinísticos cuyo objetivo es representar de la mejor forma el depósito estudiado y sus variables, mediante la utilización de información puntual.

La certeza al momento de analizar qué tan confiable es la evaluación de un depósito, está dada principalmente por dos factores: la cantidad y la calidad de la información proporcionada sobre este. De esta forma, idealmente, contando con la mayor cantidad de información posible y de mejor calidad, la evaluación realizada del yacimiento será mucho más confiable. La calidad de la información es determinada por el o los responsables encargados del estudio del depósito, mediante una revisión relacionada con protocolos de aseguramiento y control de calidad en cuanto a los procedimientos de obtención de información (obtención y análisis de muestras). Debido a la necesidad de altas cantidades de información, para la realización de los análisis es que la etapa de exploración se hace muy costosa, por lo que nace la necesidad de buscar un punto de equilibrio entre la cantidad de información necesaria y del presupuesto disponible para la extracción de toda la cantidad de información posible.

En general, la información obtenida de las campañas de exploración viene dada por objetos puntuales, que contienen la ubicación espacial de la muestra, así como también el valor de la característica estudiada en dicho punto o espacio muestreado. Hoy en día existe una gran cantidad de métodos para extraer muestras e información de un área en estudio, por un lado, métodos directos (con invasión del terreno) y también, indirectos (sin intervención del terreno).

A continuación, se presenta un esquema general del proceso de exploración.

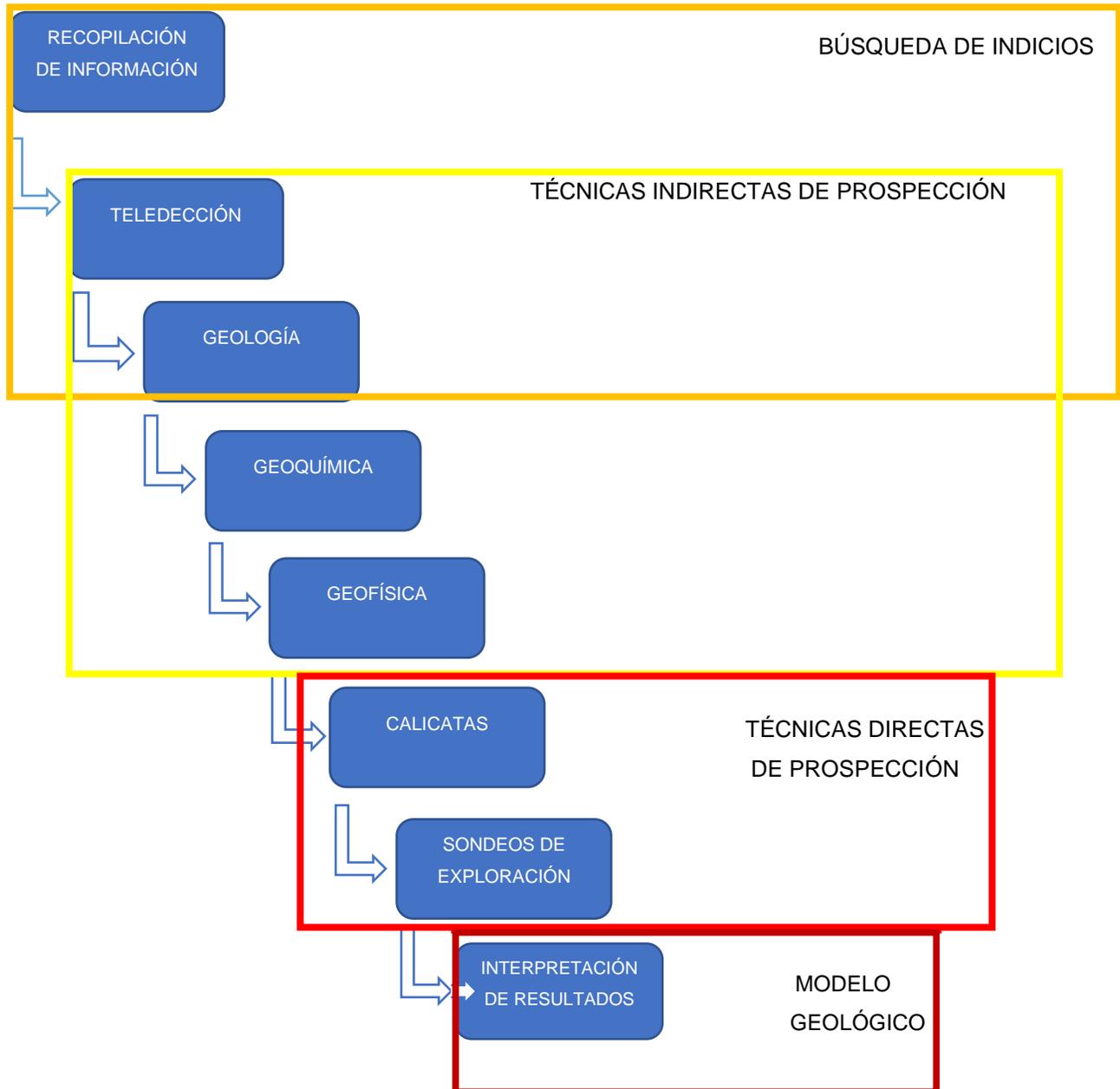


Figura 1: Cadena de acciones de una prospección minera.

Con lo anterior y después de una serie de procesos aplicados a los datos obtenidos, idealmente se conocerá la forma del depósito, su calidad en cuanto a valores de concentración de mineral con la mayor precisión posible y la confiabilidad de los cálculos e inferencias realizadas.

Técnicas de exploración

Existen variadas y multidisciplinarias técnicas de exploración, las cuales son complementarias y secuenciales. La información o inferencias realizadas en una etapa, son utilizadas en la siguiente, todo con el propósito de definir los límites y características del cuerpo mineralizado.

El correcto desarrollo de cada una de estas tareas, determinará el éxito de la exploración como parte del proceso minero.

Recopilación de Información

El primer paso para comenzar el proceso de exploración, consta en realizar una recopilación de información disponible sobre la zona en estudio, ya sea de exploraciones o incluso explotaciones anteriores y presentes, entre otros.

Teledetección y GIS

La teledetección comprende un amplio conjunto de técnicas para el estudio de materiales utilizando la radiación electromagnética para registrar el comportamiento del terreno ante su actuar, en conjunto con un sistema de georreferencia. Esta señal se obtiene con equipos de medida remotos, inalámbricos. Estos equipos se emplean instalados en aviones y satélites.



Figura 2: Mina Escondida (Chile)

Geofísica y Geoquímica

Las técnicas geofísicas y geoquímicas miden en general datos específicos que tienen en mayor o en menor medida todos los minerales de interés y que dan lugar a una gran cantidad de datos digitales referenciados geográficamente.

En general, los objetivos de este tipo de prospección son de dos tipos, para definir la geología regional (por ejemplo, mapas de susceptibilidad magnética) o para directamente buscar la presencia de depósitos minerales.

Una vez finalizadas las fases anteriores de prospección, es necesario tener una zona definida de interés en donde se necesite obtener más detalle de las características de esta zona de estudio acotada. Por lo anterior se recurre a métodos directos de obtención de información.

Calicatas

Corresponden a zanjas que se crean en la superficie hasta alcanzar la roca para conocer por ejemplo la estructura y calidad de esta.

Las calicatas cuentan con las siguientes limitaciones generales:

- La profundidad no suele exceder los 4 m
- La presencia de agua limita su utilidad.
- El terreno debe poder excavar por métodos mecánicos.

Sondajes de Exploración

La forma de obtener más detalles de la zona en estudio, es la toma de muestras en profundidad, por medio de una o varias campañas de sondajes.

Al tratarse de la forma definitiva de obtención de información, las campañas de sondajes son vitales para definir el valor económico de una mineralización en estudio y proveen la información necesaria para la verificación o rechazo de todas las ideas planteadas concluyentes del resto de las etapas de la exploración.

Dependiendo del tipo de muestras extraídas encontramos dos clasificaciones, perforación de exploración con recuperación de testigo y con recuperación de detritos. Las diferencias entre estas dos técnicas están dadas por obviamente el tipo de muestra extraída y de la calidad en cuanto a información extraíble de la muestra. La primera entrega una muestra que nos dará mucha más información, debido a su forma de testigo y será también de más fácil interpretación. A la vez, se trata de una técnica de obtención de información más costosa que la obtención de detritos. Donde

en general se dificulta realizar inferencias acerca de variables distintas de la ley del elemento buscado.

En el caso de la extracción de muestras por testigos. Un análisis de las muestras extraídas nos lleva a la obtención de la información buscada como valores de concentración de elementos, calidad de roca, litología, RQD, entre otros. Lo que es más completo, ya que nos entrega además de datos de presencia/concentración de minerales, información geomecánica, cualitativa o de presencia de estructuras en la zona de estudio.

Campañas de exploración

Una campaña de exploración corresponde al conjunto de tareas realizadas para la obtención de la información necesaria para

Una de las decisiones más difíciles en la etapa de exploración está relacionada con decidir cuándo comenzar la campaña de exploración y cuando terminarla. Es decir, cuándo se tendrá la información suficiente para definir el cuerpo mineralizado con precisión y dar por terminada la exploración.

Las primeras perforaciones o tomas de muestras en profundidad se realizan con el fin de conocer la extensión del cuerpo mineralizado y así también su forma, por lo que no es necesario realizar perforaciones de alta calidad como lo son las de testigo, sino más conveniente se vuelve realizar perforaciones con obtención de detritos que son menos costosas.

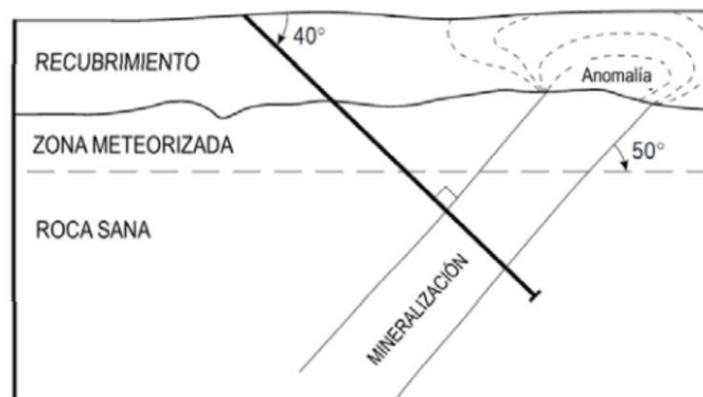


Figura 3: Situación ideal de los sondeos, en relación a la mineralización

Los requisitos de una campaña de exploración juegan un papel importante en la definición del tipo de perforación a utilizar. Por ejemplo, si la zona a estudiar se hace muy compleja

geológicamente, o bien, la información anterior disponible no es suficiente para definir zonas objetivo de interés, para comenzar se hace conveniente la utilización del método con obtención de detritos.

La elección del tipo de sondaje y del diseño de la campaña de exploración depende de:

- La geometría del cuerpo mineralizado
- La calidad necesaria de las muestras
- Profundidad y diámetro de perforación
- Accesibilidad de la máquina
- Energía disponible

Mallas de sondeos

La decisión acerca del número de sondajes y de su disposición geométrica es compleja y de extrema importancia, interviniendo factores de distinto tipo:

- Factores geológicos
- Factores Económicos
- Factores estadísticos

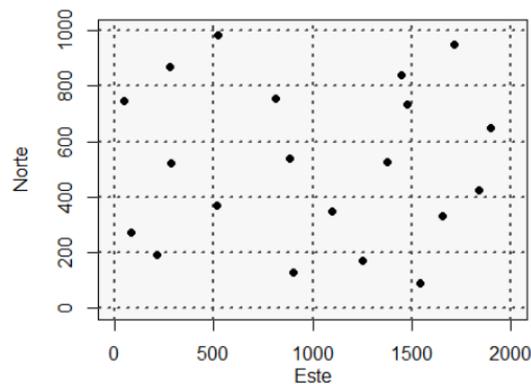


Figura 4: Ejemplo distribución de muestreo.

En general, el primer sondeo se realiza donde se encontró la anomalía más notable en los procesos anteriores. Idealmente el primer sondaje respaldará las inferencias realizadas anteriormente sobre el cuerpo mineralizado. Definiendo el espaciamiento y configuración de los sondeos posteriores dependiendo del tamaño de la anomalía encontrada.

Las mallas de sondeos pueden ser regulares o irregulares. La geología tiende a guiar principalmente a mallas irregulares debido a su complejidad, pero son las regulares las que entregan

una mejor distribución de la información, por ende, información más útil. Pueden ser estas rectangulares, triangulares o poligonales, siendo las primeras dos las más utilizadas.

Las mallas definidas en un principio, están muy propensas a sufrir variaciones para mejor conocimiento de la estructura geológica presente.

Comentarios Generales

Lo importante del punto anterior está relacionado con el aseguramiento y control de calidad en cuanto a la obtención de información de la zona o depósito de estudio. Se incluyen actividades realizadas para como el nombre lo dice el aseguramiento y control de la calidad de la información obtenida y son aplicadas en pro de evitar errores y sesgos en todo el proceso de obtención de datos. Lo anterior debido a que la calidad de información también es considerada al momento de categorizar recursos.

7.2 Geología – Modelamiento geológico

Geología

Ciencia básica para el estudio de la tierra, uno de los aspectos más importantes que aporta es el de la génesis de los depósitos de elementos de interés, para saber dónde y cómo aparecen en la corteza terrestre. Punto muy importante en la interpretación y acotación de dominios de características geológicas similares.

Una vez realizada la recopilación de los datos disponibles, será necesario el estudio de todos ellos para lograr una interpretación lo más cercana a la realidad posible. Esto se materializa realizando un modelo geológico tridimensional.

Modelo Geológico

Un modelo geológico es en la industria minera una construcción de cuerpos cuyas características geológicas son similares. Este puede representar los volúmenes de litología, alteración, mineralización, estructuras u otro tipo de característica geológica del macizo rocoso. Están constituidos de unidades geológicas que representan volúmenes que han experimentado procesos geológicos similares con una identidad propia y un comportamiento geoestadístico propio y definido [21].

En esencia esta metodología consiste en la proyección ortogonal de la información geológica (litología, mineralización, alteración, etc.) contenida en los sondajes sobre planos conocidos como secciones y plantas. Estas secciones son interpretaciones geológicas del geólogo de modelamiento, quien con ayuda de algún software especializado en modelamiento geológico logra digitalizar dichas secciones geológicas a través del uso de polilíneas auxiliares. La función de las polilíneas auxiliares es unir los puntos proyectados en los planos y darle la forma explícita a la superficie interpretada. Una vez que estas secciones se han generado, se procede a interpretar y digitalizar con las polilíneas auxiliares los niveles del yacimiento, los cuales contienen el trazado de las superficies geológicas interpretadas previamente en secciones. Finalmente, en base a estos niveles, el software de modelamiento geológico genera una malla de triángulos que va uniendo los niveles del cuerpo mineralizado.

Metodología de modelamiento geológico implícita

El avance tecnológico, especialmente la computación, ha permitido generar herramientas para manejar grandes cantidades de datos, y facilitar la construcción de modelos tridimensionales en base a funciones matemáticas capaces de generar superficies y volúmenes [25].

El modelamiento implícito es una metodología para generar superficies considerando los datos y parámetros establecidos por el usuario en base a funciones matemáticas específicas de volumen. Se puede aplicar a variables categóricas (litología), como también a variables continuas en el espacio (leyes). La función matemática más eficiente para el modelamiento implícito es la “Radial Basis Function” (RBF) [25].

Estas funciones matemáticas definen una superficie al determinar todos los puntos contenidos a una distancia “0” entre dos sets de datos, por lo tanto, desde un punto “x”, se calcula la distancia más cercana al contacto. Como ejemplo en la Figura 8, se observa una sección vertical de un cuerpo mineral, donde las líneas azules representan el estéril y líneas rojas la mena. Para calcular la superficie que representa el contacto entre mena/estéril, se busca la distancia=0 entre ambos conjuntos de datos. Al utilizar las RBF, se calculan todas las distancias en las tres dimensiones del espacio [25].

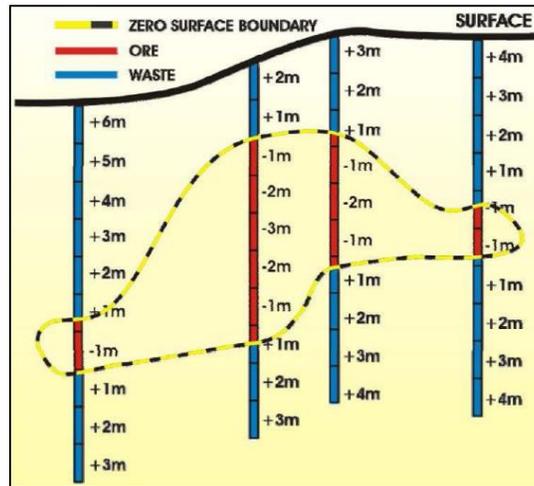


Figura 8: Ejemplo gráfico del resultado de Radial Basis Functions (RBF), para la interpolación de superficies, determinando la "superficie de valor 0", que corresponde al contacto entre dos categorías de datos.

La nueva metodología implícita logra generar modelos con gran rapidez, permitiendo al Geólogo poder generar varios modelos con distintos parámetros geológicos (Figura 9).

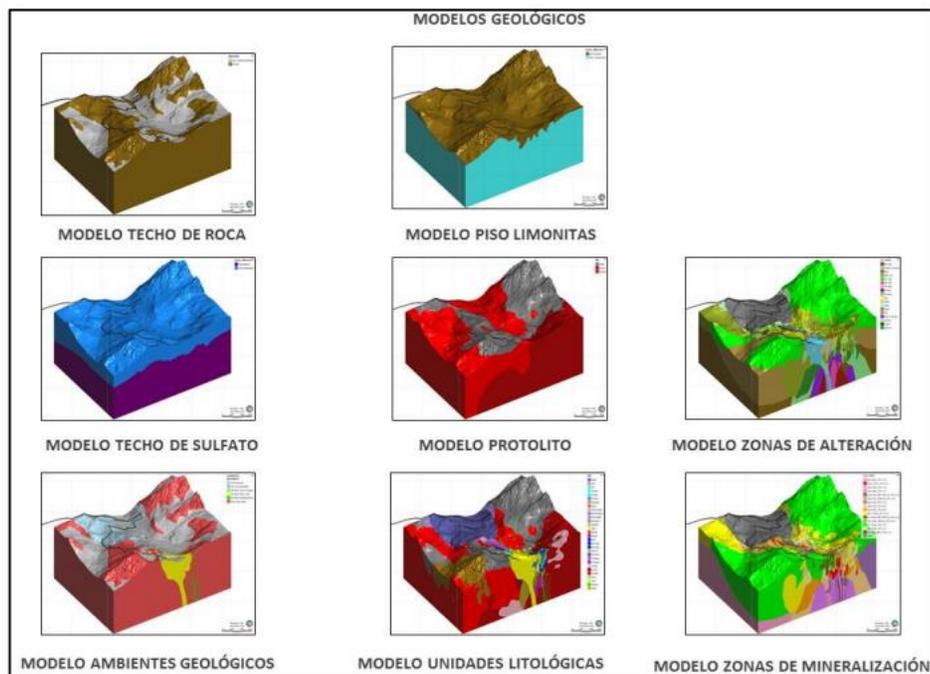


Figura 9: Distintos modelos geológicos del yacimiento Rio blando, generados con el método implícito que utiliza interpolador llamado función de base radial.

Continuidad Geológica

La continuidad geológica se refiere a la extensión y conexión de características geológicas o unidades geológicas en el subsuelo o en la superficie de la Tierra. En el contexto de la geología, la

continuidad se relaciona con la forma en que las rocas, estructuras y cuerpos geológicos se distribuyen en el espacio y cómo se relacionan entre sí a lo largo de una región o área geográfica.

Algunos aspectos importantes relacionados con la continuidad geológica son los siguientes:

Litología Continua: Se refiere a la persistencia o extensión de una unidad litológica particular (tipo de roca) en el subsuelo o en la superficie. Por ejemplo, la continuidad geológica se observa cuando una capa de caliza o arenisca se extiende de manera continua y sin interrupciones en un área geográfica determinada.

Estratigrafía Continua: Se refiere a la secuencia continua y ordenada de capas o estratos de rocas sedimentarias que se encuentran en un área determinada. La continuidad estratigráfica implica que las capas están dispuestas de manera coherente y secuencial en el tiempo.

Continuidad de Estructuras: Se refiere a la relación entre diferentes estructuras geológicas, como fallas, fracturas o pliegues. La continuidad estructural se puede observar cuando una falla o una fractura se extiende a lo largo de un área geográfica significativa.

Modelado Geológico 3D: La continuidad geológica es un aspecto clave en el modelado geológico en 3D. Los geólogos utilizan datos de muestreo, perforaciones y estudios geofísicos para inferir la distribución espacial y la continuidad de las unidades geológicas en el subsuelo.

Aplicaciones en la Minería: La continuidad geológica es fundamental en la exploración y explotación de yacimientos minerales. Un depósito mineral con continuidad geológica se puede explotar de manera más eficiente y precisa.

La determinación de la continuidad geológica implica el uso de diversas herramientas y técnicas, como muestreo, mapeo geológico, análisis de datos geofísicos y modelado geológico. La comprensión de la continuidad geológica es esencial para una mejor interpretación del subsuelo y para el desarrollo de proyectos de exploración y construcción más efectivos y seguros.

7.3 Estudio exploratorio de datos

La geoestadística se encarga del estudio de variables mediante la toma de muestras. Previo a la aplicación de herramientas geoestadísticas, conviene realizar un estudio exploratorio de los datos o muestras obtenidas, este estudio se realiza con los siguientes objetivos:

- Analizar (mediante herramientas estadísticas simples) la cantidad, calidad y la ubicación de los datos disponibles.

- Definir las zonas de estudio. Una división del área general de estudio en varias zonas con características comunes o si se observan cambios abruptos en la distribución espacial de valores.
- Anticipar futuras dificultades en el proceso de estimación, por ejemplo, por la presencia de valores atípicos.

Una serie de herramientas son utilizadas para realizar este estudio exploratorio de los datos. En su orden lógico secuencial de utilización se realiza su descripción.

1. Despliegue de datos (mapas)

Permite visualizar la ubicación espacial de los datos y su distribución, obteniendo así una vista preliminar de su continuidad espacial. Cuando se trabaja en 3D puede realizarse proyecciones (plantas y secciones) o vistas en perspectivas para facilitar su análisis.

2. Distribución estadística de valores

Además de la distribución espacial de los datos obtenidos, interesa conocer su distribución y características de estadística básica. Para ello existen varias herramientas, siendo la principal utilizada el histograma.

2.1 Histograma

Representa gráficamente las frecuencias de ocurrencia en función del valor. Consiste en dividir el rango de los valores en intervalos y visualizar la proporción de los datos que caben dentro de cada intervalo.

El histograma es una herramienta útil para detectar la presencia de valores atípicos. Cabe destacar que ningún valor atípico (“outlier”) detectado debe ser eliminado sin razón suficiente, debido a que puede ser útil para describir de forma correcta el comportamiento de la variable regionalizada en la ubicación correspondiente.

2.2 Estadísticas elementales

Junto con el histograma, es conveniente calcular algunas estadísticas básicas sobre el conjunto de datos obtenido. Entre ellas se tienen:

Medidas de posición

- Media: Promedio aritmético de los valores
- Cuantiles o percentiles: Particionan la base de datos en cantidades iguales de datos.
- Mínimo y máximo: Establecen el rango en el que se distribuyen los valores.

Medidas de dispersión

- Varianza: Promedio de la desviación cuadrática entre cada valor y la media. Cuantifica la dispersión del histograma y se expresa en el cuadrado de la unidad de la variable en estudio.
- Desviación estándar: Raíz cuadrada de la varianza. Se expresa en la misma unidad que la variable de estudio.
- Coeficiente de variación: Razón entre la desviación estándar y la media. Es adimensional.
- Rango intercuartil: Ancho del intervalo entre el primer y el tercer cuartil, que contiene la mitad de los datos.

7.4 Interpretación de Resultados

Históricamente el acople de información tanto de características geológicas del yacimiento como de valores de ley ha entregado buenos resultados y trabajan en conjunto al momento de certificar prospectos mineros actualmente. Debido a que un buen entendimiento de la geología de un depósito optimizará todas las etapas posteriores de su estudio.

7.5 Estimación de recursos minerales

7.5.1 Introducción/Geología

La ocurrencia de concentraciones anómalas de mineral en la tierra proviene de procesos geológicos muy complejos como para ser representados a la perfección mediante algún método. Sin embargo, a lo largo de la historia de la minería ha habido una serie de intentos de representar las características reales de un depósito a partir de la obtención de muestras puntuales.

Con el propósito principal de la generación de beneficio económico, el proceso de exploración comienza con la búsqueda de anomalías en la concentración de elementos de interés económico. Realizando para esto tareas como la teledetección, aplicación de técnicas geoquímicas y geofísicas, una recopilación de información, etc.

Al encontrar una anomalía en la ocurrencia de mineral, para conocer en mayor detalle el área de estudio y sus características se programan campañas de exploración, generalmente mediante la realización de sondajes. Para así obtener datos ya sea de distribución de leyes, parámetros geomecánicos, tipos de alteración, entre otros.

La tabulación de los datos encontrados y su análisis estadístico se materializa mediante un estudio exploratorio de los datos. Dicho estudio entrega información cuya utilidad está enfocada en la realización de inferencias preliminares sobre el depósito que posteriormente son comprobadas o refutadas por la estimación.

La correlación espacial de las variables en estudio, no han sido consideradas tradicionalmente debido a que la estimación de los recursos de un depósito se realizaba mediante métodos determinísticos, como el inverso de la distancia, método que solo depende de la ubicación espacial de los datos y de su valor.

Debido a que los depósitos minerales presentan características con patrones de correlación espacial, comportamiento que a la hora de hacer una evaluación de los recursos es muy importante tener en consideración si se quiere representar de una buena forma el depósito.

Los métodos tradicionales de estimación fueron reemplazados en su mayoría, buscando la incorporación de la correlación espacial mediante una herramienta llamada variograma, que es la principal herramienta de la geoestadística. Cuya función es graficar el comportamiento de todos los pares de datos en una dirección dada para poder entender el comportamiento de la variable regionalizada a estudiar dentro del campo finito definido anteriormente e identificar posibles direcciones preferenciales o anisotropías.

Finalmente, a través de las técnicas de kriging y sus variantes, es posible estimar los valores de estas variables en ubicaciones espaciales donde se desconoce (o no fue muestreada), con el fin de tener un conocimiento lo más cercano a la realidad de las características del depósito.

7.5.2 Variables regionalizadas

La teoría geoestadística aborda el estudio y modelización de variables que se denominan regionalizadas, que de forma intuitiva podemos definir como fenómenos espaciales que posee dos aspectos complementarios:

-A nivel local un aspecto aleatorio asociado con las variaciones erráticas e impredecibles de la variable.

-A nivel global un aspecto general estructurado que refleja las características generales del fenómeno.

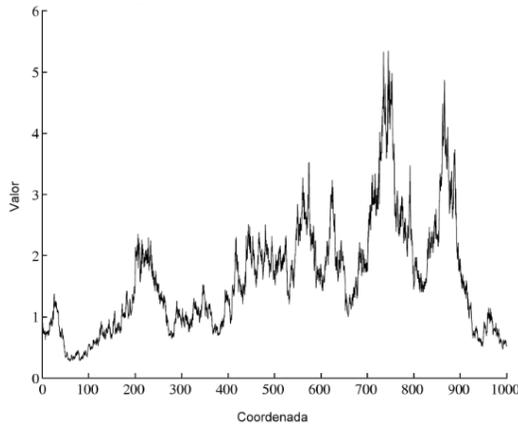


Figura: Variable regionalizada en un espacio unidimensional.

En general, esta función presenta dos aspectos complementarios: por una parte, tiene una cierta “continuidad” espacial (zonas de altos valores / zonas de bajos valores), pero, por otro lado, varía irregularmente y escapa a toda representación simple [6].

Ejemplos de variables regionalizadas son:

- La ley de un mineral, la potencia de una veta, la acumulación, la densidad de la roca o la recuperación metalúrgica, describen un fenómeno de mineralización.
- La porosidad y la permeabilidad de la roca en un reservorio de petróleo o en un acuífero.
- La concentración de un elemento contaminante en la atmósfera o en el suelo.
- La altitud topográfica en un punto del espacio geográfico.

- La conductividad eléctrica, el pH y la concentración en nutrientes medidas sobre una muestra de suelo.
- El número de árboles y su diámetro promedio en áreas de observación de un bosque.

Dado que un fenómeno regionalizado nunca posee una extensión infinita, estudiaremos la variable regionalizada sólo dentro de un dominio limitado D llamado campo de la variable. Este campo puede representar una zona natural, fuera de la cual la variable no está definida. Puede tratarse también de un dominio particular, donde la variable interesa, por ejemplo, los sitios donde no se anula o donde es mayor que un límite de detección.

7.5.3 Análisis variográfico

Los valores de una variable regionalizada no son independientes, en el sentido que un valor observado en un sitio proporciona información sobre los valores de los sitios vecinos. En la interpretación probabilística de la variable regionalizada, esta noción intuitiva de dependencia está descrita por la distribución espacial de la función aleatoria, que modela la manera como se relacionan los valores observados en distintos sitios por una distribución de probabilidad multivariable.

En muchos problemas la descripción de la distribución espacial se limita a los primeros momentos. El momento de orden 1 (esperanza) hace intervenir un solo sitio a la vez y no entrega realmente información sobre dependencia espacial. En cambio, los momentos de orden 2 (covarianza, correlograma y variograma) están definidos con la ayuda de dos sitios, es decir del más pequeño conjunto que se puede considerar para describir la “interacción” entre valores. Son estos momentos los que entregan una descripción elemental y operatoria de la continuidad espacial de la variable regionalizada.

Variograma experimental

El variograma es una medida de continuidad espacial. Es un índice de disimilitud entre todos los pares de puntos separados por un vector h dado y contenidos en un espacio de búsqueda. El variograma, para una determinada dirección de h , se traza como función de la distancia de separación (es decir, el paso o lag) [24].

Consideremos una variable regionalizada z conocida en n sitios $\{x_1, \dots, x_n\}$. El estimador tradicional del variograma para un vector de separación h dado, se define de la siguiente manera:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} [z(x_a) - z(x_b)]^2 = \frac{1}{2} E\{[Z(x+h) - Z(x)]\}^2, \quad (1)$$

donde $N(h) = \{(a,b) \text{ tal que } x_a - x_b = h\}$ y $|N(h)|$ es el número de pares contenidos en el conjunto $N(h)$.

En la realidad, los datos están distribuidos irregularmente en el área de estudio, el número de pares $|N(h)|$ que interviene en el cálculo de $\gamma(h)$ para un vector h dado, es generalmente muy pequeño. El variograma experimental tiene entonces un aspecto muy errático y resulta imposible interpretarlo y modelarlo. Con el fin de comparar un número mayor de muestras, se suele permitir algunas tolerancias de cálculo, sobre las distancias y las direcciones:

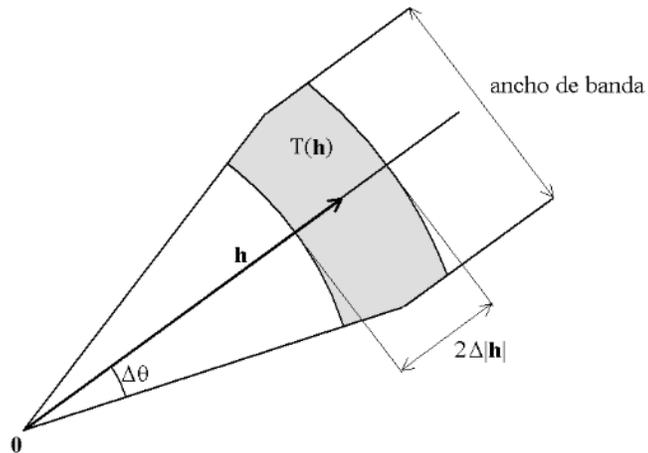


Figura 10: Región de tolerancia $T(h)$, vector de búsqueda h

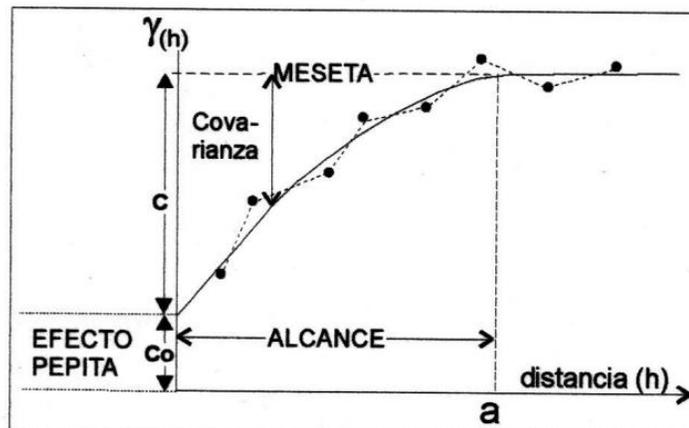


Figura 11: Componentes de un variograma

Las principales componentes de un variograma son:

- Alcance: distancia bajo la cual aún existe correlación positiva entre los pares de datos comparados.
- Meseta: valor donde el variograma se estabiliza. Generalmente se infiere que corresponde al valor máximo del variograma, donde los pares de datos dejan de tener correlación positiva.

-Efecto pepita: Es el efecto producido por la variabilidad a distancias pequeñas, representando la variabilidad a pequeña escala. [18]

En resumen, los parámetros a especificar para calcular un variograma experimental son: dirección de interés (acimut, inclinación), distancias de interés, en general múltiplos de una distancia elemental llamada paso ("lag"), tolerancia en la dirección (tolerancia angular, ancho(s) de banda), tolerancia en las distancias.

Una vez realizado el estudio variográfico incluyendo las variables indicadas anteriormente. Se obtiene un variograma como el que sigue, donde cada punto corresponde al promedio ponderado del variograma para todos los pares de datos en todas las direcciones distanciados en h unidades.

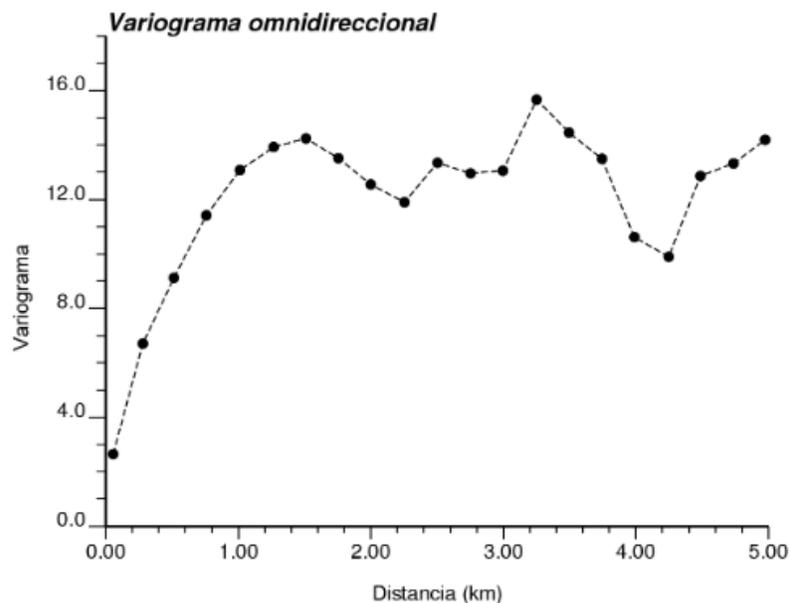


Figura 12: Variograma experimental de ejemplo (concentraciones de cobalto)

Mapa variográfico

El mapa variográfico es una herramienta que consiste en la visualización del variograma experimental en todas las direcciones del espacio sobre un plano dado (generalmente plano horizontal) [6]. Ayuda a distinguir si existe anisotropía, para luego graficar el variograma experimental a lo largo de las direcciones principales de anisotropía y así conocer el comportamiento de los datos [24].

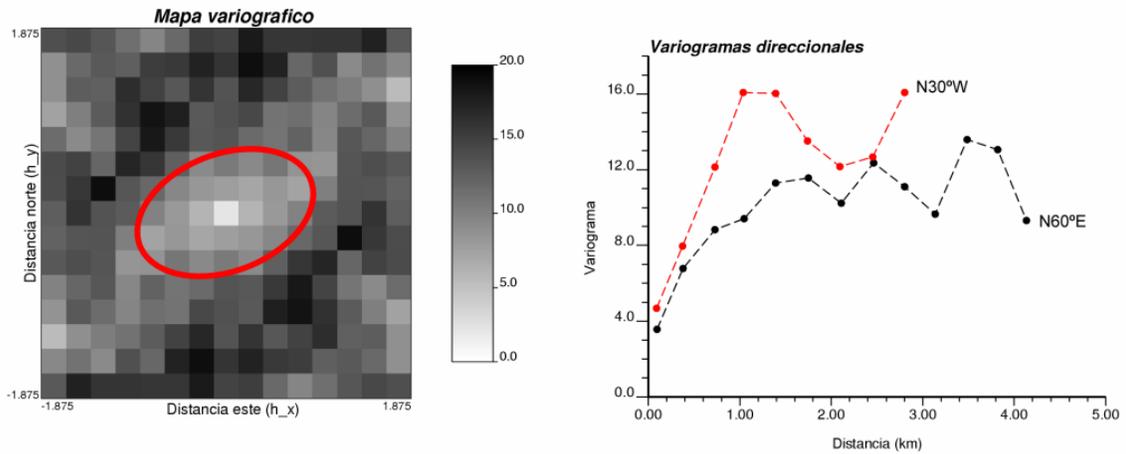


Figura 13: Mapa variográfico (izquierda) y variograma experimental calculado a lo largo de las direcciones de anisotropía reconocidas

Anisotropía

Las anisotropías se manifiestan cuando el variograma difiere según las direcciones del espacio. En ausencia de anisotropía, el valor de $\gamma(h)$ solo depende del módulo del vector separación h no de su orientación.

Dentro de un mapa variográfico se pueden identificar 3 tipos principales de anisotropías, Figura 14, las cuales son generadas por cambios en las estructuras del variograma en las distintas direcciones de estudio, estos son:

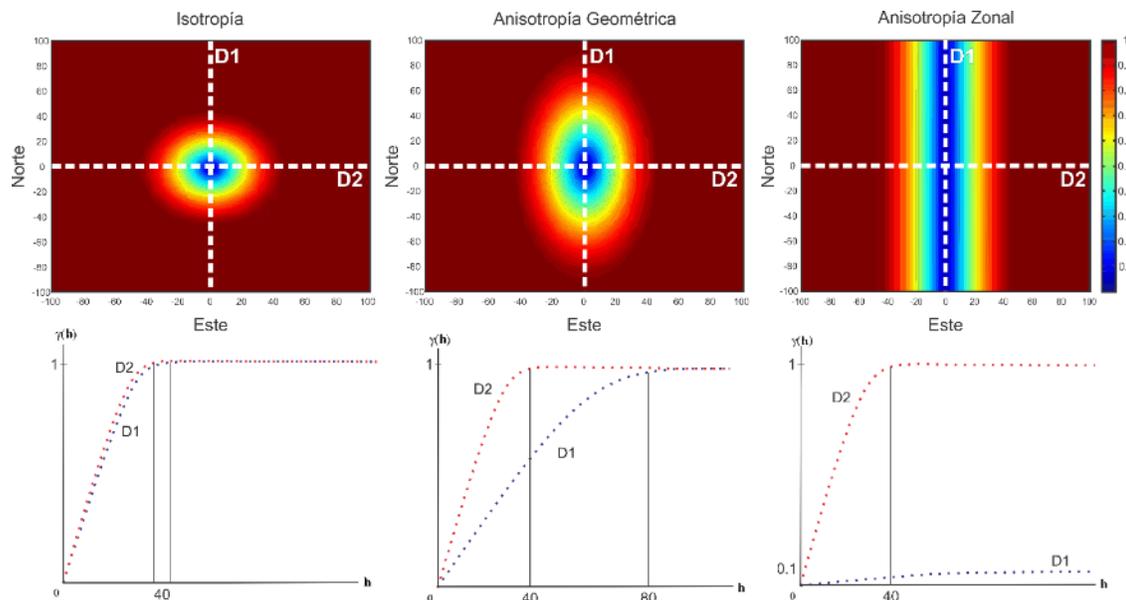


Figura 14: Mapas variográficos y variogramas experimentales según anisotropías

-Isotropía: el variograma experimental es idéntico en todas las direcciones del espacio, por lo tanto, genera circunferencias concéntricas en el mapa variográfico.

-Anisotropía geométrica: el variograma experimental posee dos direcciones principales en las que con alcances diferentes se llega a la misma meseta [17]. Se reconoce gráficamente porque genera elipses concéntricas en el mapa variográfico (en caso 2D y elipsoides en caso 3D).

-Anisotropía zonal: el variograma experimental posee dos direcciones en las que claramente los alcances y las mesetas son diferentes. Se reconoce gráficamente porque genera bandas en el mapa variográfico o elipses extremadamente excéntricas.

Finalmente, la combinación de cualquiera de estas anisotropías con ángulos de interacción complejos permite interpretar la mayoría de las situaciones prácticas.

Variograma teórico

El variograma experimental no puede utilizarse directamente. Por una parte, sólo está definido para ciertas distancias y direcciones, por lo que es incompleto. Por otra parte, está sujeto a ciertas aproximaciones, debido al número limitado de datos y a los parámetros de tolerancia utilizado en el cálculo. Para subsanar esta situación, la idea es ajustar un modelo teórico de variograma en torno al variograma experimental. Esta etapa es la fase esencial de todo estudio geoestadístico, pues aquí es donde uno “interpreta” la continuidad espacial de la variable en estudio.

Mientras más regular el variograma en el origen (distancias cercanas a 0), más regular es la variable regionalizada en el espacio. Se suele distinguir tres tipos de comportamiento para el variograma en el origen (Figura 15):

- parabólico: corresponde a una variable regionalizada muy regular en el espacio
- lineal: corresponde a una variable regionalizada continua, pero no tan regular
- discontinuo: corresponde a una variable regionalizada más errática, es decir, con discontinuidades en la distribución espacial de sus valores. La semejanza entre dos datos muy cercanos no es despreciable: los valores medidos varían a una escala muy pequeña y su continuidad no es perceptible. Este fenómeno se llama efecto pepita, por referencia a las leyes de oro en los yacimientos auríferos, que cambian repentinamente cuando hay pepitas de oro.

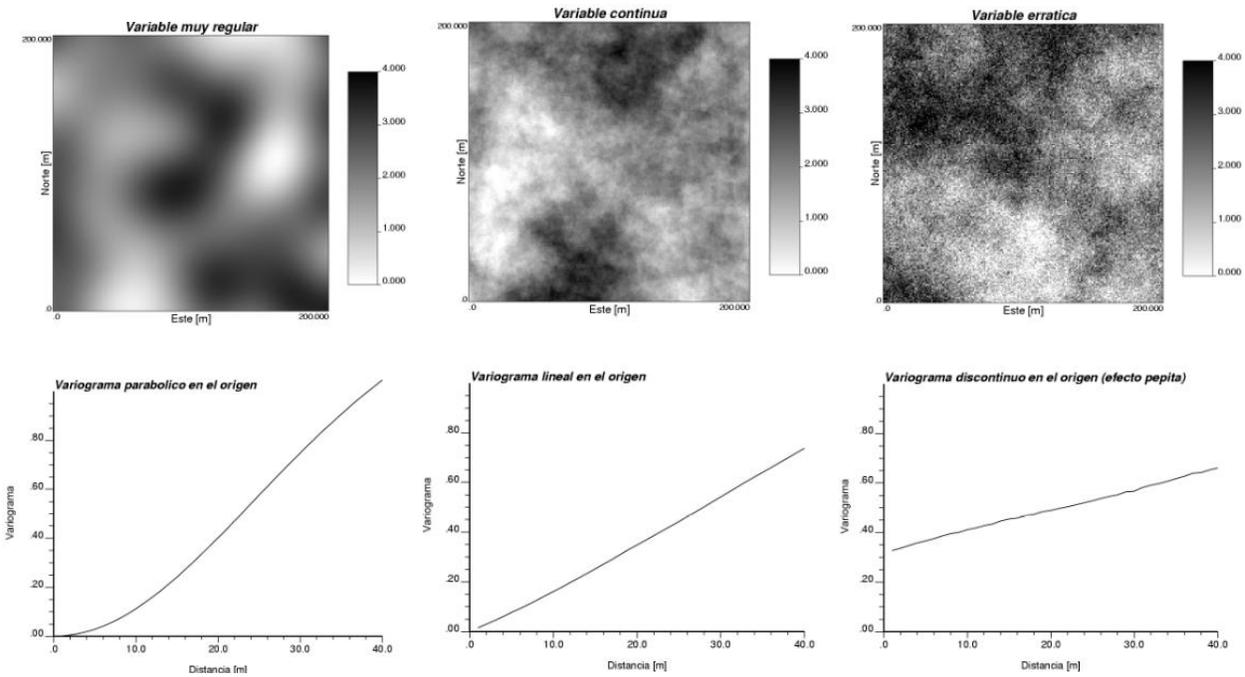


Figura 15: Relación entre la regularidad espacial de una variable regionalizada (arriba) y el comportamiento en el origen del variograma

Frecuentemente, el variograma crece a partir del origen y se estabiliza, a partir de una distancia a , en torno a una meseta. En este caso, se demuestra que esta meseta es igual a la varianza a priori:

Las dos variables aleatorias $Z(x)$ y $Z(x + h)$ estarán correlacionadas si la longitud del vector de separación h es inferior a la distancia a , que se denomina el alcance. El alcance corresponde a la noción intuitiva de zona de influencia: más allá de $|h| = a$, el variograma es constante e igual a su meseta y las variables $Z(x)$ y $Z(x + h)$ son independientes (en rigor, no están correlacionadas). Los variogramas con meseta se denominan también modelos de transición.

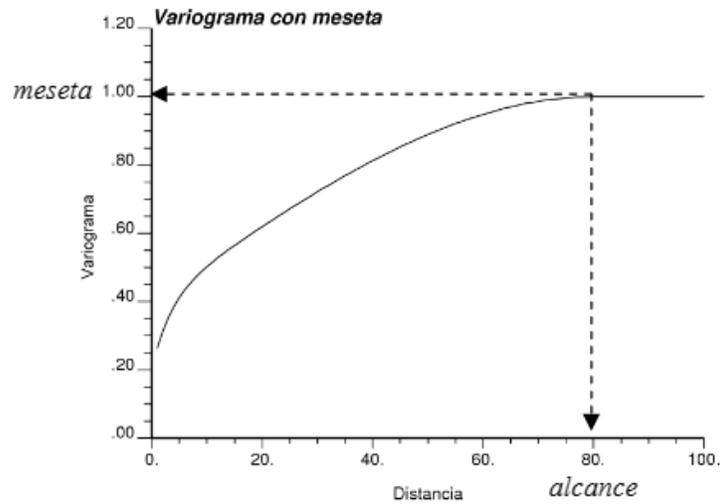


Figura 16: Variograma con elementos principales

A veces, el variograma crece infinitamente cuando la distancia aumenta y no presenta meseta ni alcance. En este caso, la varianza a priori es infinita y no existe la función de covarianza ni el correlograma.

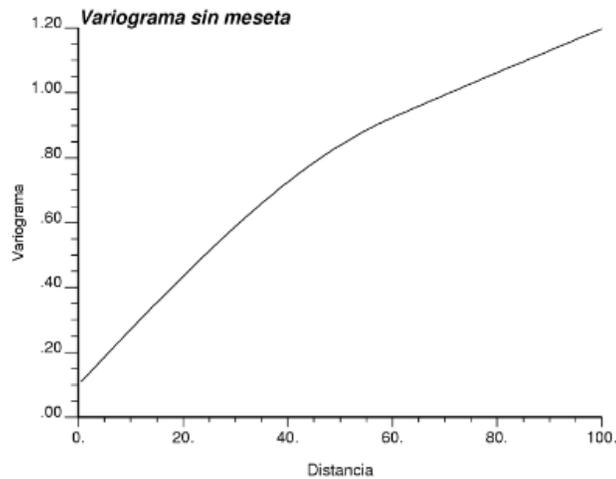


Figura 17: Variograma sin meseta

Modelos elementales del variograma

En conjunto, se emplean para la construcción del variograma teórico modelos elementales.

Efecto Pepita

Alcanza inmediatamente su meseta: hay ausencia total de correlación espacial, de modo que la geoestadística encuentra todos los resultados de la estadística clásica. Es un caso poco frecuente en las aplicaciones, a menos que los errores de medición sean muy grandes o que las distancias entre datos sean mayores que el alcance real, en cuyo caso la continuidad espacial es imperceptible.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ C & \text{en otro caso} \end{cases}$$

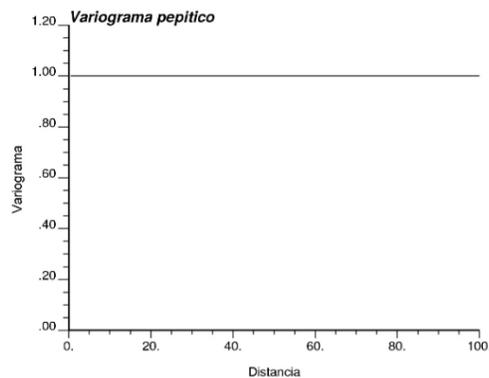


Figura 18: Variograma pepítico

Modelo Esférico

En general, describe una variable regionalizada continua. Típicamente correspondiente a variables mineras como por ejemplo la potencia. [7]

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[\frac{3|h|}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{|h|}{3} \right)^3 \right] & \text{si } |h| \leq a \\ C & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

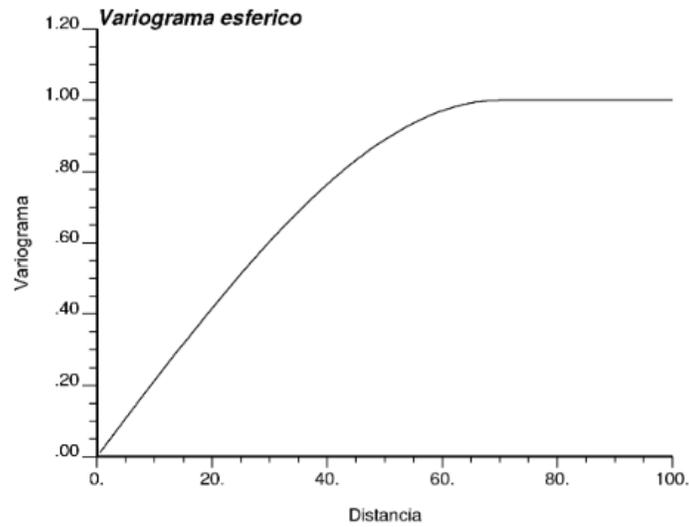


Figura 19: Variograma esférico

Modelo Exponencial

Contrariamente al modelo esférico que llega a la meseta exacta para $|h| = a$, el modelo exponencial sólo alcanza su meseta asintóticamente. En todo caso, se puede considerar un alcance práctico igual a $3a$ para el cual el variograma llega al 95% del valor de su meseta.

$$\gamma(h) = C \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) \right\}$$

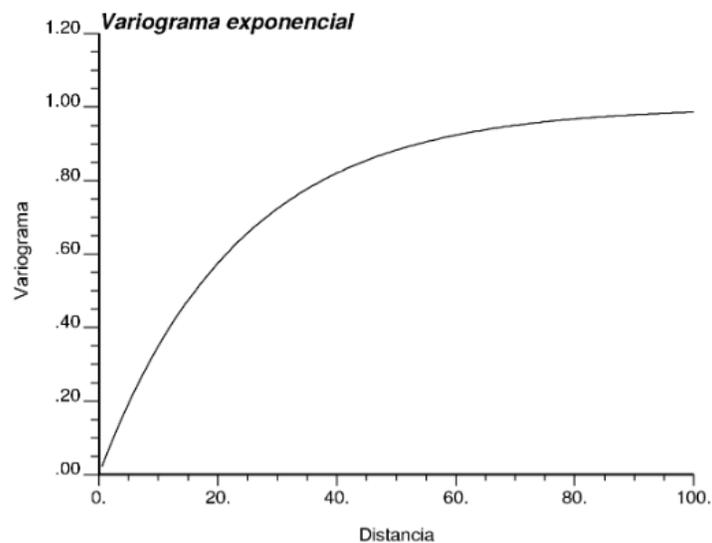


Figura 20: Variograma Exponencial

Modelo Gaussiano

Al igual que en el modelo exponencial, la meseta se alcanza asintóticamente y el alcance práctico puede considerarse igual a $a\sqrt{3}$.

$$\gamma(h) = C \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{|h|^2}{a^2}\right) \right\}$$

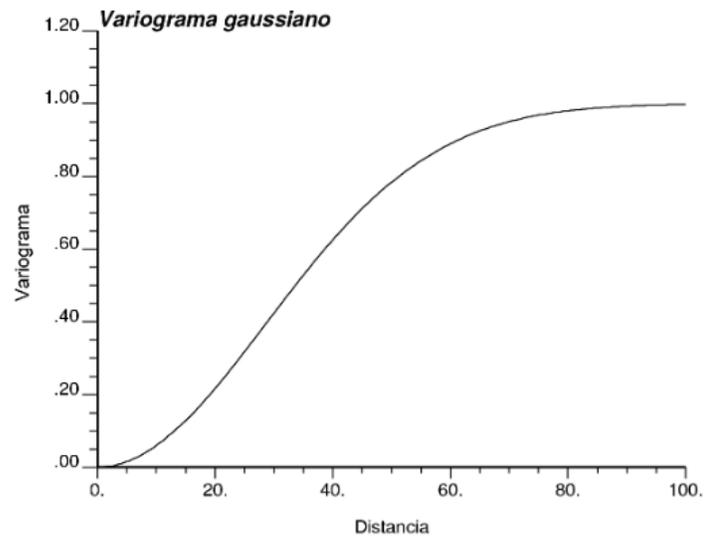


Figura 21: Variograma Gaussiano

Modelo Potencia

Este variograma no posee ni meseta ni alcance, sino que crece en forma indefinida.

$$\gamma(h) = \omega|h|^\theta$$

El exponente θ puede variar entre 0 (variograma pepítico) y 2 (variograma parabólico). El modelo se llama lineal cuando el exponente vale 1.

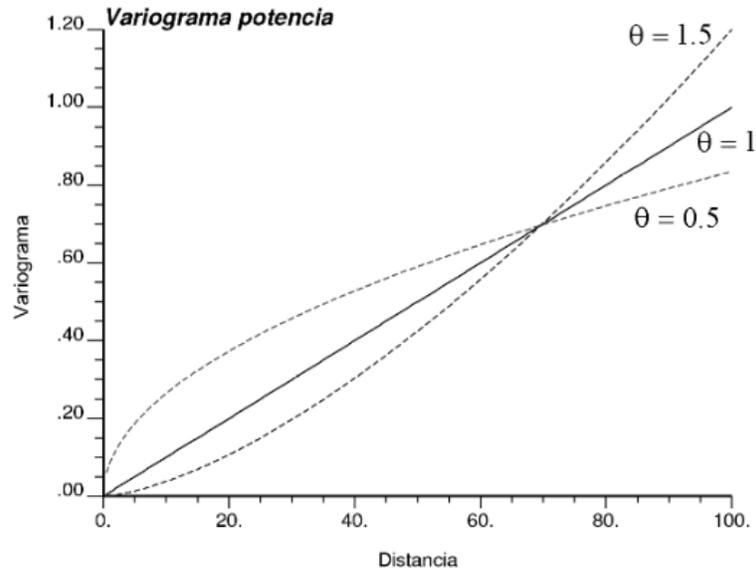


Figura 22: Variograma Potencia

Modelamiento de un Variograma Experimental

Modelos Anidados

El variograma experimental mide la desemejanza promedio entre dos datos en función de su separación. A menudo, presenta cambios de pendiente, que indican un cambio en la continuidad espacial a partir de ciertas distancias. Se pone así en evidencia distintas escalas de variación en la variable regionalizada. El variograma puede modelarse como la suma de varios modelos elementales denominados modelos anidados o estructuras anidadas:

$$\gamma(h) = \gamma_1(h) + \gamma_2(h) + \dots + \gamma_s(h)$$

En la práctica, la descomposición anterior no es única, pues las escalas de variabilidad de una variable regionalizada son raramente tan diferenciadas. Además, en general, el uso de estructuras anidadas sólo representa una comodidad para el ajuste, sin que exista una interpretación de cada estructura.

El análisis variográfico hace uso tanto de la información disponible sobre la variable en estudio, como del tacto en la elección y el uso de las herramientas, así como también de un sentido de la aproximación. Se trata de la etapa esencial de todo estudio geoestadístico y seguramente de aquella que menos se presta al automatismo [6].

7.5.4 Estimación por Inverso de la Distancia

Una interpolación de distancia inversa es una de las técnicas de interpolación más simples y populares. Combina el concepto de proximidad con el cambio gradual de la superficie de tendencia. Una interpolación IDW se define como un promedio ponderado espacialmente de los valores de muestra dentro de un vecindario de búsqueda [23]. Se calcula como:

$$Z^*(u) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(u_i),$$

donde Z^* es el valor estimado en el punto u , u_i , con $i = 1, \dots, n$ son las ubicaciones espaciales de las muestras dentro del área de estudio y λ_i , con $i = 1, \dots, n$ son los pesos o ponderadores de cada muestra. $Z(u_i)$ corresponde al valor de dato conocido en el punto u_i .

Los ponderadores, se calculan según:

$$\lambda_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i^p}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p}\right)}, i = 1, \dots, n,$$

donde, d_i es la distancia euclidiana entre el punto a estimar y la muestra $Z(u_i)$. p corresponde a la potencia o exponente de la distancia que vendrá dada por el método.

El exponente más común de este método es 1 o 2, lo que le da el nombre a inverso de la distancia al cuadrado.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 ,$$

La suma de los pesos o ponderadores debe ser igual a 1 para asegurar que el método sea insesgado. [5]

Este estimador asigna a cada dato una ponderación inversamente proporcional a (una potencia de) su distancia al sitio a estimar.

la potencia es baja (cercana a cero), la distancia elevada a esta potencia es cercana a 1, por lo que el estimador asigna la misma ponderación a todos los datos (media aritmética de los datos). Al contrario, si la potencia es muy alta, el inverso de la distancia más pequeña se vuelve preponderante sobre todos los otros términos, y el estimador se convierte en el del más cercano vecino.

Comentarios.

La interpolación a distancia inversa es muy sensible al número de datos utilizados en la interpolación y al valor del exponente.

A pesar de esta simplicidad, se muestra que los estimadores de distancia inversa (experimentalmente) son bastante sensibles al tipo de base de datos o características de datos.

7.5.5 Estimación por Kriging

El kriging es un interpolador que determina la ponderación de los datos según sus distancias al sitio a estimar, las redundancias entre los datos y la continuidad espacial de la variable regionalizada y cuantifica la precisión de la estimación mediante la varianza de kriging.

La resolución de un problema de estimación por kriging se articula siempre en torno a las mismas etapas. Las diferentes variantes sólo radican en las hipótesis realizadas sobre la función aleatoria $Z = \{Z(x) \in D\}$ que representa la variable regionalizada.

Restricciones del kriging

-Restricción de linealidad: El estimador tiene que ser una combinación lineal ponderada (promedio ponderado) de los datos, que denotaremos de la siguiente forma:

$$Z^*(x_0) = a + \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha})$$

donde x_0 es el sitio donde se busca tener una estimación, $x_{\alpha}, \alpha = 1, \dots, n$ son los sitios con datos, mientras que los ponderadores $\lambda_{\alpha}, \alpha = 1, \dots, n$ y el coeficiente a son las incógnitas del problema del kriging.

-Restricción de insesgo: El error de estimación tiene esperanza nula.

$$E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = 0$$

Esta restricción no asegura errores igual a cero, solo que la media global de los errores será cercana a cero.

-Restricción de optimalidad: Los ponderadores deben minimizar la varianza del error de estimación.

$$var[Z^*(x_0) - Z(x_0)] \text{ es mínima.}$$

Esta restricción de precisión equivale a minimizar el error cuadrático promedio.

Vecindad de kriging

En general, los problemas de estimación local no involucran la totalidad del campo y tampoco utilizan todos los datos disponibles. Se define la vecindad de kriging, como el dominio del espacio que contiene el sitio a estimar y los datos utilizados en la estimación. El usuario puede considerar varias posibilidades.

-Vecindad única: Se efectúa el kriging conservando todos los datos. En este caso, incluso los datos muy alejados intervendrán en la estimación. Sin embargo, salvo excepciones, su influencia será muy baja (intuitivamente, un sitio alejado no aporta demasiada información al sitio a estimar y se verá afectado por un ponderador de kriging bajo).

Cuando los datos son muy numerosos, es inútil conservarlos todos para una estimación local, puesto que se corre el riesgo de aumentar considerablemente los tiempos de cálculo. Por lo tanto, es necesario reducir el tamaño de la vecindad de kriging.

-Vecindad móvil: El kriging se realiza en una vecindad móvil cuando sólo utiliza los datos “cercaños” al sitio a estimar. Ahora, en general, uno no se limita a una sola estimación local, sino que busca estimaciones en los nodos de una grilla regular que cubre la zona estudiada. Falta definir el tamaño y la forma de la vecindad, que se centra en el sitio a estimar y que se desplaza a través del campo, a medida que se realiza las estimaciones (de donde viene el adjetivo móvil).

El tamaño y forma de la vecindad móvil son variables (deben definirse con suficiente cuidado). El tamaño debe encontrar un equilibrio para optimizar la precisión (mayor precisión en vecindades más grandes) y el tiempo de cálculo (mayor tiempo de cálculo en vecindades más grandes). La forma de la vecindad debe tomar en cuenta la anisotropía de la variable regionalizada, revelada por el análisis variográfico.

Kriging Ordinario

El krigeado ordinario se presenta cuando la media es estacionaria pero no se posee una estimación a priori de la misma (varía con respecto al punto a estimar) [7]. Desde el punto de vista estadístico corresponde a una regresión lineal con restricciones.

Así, se deben cumplir las restricciones de kriging como sigue:

-Linealidad: Se asegura esta restricción ya que no depende de la media

-Insesgo: La esperanza del error de estimación es:

$$E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = a + \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} E[Z(x_{\alpha})] - E[Z(x_0)] = a + \left(\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} - 1 \right) m$$

como se desconoce el valor de la media m , este valor esperado es nulo si:

$$a = 0 \text{ y } \sum_{\alpha}^n \lambda_{\alpha} = 1$$

La igualdad sobre la suma de los ponderadores asegura que, en el caso en que todos los datos son iguales a una misma constante, el valor estimado restituirá esta constante.

-Optimalidad: Como en el caso del kriging simple, la varianza del error de estimación es:

$$\text{var}[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C[(x_{\alpha}) - (x_{\beta})] + C(0) - 2 \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C[(x_{\alpha}) - (x_0)]$$

Se necesita minimizar esta expresión bajo la condición de insesgo, que impone que la suma de las incógnitas es igual a 1. Esto se logra introduciendo una incógnita adicional llamada multiplicador de Lagrange, que denotaremos como μ . Se escribe:

$$\begin{aligned} \text{var}[Z^*(x_0) - Z(x_0)] &= \\ &= C(0) + \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C[(x_{\alpha}) - (x_{\beta})] - 2 \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C[(x_{\alpha}) - (x_0)] + 2\mu \left(\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} - 1 \right) \end{aligned}$$

Con $\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} - 1 = 0$,

se minimiza la función de las $n + 1$ variables $\lambda_1, \dots, \lambda_n, \mu$. Calculando las $n + 1$ derivadas parciales de esta función y luego anulándolas, se obtiene el sistema:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \lambda_{\alpha}} = 0: \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} C(x_{\alpha} - x_{\beta}) + \mu = C(x_{\alpha} - x_0) \quad \forall \alpha = 1 \dots n \\ \frac{\partial}{\partial \mu} = 0: \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1 \quad (\text{Condición de insesgo}) \end{cases}$$

Este sistema contiene una incógnita y una ecuación más que el sistema de kriging simple. Se puede escribir en notación matricial:

$$\begin{pmatrix} C(x_1 - x_1) & \cdots & C(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(x_n - x_1) & \cdots & C(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(x_1 - 0) \\ \vdots \\ C(x_n - x_0) \\ 1 \end{pmatrix}$$

Este kriging se denomina "kriging ordinario". Siendo el variograma una herramienta equivalente a la covarianza, a partir de la relación $\gamma(h) = C(0) - C(h)$, se puede elegir utilizarlo en lugar de la función de covarianza. Las ecuaciones de kriging pasan a ser:

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} \gamma(x_{\alpha} - x_{\beta}) - \mu = \gamma(x_{\alpha} - x_0) \quad \forall \alpha = 1 \dots n \\ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1 \end{cases}$$

Esto es:

$$\begin{matrix} & A & & \lambda & & B \\ \begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \cdots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \cdots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} & & & \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x_0) \\ 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

La solución de este sistema es única si y solo si la matriz A es definida positiva, y por lo tanto invertible, luego los ponderadores se calculan: $\lambda = A^{-1}B$.

Para finalizar, mediante un razonamiento similar al del kriging simple, se llega a la expresión de la varianza de kriging ordinario:

$$\text{var}[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = C(0) - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha} - x_0) - \mu = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \gamma(x_{\alpha} - x_0) - \mu$$

donde $C(0)$ es la varianza a priori de la función aleatoria Z , o sea, la meseta de su variograma. Ahora, la segunda igualdad muestra que la varianza de kriging no depende de este valor $C(0)$, por lo cual el kriging ordinario sigue aplicable incluso cuando el variograma no presenta meseta (por ejemplo, cuando es un modelo potencia).

7.6 Categorización de recursos minerales

La categorización de recursos minerales y reservas mineras es conocida como una de las etapas más críticas en la evaluación de un proyecto minero, debido a que las decisiones sobre inversiones se basan generalmente en la calidad y cantidad de los recursos y reservas de un yacimiento. [19]. Además de las características del depósito, la decisión de invertir considera la confiabilidad de la estimación realizada [4].

7.6.1 Códigos guía de Categorización de recursos

A pesar de lo anterior, el proceso de categorización y de certificación de prospectos, está sujeta al juicio experto de una persona competente calificada. En los últimos años, en la búsqueda de estandarizar el proceso de categorización y la entrega de informes de certificación de prospectos, el *Comitee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO)* lidera el establecimiento de un código internacional en estas materias.

CRIRSCO está formado por representantes de varios países, donde cada país cuenta con un código guía para la certificación de prospectos enfocados todos en cumplir con sus requerimientos. En la siguiente imagen se resumen los países (asociaciones) y sus códigos correspondientes.



Figura 23: Países miembros de CRIRSCO

El comité puede ser visto como un intento de estandarización, se encarga de entregar las guías generales para la definición de recursos minerales, reservas mineras y su incertidumbre, con

el objetivo de que en cada país se encarguen de definir sus propios códigos con normas para la certificación de prospectos de exploración.

El código de cada país es adoptado por su bolsa minera correspondiente (donde se enlistan las empresas públicas), de tal forma que los futuros inversionistas puedan obtener la información suficiente en calidad y cantidad sobre el proyecto evaluado.

Los puntos más destacados que poseen en común estos códigos, son la mención/definición de una persona competente responsable de la generación del reporte, la definición de recursos minerales y de reservas mineras.

1. Persona competente o Calificada.

“A Competent Person is a minerals industry professional, who is a [National Reporting Organisation (NRO) to insert appropriate membership class and name of Professional Organisation (PO)] or other Recognised Professional Organisations (RPOs) with enforceable disciplinary processes including the powers to suspend or expel a member. A Competent Person must have a minimum of five years relevant experience in the style of mineralisation or type of deposit under consideration and in the activity which that person is undertaking.” [12].

2. Recursos Minerales

“A Mineral Resource is a concentration or occurrence of solid material of economic interest in or on the Earth’s crust in such form, grade or quality and quantity that there are reasonable prospects for eventual economic extraction.

The location, quantity, grade or quality, continuity and other geological characteristics of a Mineral Resource are known, estimated or interpreted from specific geological evidence and knowledge, including sampling.

Mineral Resources are subdivided, in order of increasing geological confidence into Inferred, Indicated and Measured categories.” [12]

“A Mineral Reserve is the economically mineable part of a Measured and/or Indicated Mineral Resource. It includes diluting materials and allowances for losses, which may occur when the material is mined or extracted and is defined by studies at PreFeasibility or Feasibility level as appropriate that include application of Modifying Factors. Such studies demonstrate that, at the time of reporting, extraction could reasonably be justified. The reference point at which Mineral Reserves are defined, usually the point where the ore is delivered to the processing plant, must be stated. It is important that, in all situations where the reference point is different, such as for a saleable product,

a clarifying statement is included to ensure that the reader is fully informed as to what is being reported.”

En resumen, la definición de persona competente entrega una serie de requerimientos a cumplir por la persona que cuenta con esta atribución. Los recursos minerales definen la cantidad de tonelaje y leyes que podrían ser factibles de explotar, bajo una cierta consideración de por ejemplo un posible método de explotación, procesamiento y venta. Mientras que las reservas corresponden a la cantidad de tonelaje y leyes que definirán un negocio (análisis de factibilidad), teniendo completa consideración del proyecto minero, variables tecnológicas, medioambientales, gubernamentales, sociales, etc.

En cuanto a incertidumbre, los recursos minerales se dividen en recursos medidos, indicados e inferidos con nivel decreciente de confiabilidad de cada uno. Mientras que las reservas se dividen en reservas probadas y probables, de igual forma, con nivel decreciente de certeza.

Para su interpretación, se muestra el siguiente esquema.

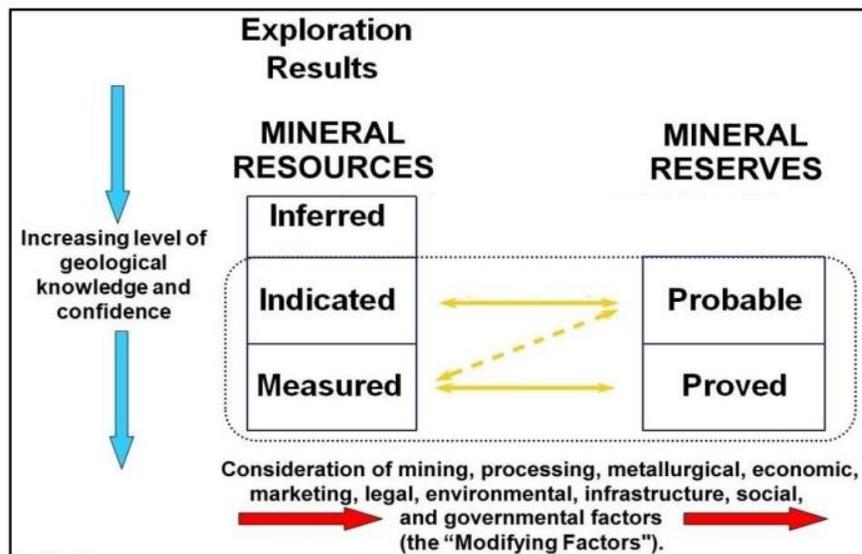


Figura 24: Relación general entre resultados de exploración, recursos y reservas minerales

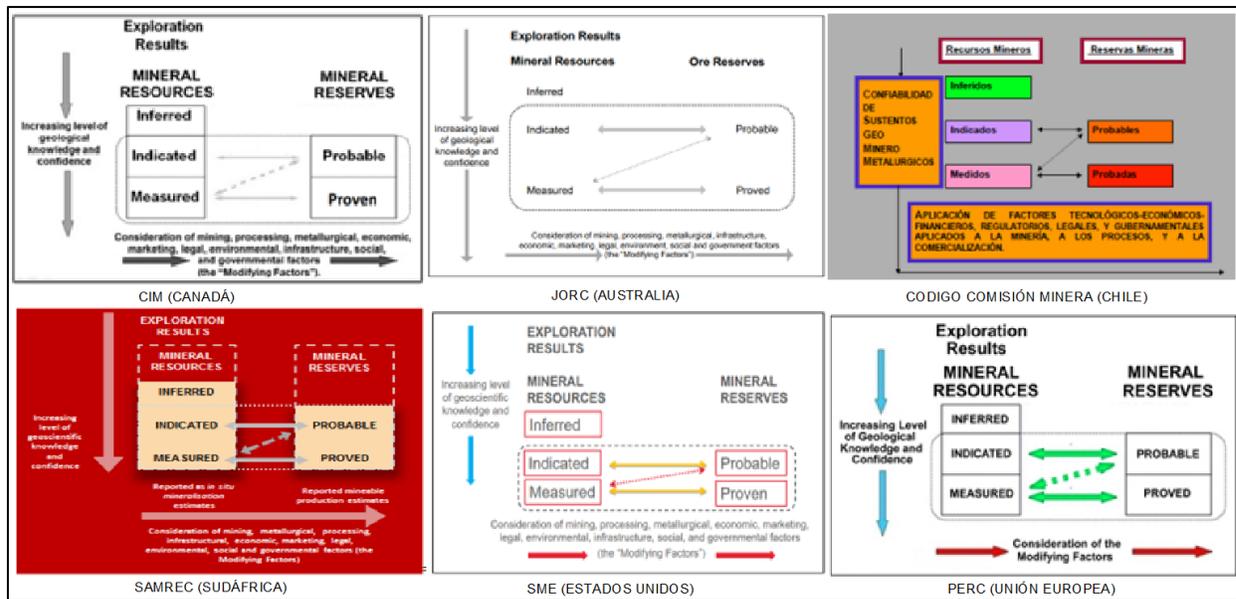


Figura 25: Ejemplo cuadro general de relación Recursos y Reservas mineras. código Canadiense, Australiano, Chileno, Sudafricano, Estadounidense y Europeo

Los esquemas generales, muestran que los recursos inferidos, indicados y medidos están ordenados según su confiabilidad y conocimiento geológico, siendo las dos últimas (Recursos indicados y medidos) con la posibilidad de convertirse en reservas y pasar al análisis de factibilidad mediante la aplicación de los llamados “factores modificadores”.

La definición de la calidad de un recurso o reserva minera es responsabilidad de la persona competente o calificada, quien debe interpretar las definiciones de categorías entregadas por los códigos de cada país.

Al profundizar en el código guía de CRIRSCO, se puede notar que las definiciones entregadas de cada categoría son vagas, no entregan una definición técnicamente completa para realizar la categorización, sino que deja todo al juicio experto de la persona competente.

Dichas definiciones sobre los tipos de recursos y reservas:

Recursos Inferidos

“An ‘Inferred Mineral Resource’ is that part of a Mineral Resource for which tonnage, grade and mineral content can be estimated with a low level of confidence. It is inferred from geological evidence and assumed but not verified geological and/or grade continuity. It is based on information gathered through appropriate techniques from locations such as outcrops, trenches, pits, workings and drill holes which is limited or of uncertain quality and/or reliability.

An Inferred Mineral Resource has a lower level of confidence than that applying to an Indicated Mineral Resource. This category is intended to cover situations where mineralization has been identified and limited measurements and sampling completed, but where the data are insufficient to allow the geological and/or grade continuity to be confidently interpreted. It cannot be assumed that all or part of an Inferred Mineral Resource will be upgraded to an Indicated or Measured Mineral Resource as a result of continued exploration. Confidence in the estimate is not sufficient to allow the evaluation of economic viability.” [12].

Recursos Indicados

“An ‘Indicated Mineral Resource’ is that part of a Mineral Resource for which tonnage, densities, shape, physical characteristics, grade and mineral content can be estimated with a reasonable level of confidence. It is based on exploration, sampling and testing information gathered through appropriate techniques from locations such as outcrops, trenches, pits, workings, and drill holes. The locations are too widely or inappropriately spaced to confirm geological continuity and/or grade continuity but are spaced closely enough for continuity to be assumed. An Indicated Mineral Resource has a lower level of confidence than that applying to a Measured Mineral Resource, but has a higher level of confidence than that applying to an Inferred Mineral Resource.

A deposit may be classified as an Indicated Mineral Resource when the nature, quality, amount and distribution of data are such as to allow the Competent Person to confidently interpret the geological framework and to assume continuity of mineralization. Confidence in the estimate is sufficient to enable an evaluation of economic viability.” [12]

“A ‘Measured Mineral Resource’ is that part of a Mineral Resource for which tonnage, densities, shape, physical characteristics, grade and mineral content can be estimated with a high level of confidence. It is based on detailed and reliable exploration, sampling and testing information gathered through appropriate techniques from locations such as outcrops, trenches, pits, workings, and drill holes. The locations are spaced closely enough to confirm geological and/or grade continuity.

A deposit may be classified as a Measured Mineral Resource when the nature, quality, amount and distribution of data are such as to leave no reasonable doubt, in the opinion of the Competent Person, that the tonnage and grade of the deposit can be estimated within close limits. Confidence in the estimate is sufficient to enable an evaluation of economic viability. The appropriate mineral resource category must be determined by the Competent Person. Mineral Resource figures must not be aggregated with Mineral Reserve figures. If reevaluation of Mineral Reserves indicates that they are no longer economically viable, the Mineral Reserves must be reclassified as Mineral Resources or removed from mineral resource/mineral reserve statements altogether. It is not intended that re-

classification from Mineral Reserves to Mineral Resources should be applied as a result of changes expected to be of a short term or temporary nature, or where management has made a deliberate decision to operate on a non-economic basis. Examples of such situations might be a commodity price drop expected to be of short duration or a mine emergency of a non-permanent nature.” [12]

“A ‘Probable Mineral Reserve’ is the economically mineable part of an Indicated and, in some circumstances, Measured Mineral Resource. It includes diluting materials and allowances for losses which may occur when the material is mined. Appropriate assessments, which may include feasibility studies, have been carried out and include consideration of and modification by realistically assumed mining, metallurgical, economic, marketing, legal, environmental, social and governmental factors. These assessments demonstrate at the time of reporting that extraction is reasonably justified. A Probable Mineral Reserve has a lower level of confidence than a Proved Mineral Reserve.” [12]

“A ‘Proved Mineral Reserve’ is the economically mineable part of a Measured Mineral Resource. It includes diluting materials and allowances for losses which may occur when the material is mined. Appropriate assessments, which may include feasibility studies, have been carried out and include consideration of and modification by realistically assumed mining, metallurgical, economic, marketing, legal, environmental, social and governmental factors. These assessments demonstrate at the time of reporting that extraction is reasonably justified.

The choice of the appropriate category of Mineral Reserve is determined primarily by the classification of the corresponding Mineral Resource and must be made by the Competent Person.

In situations where both Mineral Resources and Mineral Reserves are reported, a clarifying statement must be included in the report which clearly indicates whether the Mineral Resources are inclusive of, or additional to the Mineral Reserves.” [12].

En las definiciones antes entregadas si bien se hace mención a conceptos como muestreo, continuidad de la mineralización y evidencia geológica, solo menciona que la información disponible debe ser suficiente en calidad y cantidad para que la persona competente realice inferencias y categorice los recursos.

De esta forma es como no hay una estandarización de los métodos de categorización por lo que la tarea de la persona competente depende de su experiencia y opinión.

7.6.2 Métodos de categorización de recursos

Si analizamos los métodos de estimación de recursos utilizados en la actualidad, en general todos utilizan información similar para sus cálculos. Por ejemplo, el método inverso de la distancia (y sus variantes) utilizan la ubicación espacial o más específico la distancia entre el punto a estimar

y la muestra para obtener ponderadores y la influencia del valor de ley de la muestra sobre el punto a estimar. En el caso de kriging (y sus variantes) utilizan el concepto de continuidad espacial (variografía; relacionado con la distancia entre muestras y su variabilidad en distintas direcciones) y los valores de cada muestra (ley).

Para la correcta ejecución del proceso de estimación es importante tener control sobre la obtención de la información necesaria para la aplicación de los métodos de interpolación que correspondan.

Un segundo análisis a los métodos de estimación, obviamente dependiendo de cada uno, nos entregarán como resultado ciertas variables, como por ejemplo número de muestras utilizadas para la estimación, distancias máximas entre las muestras y el punto a estimar, eficiencia del kriging, varianza de kriging, entre otras.

Para ahondar más en los conceptos anteriores, se realiza un estudio en la TSX (Toronto Stock Exchange) investigando acerca de la tendencia en los métodos de categorización utilizados principalmente en los depósitos de Oro como producto principal. La TSX cuenta con una base de datos pública llamada SEDAR [9], donde es posible encontrar los reportes sobre prospectos de exploración minera de distintos lugares del mundo.

Se revisaron 120 proyectos mineros que tenían como elemento principal el Oro, los cuales fueron listados entre el 1 de enero de 2011 y el 28 de noviembre de 2022. [16]

En cuanto al tipo de depósito estudiado, los proyectos tenían la siguiente distribución:

1. Depósitos Orogénicos:27%
2. Depósitos Mesotermiales:18%
3. Depósitos epitermales:30%
4. Depósitos de Pórfidos:19%
5. Depósitos de tipo VMS:6%

En cuanto a los resultados del análisis realizado:

#	Criterio General	ID	Criterio Específico	Epitermal	Orogénico	Mesotermal	Pórfido	VMS
I	QA/QC	I	Calidad de información	4%	5%	7%	6%	7%
II	Geometría y Cantidad	II.1	Espaciamiento medio entre sondajes	4%	7%	0%	8%	13%
		II.2	Cantidad de sondajes	20%	16%	10%	13%	20%
		II.3	Distancia entre Sondajes y Centroides Bloque	16%	17%	17%	10%	
		II.4	Cantidad de compósitos	5%	11%	10%	9%	25%
		II.5	Distancia entre Compósito y Centroides del Bloque	22%	9%	13%	10%	
		II.6	Proximidad a afloramiento / Labores antiguas	4%	2%	3%	3%	
III	Continuidad Espacial	III.1	Parámetros Variograma	7%	7%	3%	10%	8%
		III.2	Continuidad Geología/Mineralización	9%	13%	17%	8%	13%
		III.3	Dominio Geológico/Unidades de estimación	4%	7%	10%	10%	7%
IV	Eficiencia del Kriging	IV.1	Eficiencia del Kriging	2%	2%	7%	8%	7%
	Slope of Regression	IV.2	Slope of regression	4%	5%	3%	8%	

Analizando los datos obtenidos, por ejemplo, en los depósitos epitermales de Oro los métodos de categorización más utilizados están relacionados directamente con la cantidad de sondajes utilizados en la estimación y la distancia Euclidiana entre el compósito y el centroide del bloque a estimar. En general si se profundiza el análisis, estas variables a considerar predominan en todos los tipos de depósitos.

Para el caso del cobre se realiza el mismo análisis, de 163 proyectos obteniendo los siguientes resultados de división de proyectos por tipo de geología:

1. Depósitos pórfidos: 53%
2. Depósitos VMS: 21%
3. Depósito Pórfido Skarn y/o Skarn: 12%
4. Depósito Sediment-Hosted Stratiform: 8%
5. Otros 6%

Respecto a los resultados sobre sus criterios de categorización, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 1: Criterios de categorización Cobre - TSX, ordenados por geología

#	Criterio de Categorización	Tipo de geología			
		Pórfido	VMS	Skarn	Sediment Hosted Stratiform
1	Número de sondajes	25%	24%	28%	27%
2	Espaciamiento entre sondajes	24%	22%	28%	33%
3	Número de muestras	8%	9%	8%	4%
4	Espaciamiento de muestras o compósitos	9%	8%	8%	13%
5	Continuidad Geología y Leyes	11%	16%	5%	16%
6	Varianza Kriging	19%	17%	20%	7%
7	Peso a sondajes contiguos	0%	0%	3%	0%
8	Calidad estimación otras variables	2%	2%	0%	0%
9	Dominios con categorización preferencial	2%	2%	0%	0%
	Total	100%	100%	100%	100%

Con el fin de realizar un análisis de variables que influyen en la categorización de recursos, se consideran solo las más utilizadas de modo de no alargar demasiado el estudio. Por ende, se omite el análisis de variables como slope of regression, peso a sondajes continuos, dominios con categorización preferencial y calidad estimación otras variables.

7.6.3 Aplicación o aproximación al problema

Como se pudo apreciar, existe una amplia gama de métodos para categorizar los recursos dependiendo del tipo de depósito tratado. Para hacer posible un análisis, es necesario vincular los métodos de categorización de recursos con los métodos de estimación y hacer una revisión de variables influyentes de los métodos de estimación en los de categorización. Por ejemplo, si analizamos las “variables de salida” del kriging nos encontraremos con números de muestras utilizadas para la estimación, distancia mínima y máxima a las muestras, cantidad de sondajes usados en la estimación, etc. Dicho análisis es de utilidad debido a que las variables definidas serán las utilizadas posteriormente para realizar la categorización en el caso de estudio.

Cabe destacar que, para realizar la categorización de recursos, mientras más variables/información se consideren, mejores y resultados más confiables se obtienen. Comenzando por la información geológica (continuidad geológica), la calidad de información (QA/QC), consideraciones de cantidad de información (densidad de sondajes), tipo de depósito, etc. Además, queda a criterio de la persona competente la interpretación de la información entregada.

A continuación, se realiza un análisis de cómo se utiliza cada técnica de categorización:

QA/QC

Calidad de Información

En todo el proceso de obtención de información se deben aplicar un proceso de aseguramiento y control de calidad (QA/QC), el cual se refiere a todas aquellas actividades que se realizan para el aseguramiento y control de la calidad de la información obtenida.

Generalmente dicho control se realiza mediante la aplicación de “protocolos de aseguramiento y control de calidad” en cada uno de los procesos tanto de obtención de muestras, como de manipulación y análisis de estas. Dichos protocolos son generados por las empresas que realizan cada tarea, y también ellos son los responsables de transmitir los resultados y protocolos aplicados al momento de realizar las tareas de exploración.

Las tareas que se someten a dichos análisis son:

- Obtención de muestra (perforación)*: Se controla la geo referencia y los errores asociados a los procesos de obtención de dichos datos. Por ejemplo, ubicación o collar, desviación, largo, etc.
- Manipulación de sondajes*: Se controlan los procesos de por ejemplo manejo y almacenamiento de testigos/detritos.
- Preparación de muestra*: Incluye los procesos de recopilación y preparación de las muestras ya sean de testigos o detritus. Además de su cadena de custodia.
- Mapeo Geológico*: Revisión de estandarización y completitud de la información proveniente del trabajo de análisis geológico del sector en estudio.
- Laboratorio*: Protocolos en procesos de análisis de muestras para obtención de leyes, densidades, entre otros parámetros.
- Base de datos*: Posibles errores de transcripción.

La persona competente, tiene el deber de analizar dichos protocolos recibidos para decidir si la información es de la calidad suficiente para realizar inferencias sobre una factibilidad de explotación del área en estudio.

Espaciamiento medio entre sondajes

En el proceso de exploración se define lo que son las mallas de perforación (muestreo), donde se incluye el espaciamiento entre los sondajes y también su orientación.

Para clasificar recursos de acuerdo al espaciamiento medio entre sondajes, es necesario proponer rangos de clasificación, por ejemplo, recursos medidos para una malla de perforación de 15x15 m, recursos indicados mallas de 35x35 m y recursos inferidos en una malla de 50x50 m o sobre esas dimensiones. De esta forma se puede asegurar una densidad de sondajes, y también implícitamente una distancia máxima de los puntos (bloques) a estimar respecto de los sondajes, incluso es muy común que dichas variables se combinen en un método de categorización.

Distancia entre sondajes y centroide bloque

Todos o la mayoría de los métodos de estimación consideran esta variable, basándose en el principio de que mientras más cercana es una muestra/sondaje al punto a estimar, mayor influencia tiene sobre su valor estimado. Entonces, se generan también intervalos de clasificación, por ejemplo, recursos medidos se consideran como los bloques estimados con muestras provenientes de sondajes a una distancia máxima de 20m, indicados a una distancia máxima de 40 m e inferidos a una distancia mínima de 40 m.

Cantidad de sondajes

Para la estimación de ley de un bloque es importante la cantidad de información utilizada, no puede ser poca, debido a que se incurre en asumir información que no se tiene, ni demasiada, debido a la redundancia de los datos. Es por eso que la cantidad de información influye en la calidad de la estimación. Por ende, se plantean intervalos de cantidad de sondajes utilizados en la estimación de un bloque o punto. Por ejemplo, un bloque se considera recurso medido si su estimación se realiza utilizando como mínimo 5 sondajes. Indicado si fue estimado utilizando un mínimo de 3 e Inferido si fue estimado utilizando máximo 2 sondajes.

Esta variable va a depender y es posible combinarla con criterios de la densidad de sondajes en el área (o bloque) en estudio, de las dimensiones del elipsoide de búsqueda.

Distancia entre muestra y centroide del bloque

Al igual que la distancia entre sondajes y el centroide del bloque esta variable se propone según el principio de que mientras más cercana una muestra al punto a estimar, mayor influencia tiene sobre él. Entonces se proponen rangos de la misma manera.

Cantidad de compósitos

La cantidad de información al momento de realizar una estimación es importante si analizamos su confiabilidad, por lo que utilizar en la estimación la cantidad adecuada de información puede ser beneficioso si se buscan resultados confiables. De aquí se proponen los intervalos como, los recursos serán categorizados como medidos si fueron estimados utilizando mínimo 7 muestras (compósitos), indicado mínimo 5 muestras e inferido máximo.

Continuidad Espacial

Parámetros Variograma

Como es sabido el variograma es la principal herramienta de representación de la continuidad espacial.

En el caso de la categorización de recursos, el parámetro del variograma utilizado es el alcance del variograma. Por ejemplo, los bloques se categorizarán como recursos medidos si fueron estimados en el primer paso de la estimación (es decir con rangos de búsqueda o ejes de elipsoides) del 70-75% del alcance del variograma. Recursos indicados 150% del alcance e inferidos sobre el 150% (generalmente paso 3, que corresponde al 300%).

Continuidad geológica – Mineralización

El análisis de un experto acerca de la información geológica, entrega datos sobre la continuidad de la mineralización dentro del área de estudio. La que debe ser considerada por la persona competente al momento de realizar la categorización, por ejemplo, si en un caso hipotético la mineralización no contara con una continuidad geológica aceptable, y posee una densidad de

sondajes bajos es muy probable que la persona a cargo de la certificación del prospecto declare dichos recursos como inferidos o que no caigan en ningún criterio y queden como recursos sin categoría.

Dominio Geológico – Unidades de estimación

En general, al dividir el depósito en dominios geológicos o unidades de estimación se representa de mejor forma la variabilidad o el comportamiento de las leyes, lo que mediante una buena definición de unidades de estimación debería desembocar en una estimación confiable, dependiendo de la calidad y la cantidad de información.

Lo anterior, se define según el criterio de la persona competente.

Proximidad a afloramiento o labores antiguas

Es una de las consideraciones que se tienen, más subjetivas, pero igualmente utilizadas por las personas competentes al realizar los informes. La proximidad a afloramientos o labores contiguas de un bloque a estimar, está relacionado con la cercanía a la información respecto del comportamiento o distribución del cuerpo mineralizado. Debido a que los afloramientos por ejemplo entregan información acerca de presencia y continuidad del cuerpo mineralizado, de la misma forma las labores antiguas (análisis de información de paredes) dan indicios sobre la distribución del cuerpo mineralizado, de su orientación y de su forma. Por lo anterior una persona competente puede definir la categoría de un bloque siguiendo estas características.

Kriging

Varianza de Kriging

El kriging (y sus variantes) es un estimador que entrega o que cuantifica la precisión de la estimación realizada mediante su varianza de kriging o varianza del error de estimación. Dicha variable se aplica a la categorización de recursos mediante la generación de intervalos, por ejemplo:

- a) Se considera recurso medido el que cuente con una varianza de kriging menos o igual a 0.33, indicado con varianza entre 0.33 y 0.66 e inferido mayor a 0.66.

- b) Además, existen otros métodos de la literatura antigua (no consideran las actuales regulaciones de CRIRSCO) planteados que trabajan o consideran la varianza o en su defecto la desviación estándar.

En el caso del método propuesto por Diehl y David, el cual define niveles de incertidumbre (confianza) y precisiones (tolerancias del error) para cada caso. La precisión que se mide en base a la tolerancia del error, emplea la desviación estándar relativa del kriging.

Los niveles de incertidumbre y precisión se definen según la siguiente tabla:

Tabla 2: Clasificación de recursos Diehl & David

	Identificado				Sin Descubrir	
	Demostrados			Inferidos	Hipotéticos (en áreas conocidas)	especulativos (en áreas en descubrimiento)
	Medidos		Indicados			
	Probada	Probable	Probable			
Tolerancia error (%)	±10%	±20%	±40%	±60%		
Confianza (%)	>80	60 - 80%	40 - 60%	20 - 40%	10 - 20%	<10%
	Recursos económicamente significantes					

$$\text{Precisión del error} = \frac{\sigma(x_k) * 100 * \mu_i}{z(x_k)}$$

donde μ_i corresponde al valor de la distribución normal estándar inversa (de dos colas) con probabilidad $i = (1 - \frac{1-\text{confianza}}{2})$, la cual se relaciona directamente con el grado de confianza para cada clasificación. σ_k corresponde al valor de la desv. Estándar de kriging y $Z(x_k)$ al valor estimado.

La ecuación se emplea despejando el valor de la desviación estándar relativa de kriging $\frac{\sigma(x_k)}{Z(x_k)}$ para obtener las interfases entre los recursos medido-indicado e indicado-inferido.

Como se puede apreciar en la tabla de clasificación de recursos este método antiguo, no sigue la relación general entre recursos y reservas impuesta por CRIRSCO. Si bien la clasificación es parecida, tiene aspectos y conceptos distintos al cuadro aceptado por el organismo internacional.

Cabe recordar que entre los alcances se menciona que los métodos aplicados son aquellos métodos que utilizan variables contables, las cuales su valor no es asignado en forma subjetiva o en criterio de una persona, sino que viene dada de resultados de estimación, ubicación geográfica

de muestras, conteo de muestras, etc. Lo anterior, debido a que con el fin de automatizar en parte este proceso o generar un código en el software RStudio que realice las tareas de categorización por nosotros se simplifica mucho al utilizar dichos métodos y dejar fuera de cierta forma la aplicación de criterios subjetivos.

8. Aplicación

8.1. Caso de Estudio Real

8.1.1 Descripción

Resumen

Proyecto de pertenencias Mineras Leopardo, corresponde a una zona que presenta concentraciones anómalas de cobre (Cu) como principal producto. Se encuentra ubicada en el Distrito Minero Sierra Ojancos Viejos, Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama.

Se trata de una estimación y categorización de recursos minerales de un depósito el cual fue explotado parcialmente. Es decir, se cuenta con labores mineras antiguas de explotación.

Los datos acerca de la propiedad minera, como de sus dueños se omiten.

Para la puesta en marcha de este proyecto, se realiza un estudio técnico que analice su viabilidad en función a los recursos mineros.

La base del estudio corresponde a una estimación de recursos, el cual está sustentado por datos aportados por un estudio en terreno realizado mediante sondajes, que determina un gran potencial de ocurrencia de minerales de sulfuros de Cobre. Los minerales se presentan principalmente en forma de veta, en relación directa con una estructura de rumbo N 15° a 25° y manteo 55° a 65° al W.

Antecedentes generales

Objetivos y alcances

El proyecto de pertenencias mineras Leopardo tiene como objetivo principal el análisis de recursos minerales presentes en la zona de estudio. Dicho análisis se realiza primero por la conformación de un modelo geológico mediante modelamiento explícito, se continúa con la construcción de un modelo de bloques para seguir con la estimación de los recursos minerales aplicando métodos usualmente utilizados para este tipo de depósitos. Los resultados obtenidos de dicha estimación serán categorizados en recursos medidos, indicados e inferidos según sea la confiabilidad en su estimación, aplicando variados métodos para la comparación y análisis de sus resultados.

Se toman y/o asumen las siguientes consideraciones:

-No se realiza análisis de factibilidad de explotación (método de minado ni económico) relacionado con la definición de reservas.

-Los resultados de análisis geológico, continuidad geológica y definición de unidades geológicas se asumen correctas y no se considerará su influencia al momento de aplicar los métodos de categorización.

-En cuanto a la calidad de información, se considera que proviene de fuentes confiables y al momento de su obtención se cumple con todos los protocolos QA/QC.

Antecedentes Geológicos

Geología Regional

En la Región de Atacama predominan sectores con rocas magmáticas y sedimentarias clásticas muestran una fuerte superioridad. Rocas metamórficas solo afloran en algunas áreas determinadas.

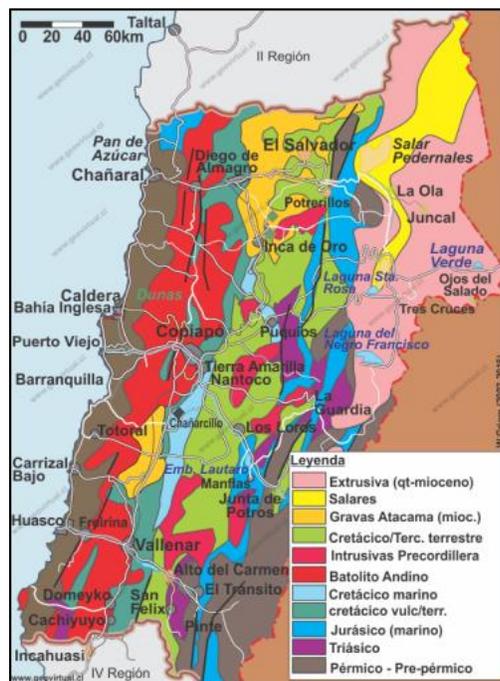


Figura 26: Geología regional área de estudio

Sierra Ojanco Viejo

Esta formación concierne a la formación granodiorítica de la costa, y se encuentra atravesada por numerosos filones de pórfidos felsíticos y de diorita cuarcífera de edad más moderna. Por lo general las vetas parten junto con los filones en dirección N. O – S. E y en N. S. debido a esto la corrida bastante larga y la potencia fluctúa entre pocos decímetros y varios metros, llegando a veces hasta 20 metros. En la mayoría de los casos se inclina fuertemente hacia el oeste. La zona oxidada es pequeña, apareciendo los sulfuros que remplazan a los minerales de color ya a poca profundidad.

Geología del depósito

La geología del sector está conformada por un cuerpo mineralizado del tipo vetiforme, con una potencia de 15 m de ancho como promedio. El mineral de interés de corresponder a un porcentaje de mineral cobre insoluble con leyes que están entre 0.3 - 5 %. Se presenta una geología clara que controla el mineral y donde visualmente se aprecia que predomina la calcopirita, acompañada de piritas, magnetitas, cuarzo y bajas cantidades de bornita.

Formas y estructuras del cuerpo mineralizado

Para la obtención del cuerpo mineralizado, la información utilizada idealmente es tratada por un experto en la materia (geólogo), pero de igual manera se acude al método clásico de modelamiento geológico explícito mediante líneas de isoleyes, considerando una ley de corte aprox de 0.3-0.5%.

Se presenta una simetría tabular con un largo considerable. Sus dimensiones van de 240 metros aproximadamente en su eje mayor (largo) y 15 metros aproximadamente en su eje menor (ancho). El rumbo de la estructura es N 20°E y su inclinación (manteo) es de 60° W a vertical.

A continuación, se presenta una vista de planta de la ubicación del cuerpo mineralizado con respecto a la Propiedad Minera Leopardo.

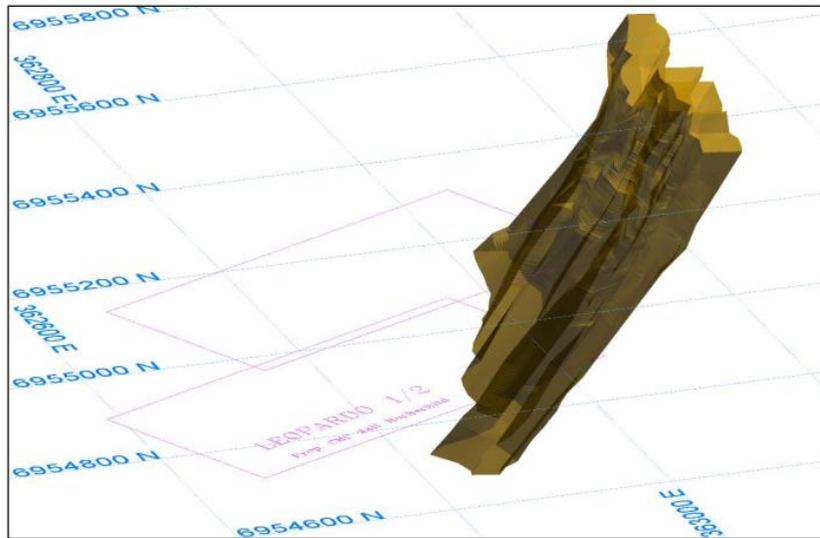


Figura 27: Vista ubicación y forma cuerpo mineralizado

Base de datos de sondajes

La información presentada, en su mayoría fue obtenida mediante la realización de distintas campañas de sondajes con perforación diamantina (recuperación de testigos).

Se presentan un total de 185 sondajes, con un total de 21.570 metros de perforación que contienen información de: ubicación espacial de collar, survey (inclinación), concentración de cobre (Ley Cu) y concentración de Oro (Ley Au), valores de densidad y litología.

En el caso de la ley de Cobre se presenta en porcentaje (%) y la ley de Oro en ppm o gr/ton.

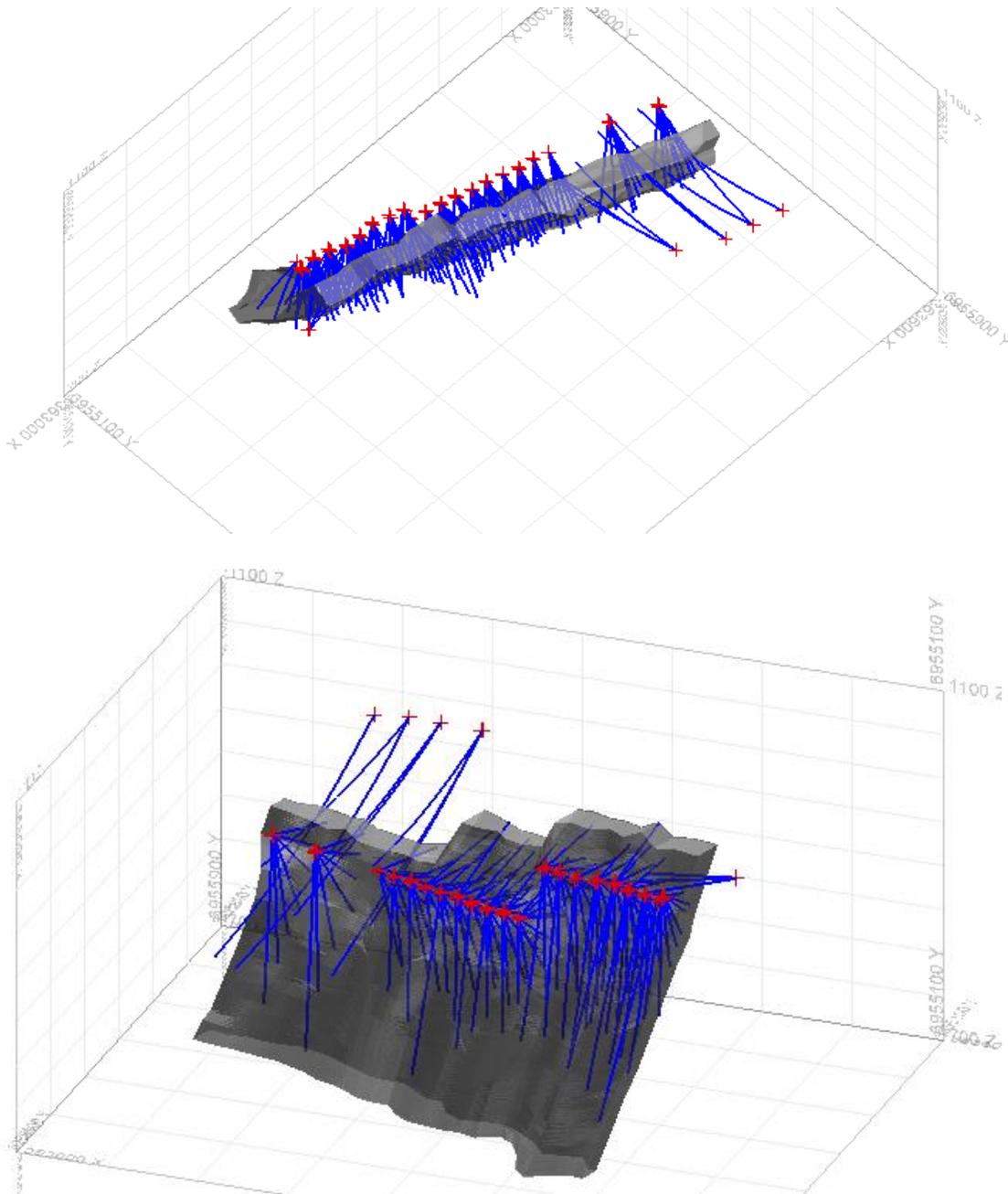


Figura 28: Despliegue de sondajes interceptando zona mineralizada

8.1.2 Análisis

Análisis Geoestadístico

Una vez realizado el proceso de generación de un modelo geológico, con el fin de lograr un mayor entendimiento acerca del comportamiento del mineral (leyes) dentro de la veta. Se realiza análisis que comienza con la observación de las estadísticas básicas de las muestras disponibles para el estudio, seguida del proceso de búsqueda de uniformidad del soporte de las muestras mediante la composición.

El análisis variográfico toma como datos de entrada el resultado de la composición de las muestras, y a su vez es información de entrada necesaria para el proceso de simulación de leyes, siendo su función principal el entendimiento del comportamiento de la variable de interés compositada en diversas direcciones.

Muestras - Estadísticas básicas

Las estadísticas básicas de las muestras de sondajes que interceptan la veta se presentan en la Tabla. De esta tabla en conjunto con la Figura se puede observar que la veta se encuentra ampliamente muestreada. Asimismo, los histogramas de la Figura 5-4 muestran por un lado que esta veta posee un amplio espectro de leyes con media 0.338 % Cu, y por otro, que los largos de las muestras son por lo general mayores a 0.8m, teniendo la veta una potencia media de 26.38 m.

Tabla 3: Características sondajes sobre veta

ITEM	VALOR	UNIDAD
MUESTRAS	12794	#
SONDAJES	186	#
METROS INTERCEPTOS VETA	7629.7	m
LEY MEDIA CU	0.338	%
MODA LARGO MUESTRAS	1.000	m
POTENCIA MEDIA DE VETA (APROX)	26.4	m

Histograma ley muestras

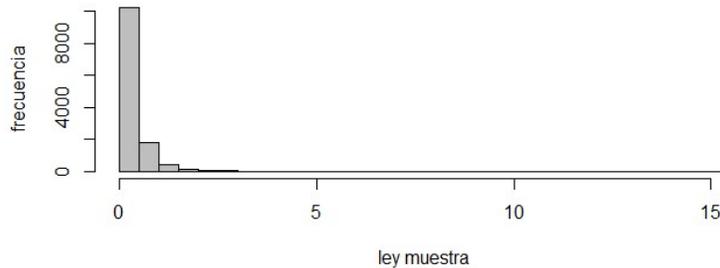


Figura 29: Histograma Ley Muestras

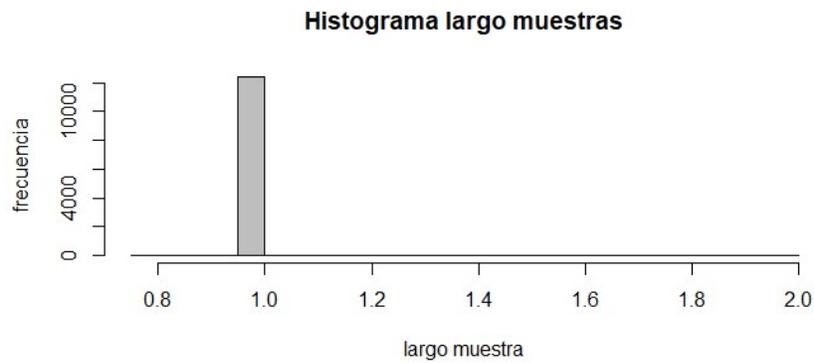


Figura 30: Histograma Largo Muestras

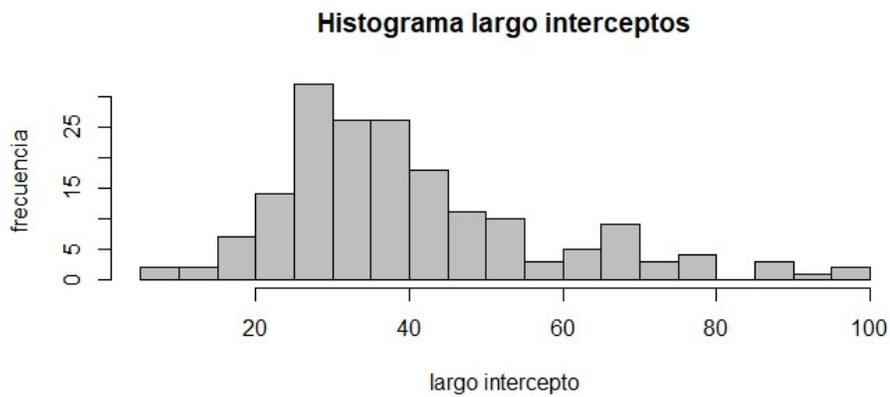


Figura 31: Histograma Largo Interceptos

Composición

Para el proceso de composición se utiliza el largo más frecuente utilizado en la industria que corresponde a 1 m. La comparación de estadísticas básicas se presenta a continuación:

Tabla 4: Estadísticas básicas muestras y compósitos

ITEM	UNIDAD	MUESTRAS	COMPÓSITOS
MUESTRAS	#	12512	21320
LEY MEDIA	%	0.346	0.373
MÍNIMO	%	0	0
1ER CUARTIL	%	0.04	0.07
3ER CUARTIL	%	0.42	0.455
MÁXIMO	%	15.04	15.04
LEY MEDIA DENTRO DE VETA	%	0.45	0.472

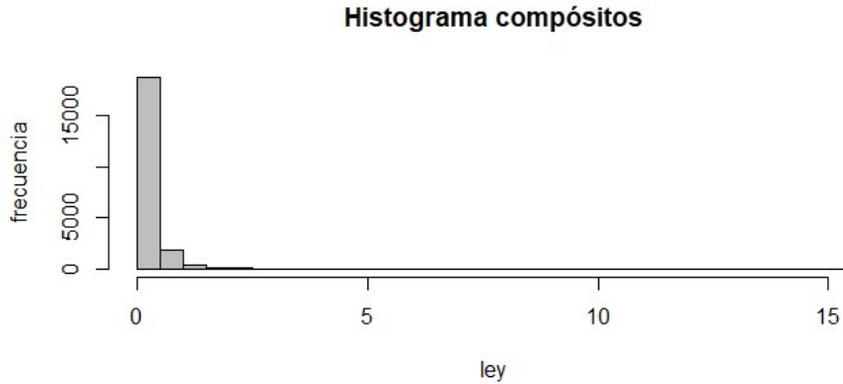


Figura 32: Histograma Compósitos

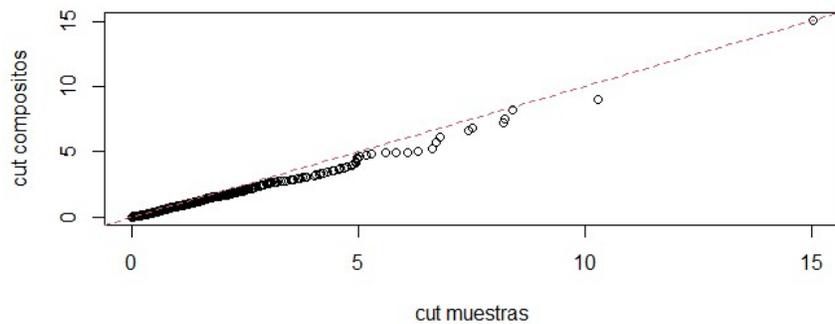


Figura 33: Gráfico cuantil a cuantil Muestras vs Compósitos

De la Tabla es posible observar que la ley media de los compósitos y las estadísticas por cuartil son menores con respecto a la ley de las muestras. Esto es debido a que, al revisar la base de datos, así como también las vistas de sondajes presentadas, los tramos de sondajes desde el collar hasta interceptar la veta son largos y de baja ley (fuera de zona mineralizada), lo que al llevarlos a varios compósitos más pequeños se transforman en una gran cantidad de compósitos con leyes bajas. Este efecto puede verse en el gráfico cuantil a cuantil de la Figura sobre leyes 2.5 % Cu. Finalmente, con respecto a su distribución, es posible observar de la Figura 5-8 que estos compósitos siguen una distribución aproximadamente Lognormal.

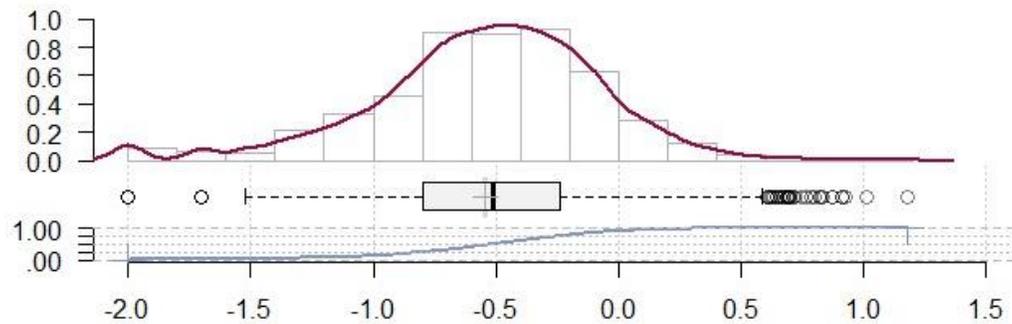


Figura 34: Gráfico probabilidad acumulada, histodrama y diagrama de caja de los compósitos transformados a logaritmo

Variografía

El grado de variabilidad espacial en un depósito depende de la distancia y la dirección entre puntos en comparación. Típicamente, aumenta la variabilidad mientras aumenta la distancia.

El semivariograma es una función común para medir la variabilidad espacial en un depósito. El proceso de análisis variográfico comienza con la generación de múltiples variogramas (en todas las direcciones) a lo que se llama mapa variográfico, donde es posible identificar direcciones principales de continuidad de leyes. Mediante este análisis en todas las direcciones se busca ajustar un modelo que sea apto para todas las direcciones y representar la variabilidad intrínseca del depósito en estudio.

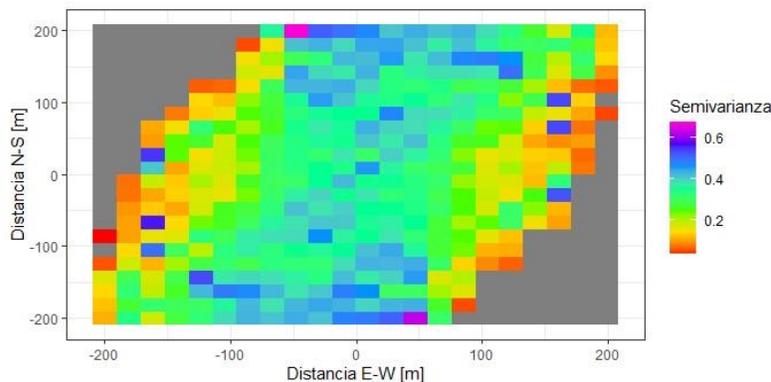


Figura 35: Mapa variográfico

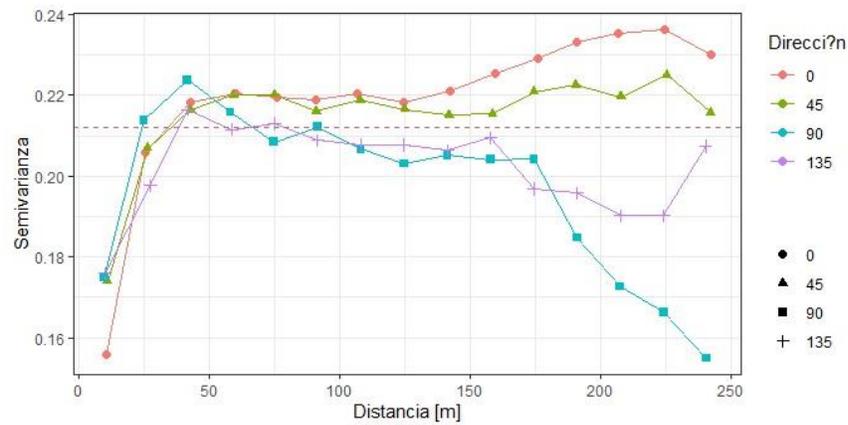


Figura 36: Variogramas direccionales

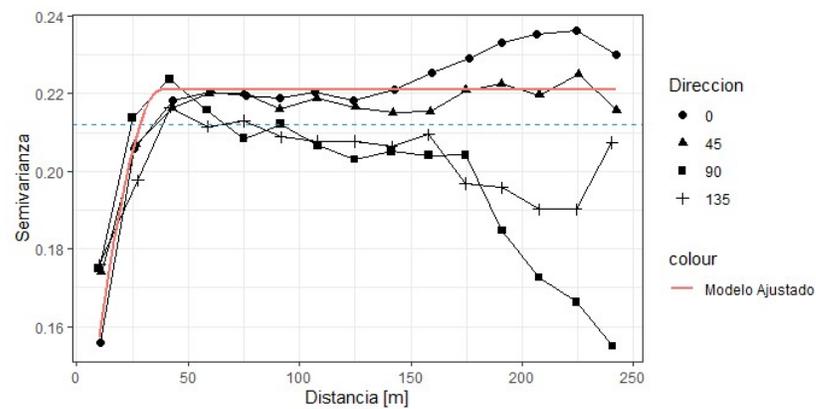


Figura 37: Modelo Variograma ajustado

Tabla 5: Parámetros de modelo ajustado

MODELO	APORTE MESETA	ALCANCE
PEPA	0.016151	-
ESFÉRICO	0.190849	26.2
ESFÉRICO	0.024	11.5

El comportamiento de las leyes presentado en los variogramas direccionales de la Figura 37, hace fácil su modelamiento. Los parámetros del modelo resultante se muestran en la Tabla 6.

8.1.3 Estimación de leyes

La simulación de leyes se realiza mediante los métodos Inverso de la Distancia cuadrado (Exponente 2) y Kriging Ordinario, como este trabajo no trata de optimizar procesos de estimación. Solo se usarán estos dos métodos para así producir dos conjuntos resultantes y trabajar ambos de igual forma al momento de categorizar.

Para ambos casos se realiza la estimación utilizando el mismo plan (parámetros). Obteniendo así, 2 modelos de bloques resultantes: 5 KO (Modelo de bloques de dimensiones 5x5x5 m estimado por kriging ordinario) y 5 ID2 (Modelo de bloques de dimensiones 5x5x5 m estimado por Inverso Distancia al cuadrado).

Tabla 6: Características modelos de bloques

Método Estimación	Dimensiones			Número total de bloques
	Este [m]	Norte [m]	Elevación [m]	
Kriging Ordinario	5	5	5	34184
Inverso Distancia Cuadrado	5	5	5	34205

Como se comenta, se obtienen en total 2 modelos de bloques de dimensiones 5x5x5m. Lo anterior se realiza para observar variaciones respecto del cambio de método de estimación y utilizar lo anterior para realizar alguna inferencia sobre las comparaciones.

Plan de estimación

Plan 1: Plan de kriging

Tabla 7: Parámetros de estimación utilizados para Kriging Ordinario

ELIPSOIDE DE BÚSQUEDA			DISTANCIA DE BÚSQUEDA			NUM COMPÓSITOS ESTIMACIÓN				
Bearing	Plunge	Immersion	Eje Mayor	Semi Eje	Eje Menor	Mínimo	Máximo	Max/Sond	Min num sond	Max num sond
20	0	60	70	45	20	3	28	6	2	20

Plan 2: Plan Inverso Distancia Cuadrado (Exponente 2)

Tabla 8: Parámetros de estimación para aplicación Inverso de Distancia

EXPONENTE	REGIÓN DE BÚSQUEDA			DISTANCIA DE BÚSQUEDA			NUM COMPÓSITOS ESTIMACIÓN				
	Bearing	Plunge	Immersion	Eje Mayor	Semi Eje	Eje Menor	Mínimo	Máximo	Max/Sond	Min sond	Max sond
2	20	0	60	70	45	25	3	28	6	2	20

Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la estimación realizada para ambos métodos utilizados. Mediante la curva tonelaje ley, visualización de estadísticas básicas tanto de compósitos como de bloques para su comparación, además de un set de gráficos adicionales (swath plots, histogramas y gráficos cuantil a cuantil) para mejor comprensión de los resultados obtenidos.

Gráficos tonelaje vs ley

La obtención del tonelaje para obtener la gráfica tonelaje.ley se realizó utilizando una densidad de roca de 2,8 ton/m³, esto multiplicado por el volumen de cada bloque (2x2x2m y 5x5x5m) nos entrega el tonelaje presente en cada uno de los bloques, la densidad como se definió en los alcances es uniforme en todo el depósito. Los resultados obtenidos de lo anterior se presentan en el siguiente gráfico en conjunto con la tabla que lo sigue.

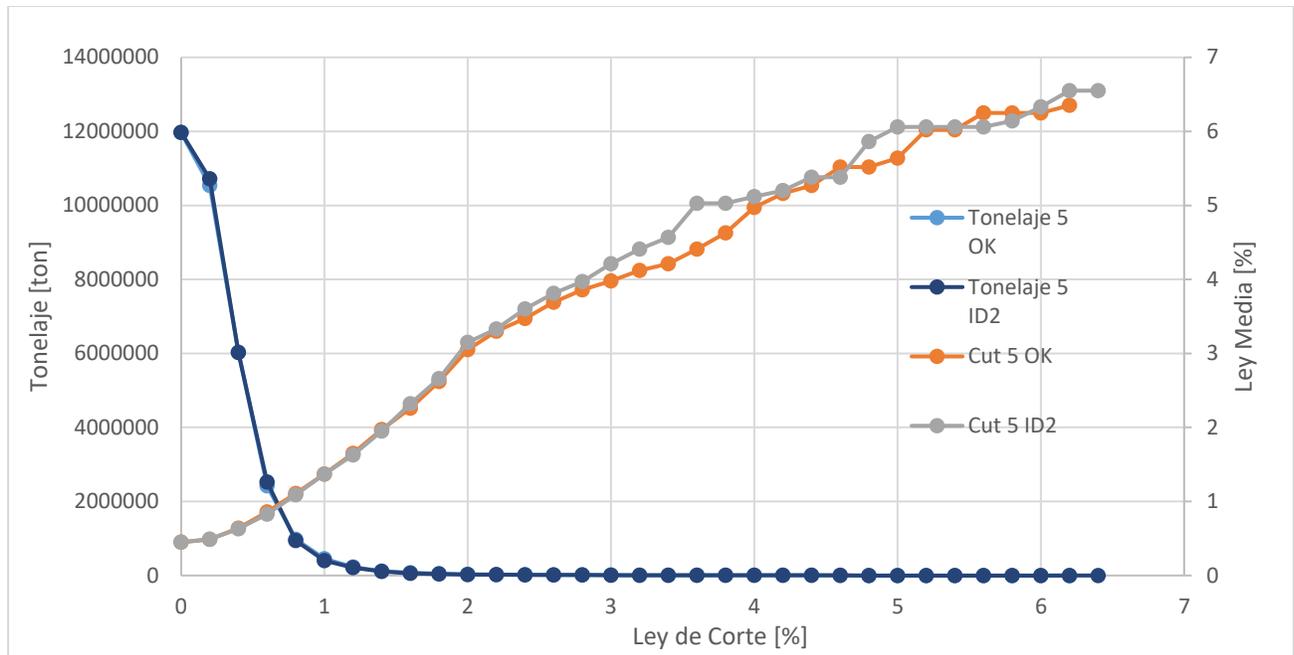


Figura 38: Gráfico Tonelaje vs Ley modelos bloques obtenidos

Tabla 9: Tabla valores Tonelaje y Ley media por método de estimación

Kriging Ordinario (5m)			Inverso Distancia (5m)	
Cutoff	Cut	Tonelaje	Cut	Tonelaje
[%]	[%]	[ton]	[%]	[ton]
0	0.45	11964400	0.45	11971750
0.2	0.49	10535700	0.49	10715600
0.4	0.64	6035050	0.63	6020700
0.6	0.86	2420250	0.83	2528050
0.8	1.11	981400	1.09	940100
1	1.37	450450	1.37	397950
1.2	1.65	225750	1.63	208600
1.4	1.97	121100	1.95	106050
1.6	2.26	75250	2.32	58800
1.8	2.62	46200	2.66	38150
2	3.05	29050	3.15	23450
2.2	3.3	23100	3.33	19950
2.4	3.47	19600	3.6	15750
2.6	3.69	16100	3.81	13300
2.8	3.86	13650	3.97	11550
3	3.98	12250	4.21	9450
3.2	4.12	10500	4.41	8050
3.4	4.21	9450	4.57	7000
3.6	4.41	7350	5.03	4900

Los resultados del fino total dentro de los modelos resultantes son esperables ya que tenderán a sobreestimar las leyes bajas y subestimar las altas, Por lo que su rango de leyes, tal como se espera, es menor al de los compósitos utilizados para su cálculo.

Los resultados muestran un comportamiento similar en cuanto a los tonelajes y las leyes medias, en el caso del tonelaje se comporta de igual forma en ambos modelos debido a que el espacio limitado de trabajo es dentro de la veta (modelo geológico) por lo que los tonelajes son similares. En caso de la ley media, esta tiene sus variaciones debido a que el método de Kriging Ordinario se caracteriza por suavizar las leyes en sus cálculos en mayor medida que el inverso de la distancia, quien muestra valores más extremos.

Estadísticas Básicas

Al momento de realizar la estimación, idealmente el modelo obtenido representará el comportamiento de las leyes presentes en las muestras (compósitos). Una forma de observar lo anterior es comparando las estadísticas básicas de cada uno de estos y comparándolas.

Tabla 10: Resumen estadísticas compósitos y bloques

ÍTEM	UNIDAD	COMPÓSITOS SONDAJES	COMPÓSITOS INTERCEPTOS	BLOQUES KRIGING	BLOQUES ID2
				(5X5X5m)	(5x5x5m)
Datos	#	21320	7625	34184	34184
Media	%	0.203	0.469	0.452	0.453
Máximo	%	15.04	15.04	6.348	6.54
3er Cuartil	%	0.25	0.58	0.56	0.568
Mediana	%	0.04	0.31	0.40245	0.401
1er Cuartil	%	0	0.16	0.27	0.279
Mínimo	%	0	0	0.00024	0.015

Las estadísticas básicas indican que en general los bloques tienen comportamiento similar al de los compósitos que se encuentran dentro del modelo geológico (interceptos) debido a la cercanía presentada en los resultados. Donde se notan las mayores diferencias es en los valores extremos de leyes (mínimo y máximo) de los compósitos con los distintos modelos de bloques resultantes, esto se debe a que en general los métodos de estimación tienden a suavizar los valores de leyes, esto lo hace ya que considera más de una sola muestra (restricción de estimación) para estimar un bloque y los valores extremos por ejemplo de leyes en las muestras

son aislados, y en general acompañados por leyes más bajas que logran regular el valor estimado alrededor de la muestra extrema.

El “Swath plot” generado trata de un gráfico que muestra las leyes medias de los bloques por tajada o capa, en este caso por cada cota, además de su tonelaje.



Figura 39: Swath Plot para métodos ID2 y KO (bloque 5x5x5m)

Al observar el gráfico obtenido, se muestra que en las cotas bajas o la parte baja de la zona mineralizada hay grandes diferencias entre las leyes medias de los métodos. Desde la cota aproximadamente 800 el comportamiento se vuelve similar. Lo anterior se puede atribuir a que en las zonas más profundas existe menos densidad de muestreo.

Histogramas

Respecto a los histogramas, se comparan los histogramas de cada uno de los modelos de bloques con el de los compósitos utilizados en la estimación.

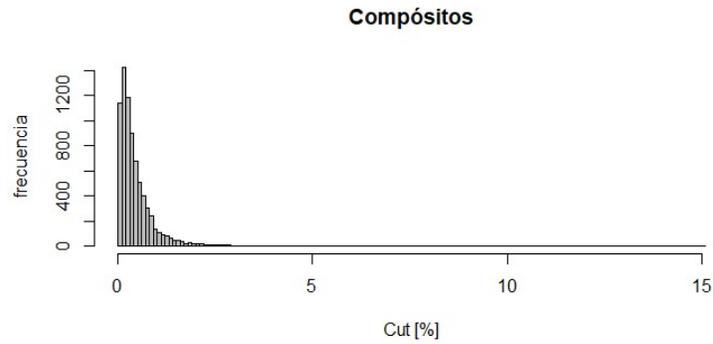


Figura 40: Histograma Compósitos

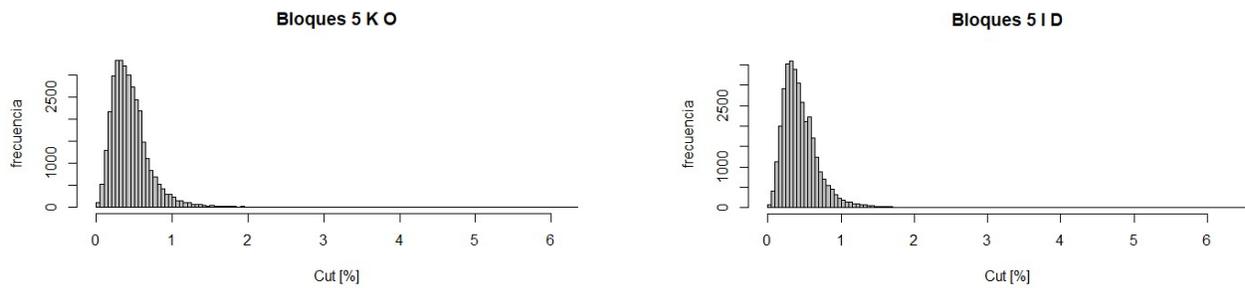


Figura 41: Histogramas de modelos resultantes estimación

Los histogramas presentados a simple vista no se encuentran diferencias entre los modelos estimados. Si hay diferencias respecto del histograma de los compósitos ya que como hemos mencionado en los compósitos se encuentran una gran cantidad de leyes de valores cercanos a cero, leyes que al estimar y utilizar para ello más de un solo compósito el comportamiento se suaviza, nos alejamos de los valores extremos como el cero.

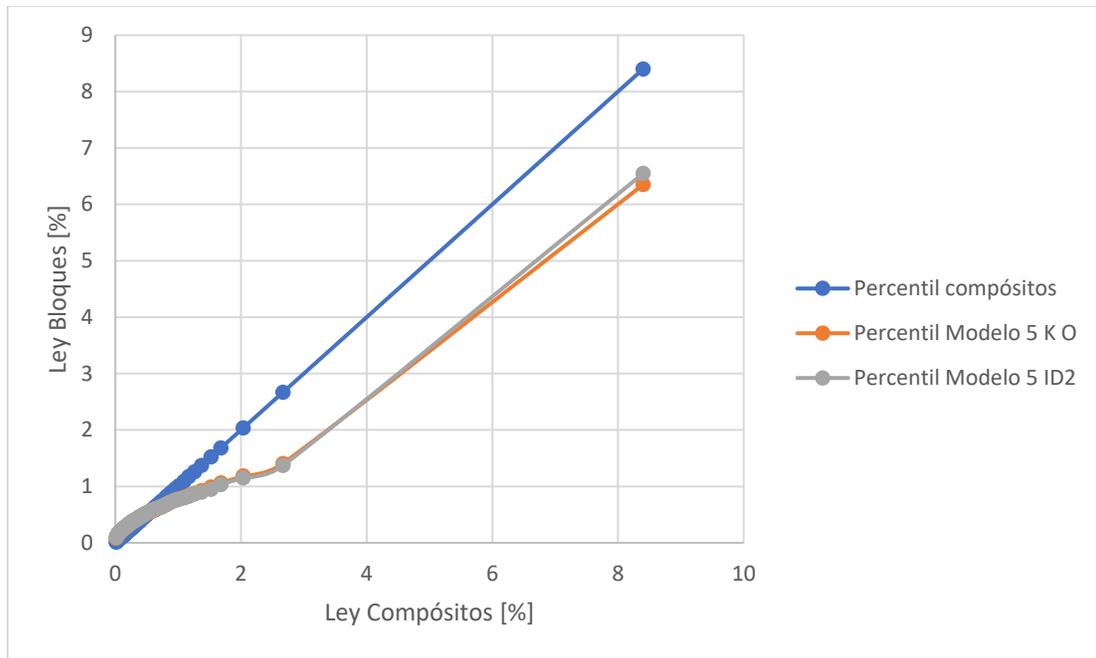


Figura 42: Gráfico cuantil a cuantil Compósitos vs Bloques estimados

Observando el gráfico cuantil a cuantil de leyes de los compósitos vs las leyes de los bloques estimados por distintos métodos de estimación. Se observa una similitud entre las distribuciones hasta las leyes entre 1.2% aprox, esto se debe a que si observamos los histogramas junto a la información estadística de los compósitos encontrados dentro de la veta nos encontramos con que su 3er cuartil es 0.58% y su máximo 15.04% lo que apunta nuevamente al suavizamiento producido por los métodos de estimación. Es posible atribuir esto también a que las leyes de valores altos presentes en los compósitos son pocas, además para estimar un solo bloque si observamos el número de compósitos utilizados nos encontramos con un número alto (sobre 20) entonces al haber mayor disponibilidad (cantidad) de leyes bajas para estimar un bloque el método las utiliza de modo de priorizar la cantidad de información utilizada para estimar. De igual manera con leyes de hasta 1.5% se encuentran distribuciones similares en los bloques a la de los compósitos. Lo anterior muestra el “suavizamiento” de leyes producido por los métodos de estimación aplicados.

Actualmente, en la industria se realizan varias capas de estimación mediante distintos métodos con el fin de optimizar los parámetros y a su vez la calidad en los resultados obtenidos.

Representación Visual

Análisis variables bloques estimados por kriging ordinario

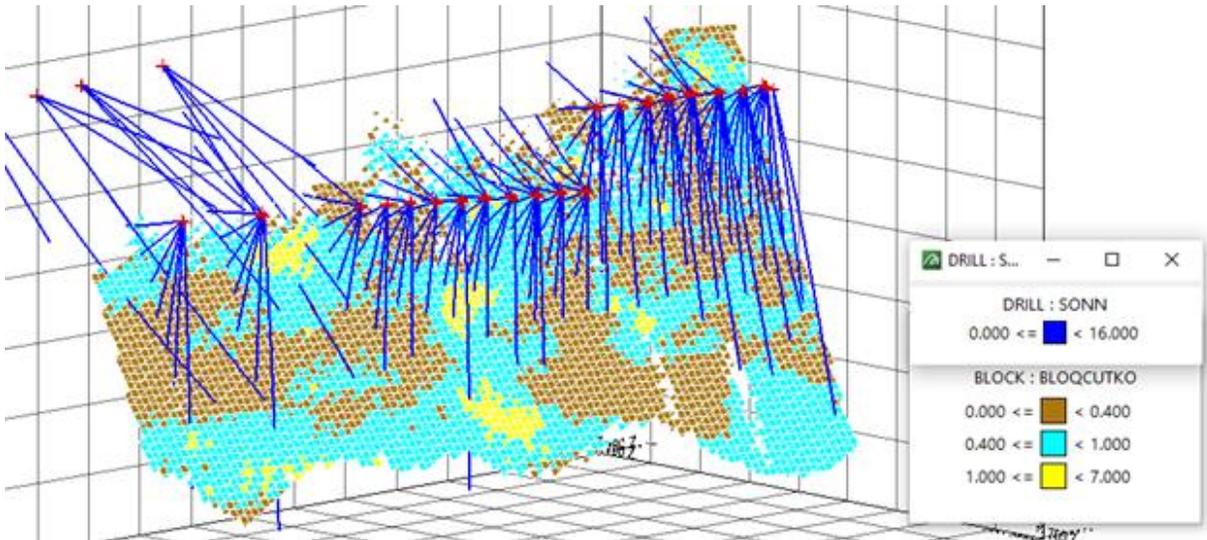


Figura 43: Vista sección resultados estimación mediante Kriging. Ley de cobre.

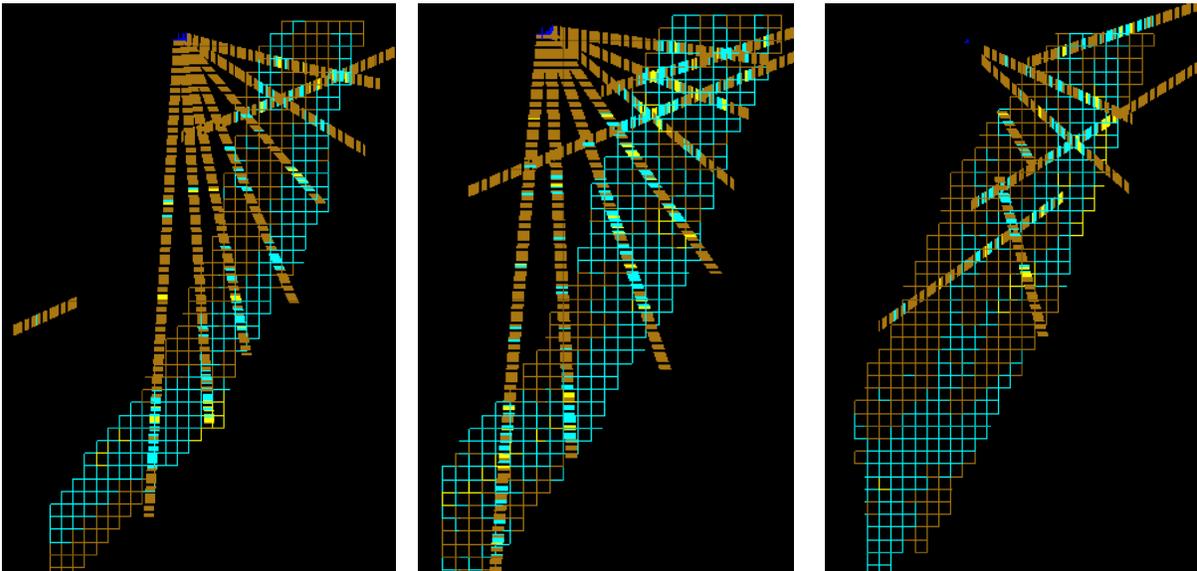


Figura 44: Secciones de muestra, bloques resultantes de estimación Kriging Ordinario y sondajes

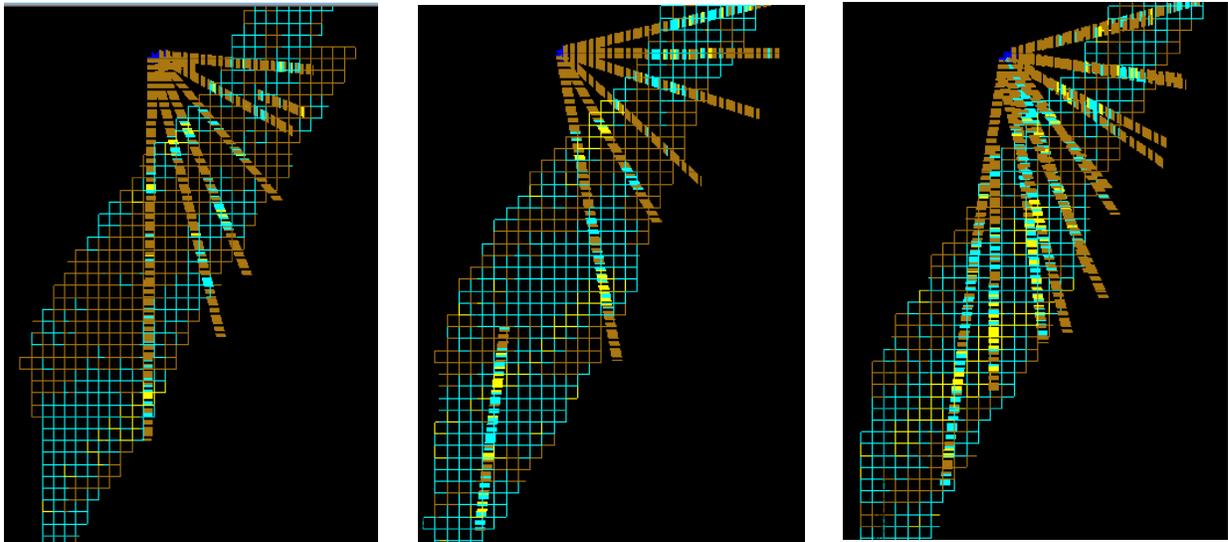


Figura 45: Secciones de muestra bloques resultantes estimación por Kriging Ordinario y sondajes

El caso de las leyes de cobre muestra importantes acumulaciones de leyes altas (sobre 0.5%) en mayor parte en los sectores del modelo menos muestreado (o con menor densidad de sondajes) que corresponde a las zonas de cota baja.

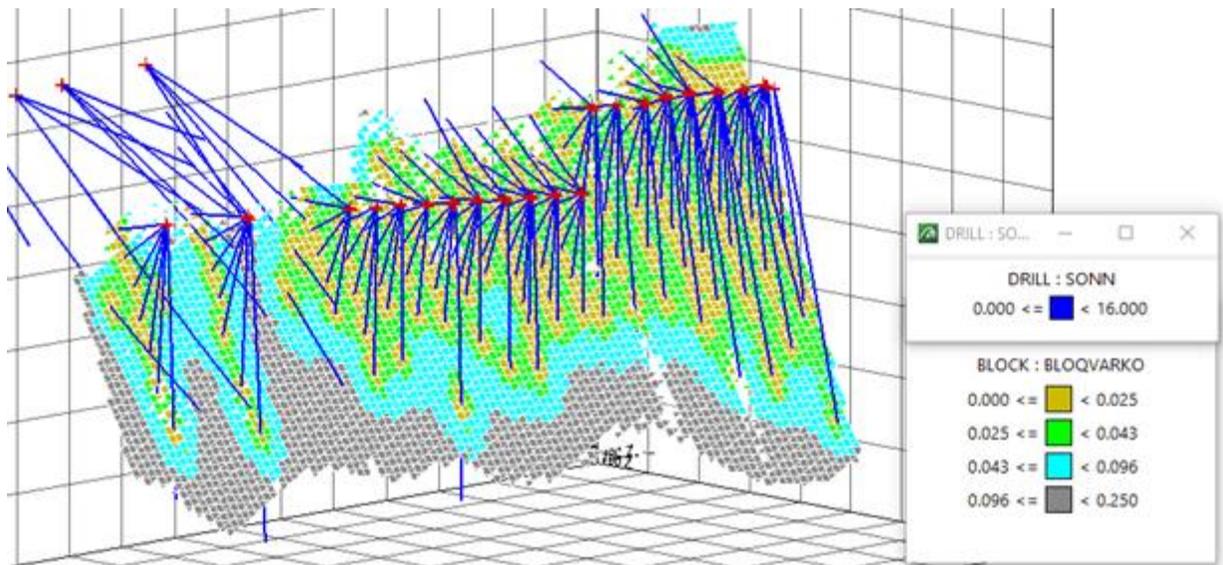


Figura 46: Vista sección resultados estimación. Varianza de Kriging

Como era de esperar, al analizar la varianza de kriging se puede observar una clara tendencia a aumentar a medida de aumentar la distancia entre sondajes, o visto de otra forma, en los sectores donde la densidad de sondajes es menor el valor de la variable varianza de kriging tiende a aumentar.

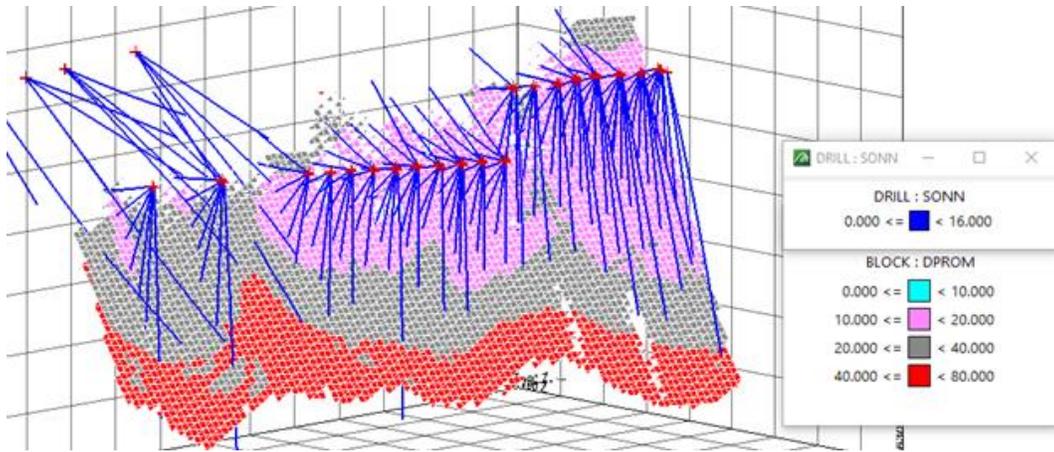


Figura 47: Vista sección resultados estimación. Distancia promedio

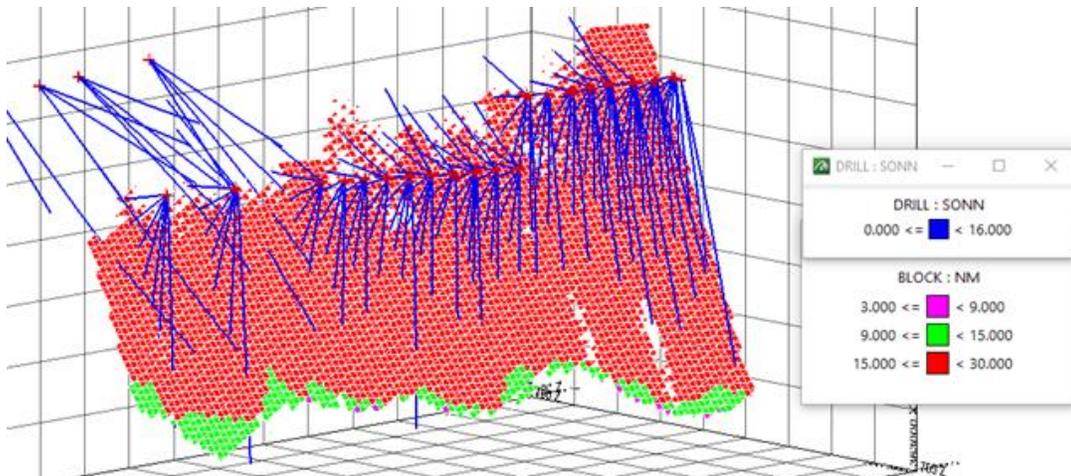


Figura 48: Vista sección resultados estimación. Número de muestras

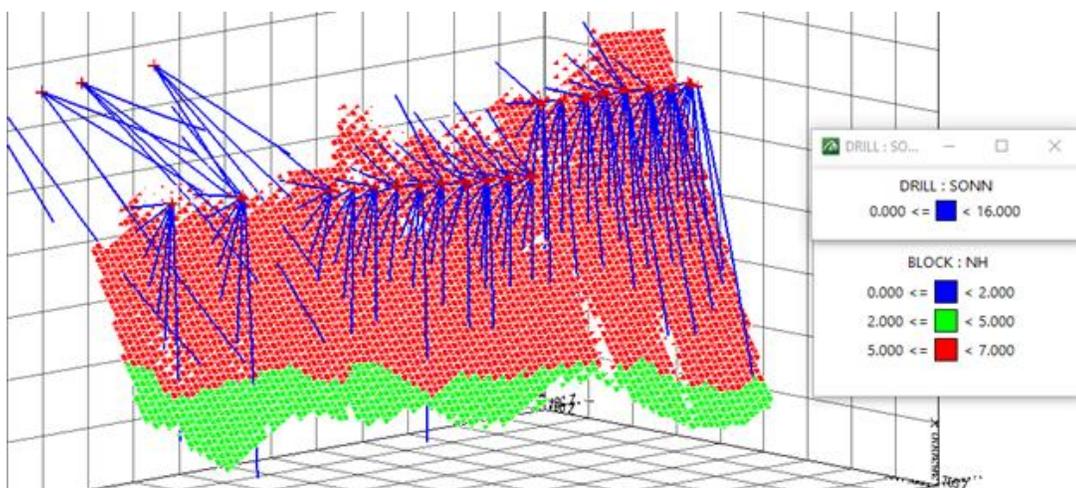


Figura 49: Vista sección resultados estimación. Número sondajes utilizados

Las variables geométricas presentes en los resultados de estimación de Kriging (Número de muestras, distancia promedio a muestra y número de sondajes) muestran una clara tendencia a aumentar al alejarse de zonas con alta densidad de sondajes. Lo anterior cumple con la lógica, debido a que, por ejemplo, en caso de número de muestras utilizadas, están restringidas por los radios de búsquedas planteados en el plan de estimación lo que al estar alejados de los sondajes es lógico que se utilicen menos muestras (que haya menos muestras dentro del radio de búsqueda dado). Situación similar sucede con las variables número de sondajes (nh) y distancia promedio a muestras (dprom).

Análisis variables bloques estimados por Inverso de la distancia cuadrado.

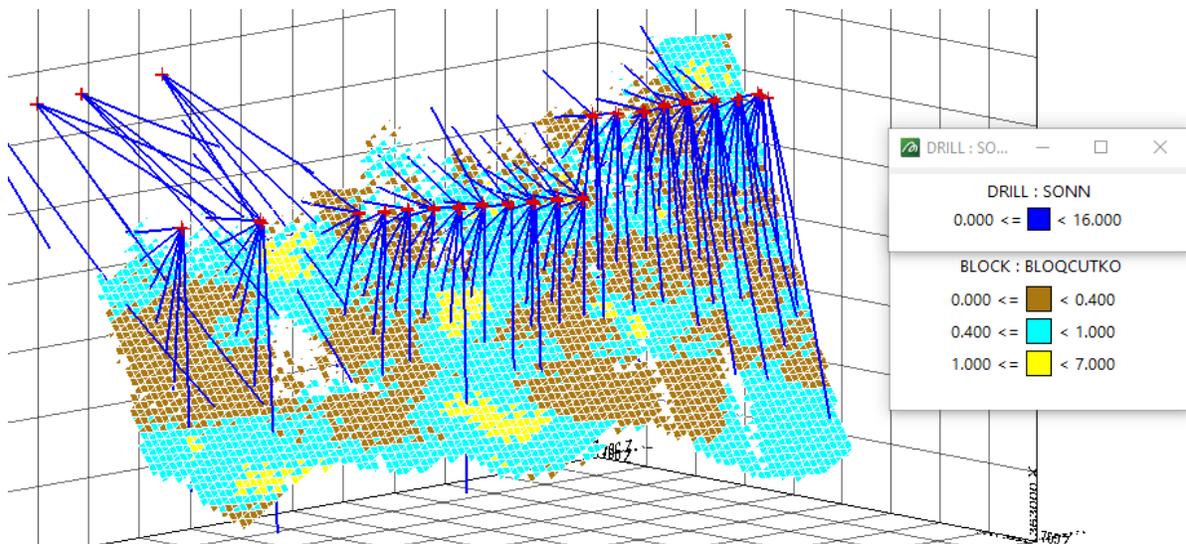


Figura 50: Vista sección resultados estimación por Inverso de la Distancia. Ley de cobre

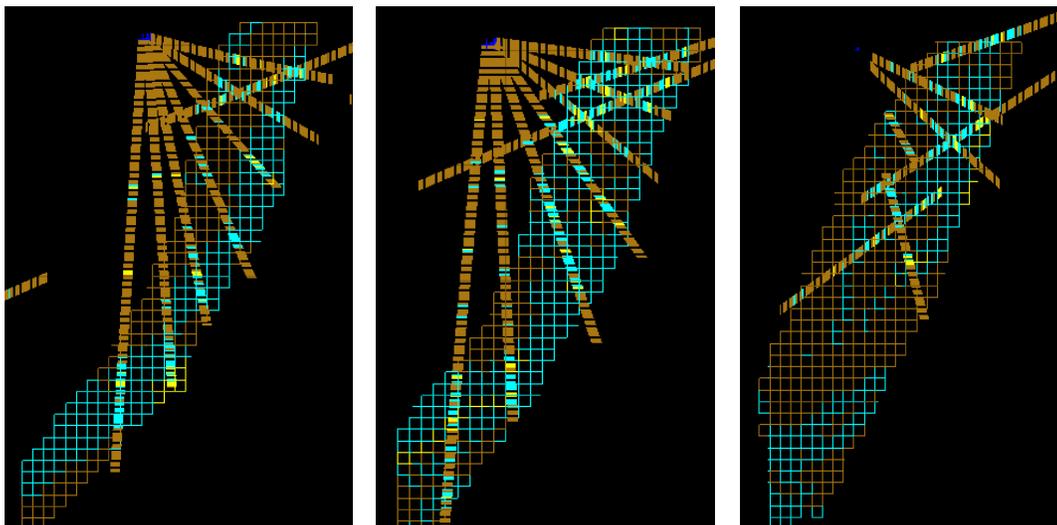


Figura 51: Secciones de muestra bloques resultantes estimación por Inverso de la Distancia y sondajes

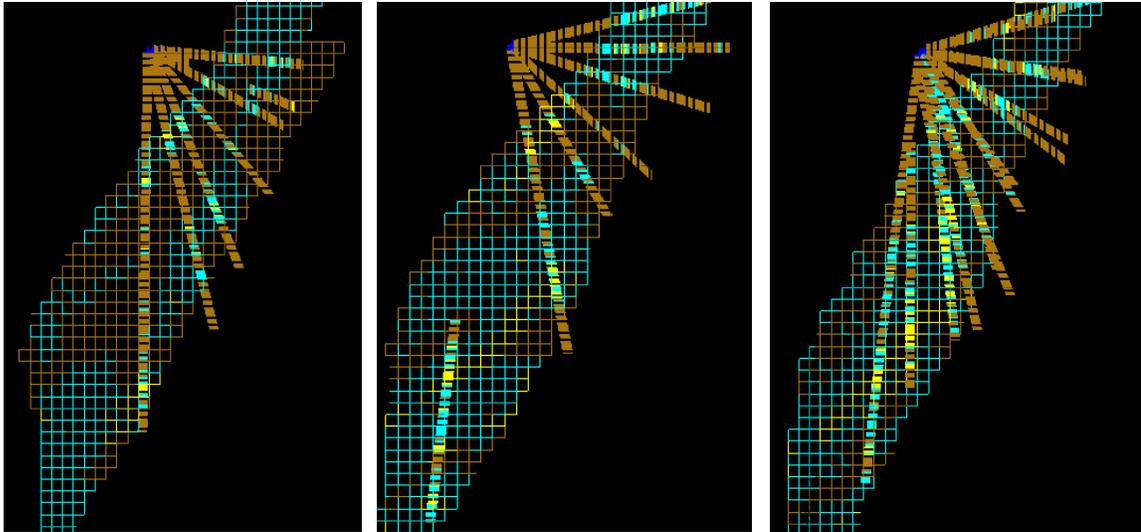


Figura 52: Sección de muestra bloques resultantes estimación por Inverso de Distancia y Sondajes

En comparación con los resultados de kriging, si bien se encuentran acumulaciones de mineral de alta ley en la parte baja (profunda) del modelo geológico dichas acumulaciones son de distintas dimensiones, siendo mayores para los resultados de Inverso de distancia. Aun así, las distribuciones de leyes se muestran muy similares, debido a que se utilizaron planes de estimación similares.

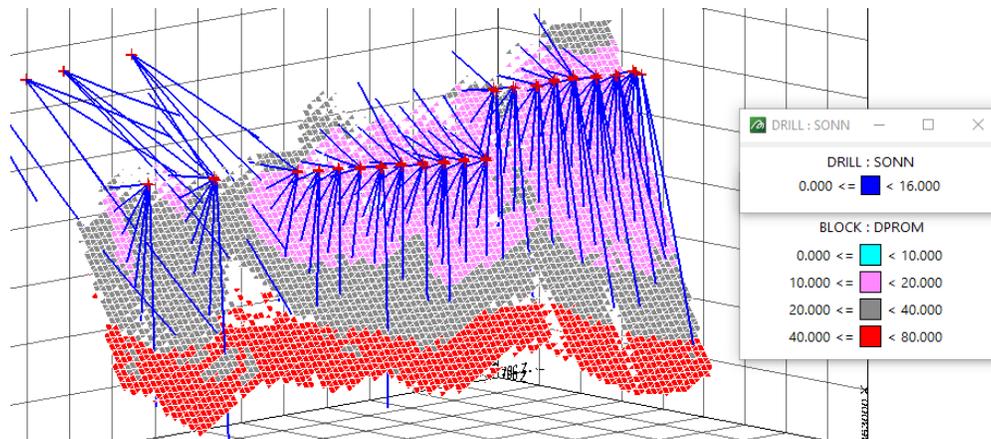


Figura 53: Sección resultado estimación. Distancia promedio

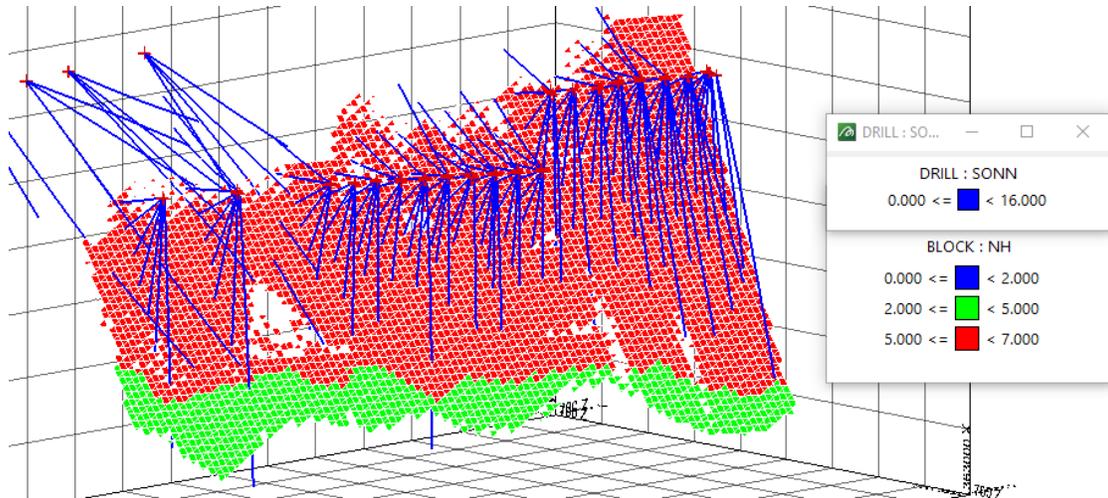


Figura 54: Sección resultados estimación. Número de sondajes

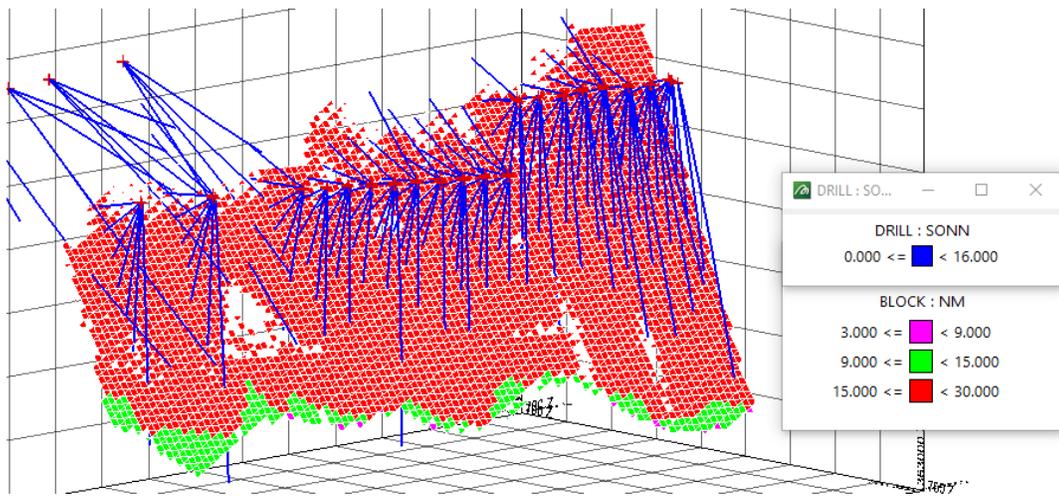


Figura 55: Sección resultados estimación. Número de muestras

El comportamiento de las variables geométricas resultantes de la estimación por Inverso de la distancia cuadrado, no difieren en relación a los valores obtenidos mediante kriging principalmente debido a que se utilizaron planes de estimación similares. Se cumple con el comportamiento esperado.

8.1.4 Categorización de recursos

Métodos para categorizar

Definición de Variables

Cada uno de los métodos estudiados utiliza distintas variables para asignar las categorías a los bloques. Dichas variables se definen a continuación:

- Cut: Ley de Cobre [%]
- Var: Varianza de Kriging
- Distnearestca: Distancia a la muestra más cercana al bloque calculada de forma cartesiana
- Nh: Número de sondajes utilizados en la estimación del bloque
- Nm: Número de muestras utilizadas en la estimación del bloque
- Slp: Slope of Regression (Indicador de eficiencia de la estimación por Kriging)
- Distpromcar: Distancia promedio a las muestras calculada de forma cartesiana
- Radio de búsqueda: Definidos en el plan de estimación corresponden a las distancias de los ejes del elipsoide de búsqueda de cada método de estimación
- Parámetros Variograma: Principalmente Meseta y Alcance del variograma

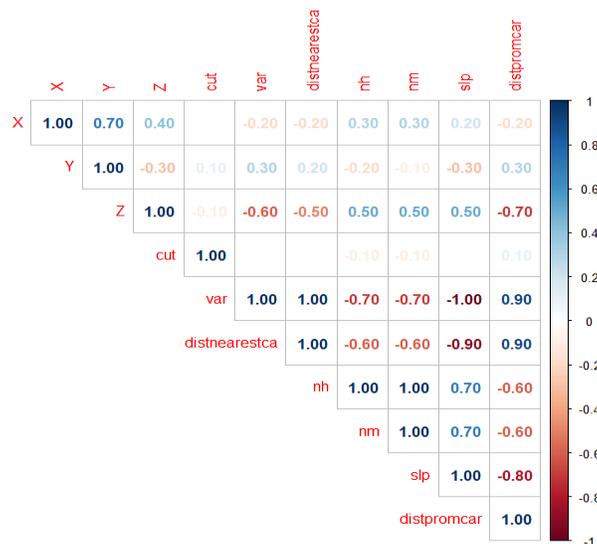


Figura 56: Correlación variables resultantes estimación por Kriging Ordinario

De los modelos de bloques disponibles para categorizar, los bloques estimados por kriging ordinario arrojan una notable correlación entre por ejemplo varianza y distancia a muestra más cercana lo que nos indica que mientras mayor sea dicha distancia, mayor será la varianza lo que es un análisis lógico ya que la varianza disminuye en sectores más densamente muestreados. Al igual

que variables de rendimiento de kriging como por ejemplo *slope of regression*, está correlacionado negativamente con la distancia media entre el bloque y las muestras utilizadas para su cálculo, esto debido a que, si un bloque está muy alejado de las muestras, se vuelve ineficiente menos confiable su estimación.

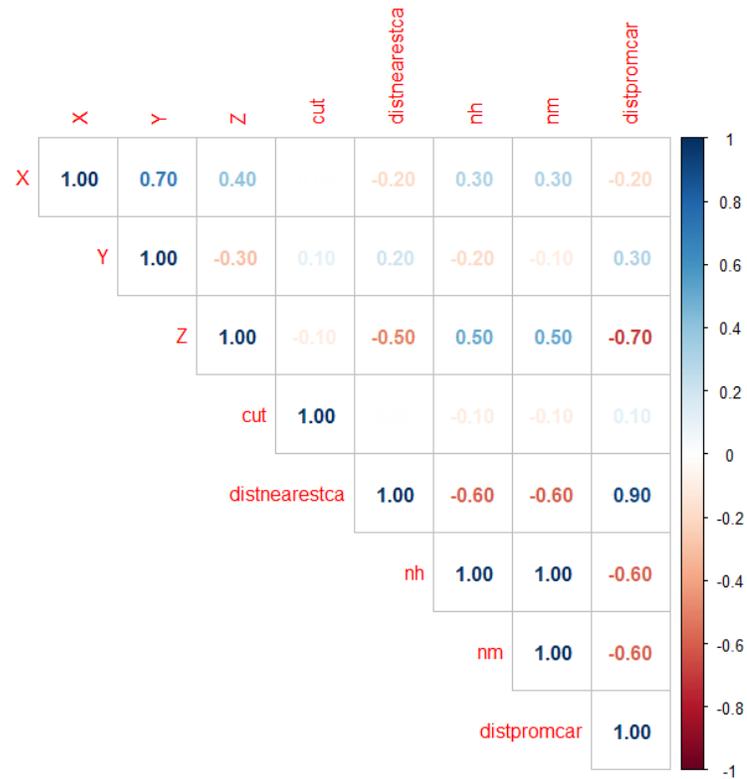


Figura 57: Correlación variables estimación por Inverso de distancia

Analizando la correlación entre variables de inverso de distancia se presenta un escenario distinto al del Kriging ordinario, debido a que según lo observado al analizar las variables geométricas no se tiene mayor correlación entre dichas variables.

Descripción de Métodos de Categorización

Densidad de Sondajes

Método del tipo geométrico y de cantidad. Su forma para asignar categorías es bastante simple, basada principalmente en una cantidad mínima de sondajes en un radio asignado.

Para cada uno de los bloques del modelo resultante de la estimación, se buscan los 3 sondajes más cercanos y es mediante la comparación de la distancia del bloque al sondaje más alejado de los 3 que se definen las categorías.

Así, se define la variable D como la distancia mínima cartesiana entre el bloque a categorizar y el tercer sondaje más cercano. Las categorías se definen de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} D \leq 25 \text{ m} & \quad \text{Recursos Medidos} \\ 25 \text{ m} \leq D \leq 45 \text{ m} & \quad \text{Recursos Indicados} \\ D \geq 45 \text{ m} & \quad \text{Recursos Inferidos} \end{aligned}$$

Lo anterior se puede resumir como: Se considerará como recurso medido a todo aquel bloque que tiene al menos 3 sondajes en un radio de 25 m. Las distancias de interfase no son definidas al azar, se trata de los parámetros usualmente usados en reportes técnicos estudiados provenientes de la base de datos pública SEDAR que contiene los informes bancables de la TSX canadiense.

Coeficiente de Variación

Método de tipo kriging. Utiliza la variable varianza de kriging y Ley de cobre para asignar categorías a los bloques.

Para cada uno de los bloques se calcula el cociente σ/cut , siendo σ la desviación estándar calculada como la raíz de la varianza de Kriging y cut el valor de Ley de cobre estimada.

Así se definen los valores de interfases como:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma}{cut} \leq 0.25 & \quad \text{Recursos Medidos} \\ 0.25 \leq \frac{\sigma}{cut} \leq 0.4 & \quad \text{Recursos Indicados} \end{aligned}$$

$$\sigma \geq 0.4 \quad \text{Recursos Inferidos}$$

Distancia media, nh y nm

Método de tipo geométrico y de cantidad (aplicable a bloques estimados por Kriging y por Inverso de la distancia). Utiliza la distancia media, número de sondajes y número de muestras para asignar categorías a los bloques.

Para cada uno de los bloques se asigna un mínimo de número tanto de sondajes como de muestras utilizadas en su estimación, así como también una distancia media máxima entre el bloque y las muestras utilizadas para su cálculo.

$$\text{Recursos Medidos} \left\{ \begin{array}{l} \text{Distancia media} \leq 28 \text{ m} \\ \text{Num Sondajes} \geq 5 \\ \text{Num muestras} \geq 16 \end{array} \right.$$

$$\text{Recursos Indicados} \left\{ \begin{array}{l} 28 \text{ m} \leq \text{Distancia media} \leq 45 \text{ m} \\ \text{Num Sondajes} \geq 3 \\ \text{Num muestras} \geq 10 \end{array} \right.$$

Recursos Inferidos {El resto de bloques que se encuentren dentro del modelo geológico}

Diehl & David

En el caso del método propuesto por Diehl y David, el cual define niveles de incertidumbre (confianza) y precisiones (tolerancias del error) para cada caso. La precisión que se mide en base a la tolerancia del error, emplea la desviación estándar relativa del kriging.

Los niveles de incertidumbre y precisión se definen según la siguiente tabla:

Tabla 11: Clasificación de recursos

	Identificado			Sin Descubrir		
	Demostrados		Inferidos	Hipotéticos (en áreas conocidas)	especulativos (en áreas en descubrimiento)	
	Medidos	Indicados				
	Probada	Probable	Probable			
Tolerancia error (%)	±10%	±20%	±40%	±60%		
Confianza (%)	>80	60 - 80%	40 - 60%	20 - 40%	10 - 20%	<10%
	Recursos económicamente significantes					

$$\text{Precisión del error} = \frac{\sigma(x_k) * 100 * \mu_i}{z(x_k)}$$

donde μ_i corresponde al valor de la distribución normal estándar inversa (de dos colas) con probabilidad $i = (1 - \frac{1-\text{confianza}}{2})$, la cual se relaciona directamente con el grado de confianza para cada clasificación. σ_k corresponde al valor de la Desviación Estándar de kriging y $Z(x_k)$ al valor estimado.

La ecuación se emplea despejando el valor de la desviación estándar relativa de kriging $\frac{\sigma(x_k)}{Z(x_k)}$ para obtener las interfases entre los recursos medido-indicado e indicado-inferido.

Como se puede apreciar en la tabla de clasificación de recursos este método antiguo, no sigue la relación general entre recursos y reservas impuesta por CRIRSCO. Si bien la clasificación es parecida, tiene aspectos y conceptos distintos al cuadro aceptado por el organismo internacional, por ende, solo se considera la parte de recursos Identificados o económicamente significantes.

Así se definen los valores de interfases como:

$$\frac{\sigma(x_k)}{Z(x_k)} (Med - Ind) = \frac{20}{\mu_{0.8}} = \frac{20}{0.84} = 0.24$$

$$\frac{\sigma(x_k)}{Z(x_k)} (Ind - Inf) = \frac{40}{\mu_{0.7}} = \frac{40}{0.53} = 0.75$$

Distancia Media

Método de tipo geométrico, que en su categorización utiliza las distancias dadas por radios de búsqueda (plan de estimación) para compararlas con las distancias promedio entre los bloques y las muestras utilizadas para sus cálculos de ley.

De esta forma, para el caso de kriging el radio de búsqueda del eje menor es 20 m, la gran mayoría de los informes revisados utilizaba el 80% del radio de búsqueda del eje menor para recursos medidos y el 90% del semi eje como límite máximo para recursos indicados.

En caso de los bloques estimados por kriging ordinario, se definen las interfases de categorización:

$$Dist\ media \leq 16\ m \quad Recursos\ Medidos$$

$$16\ m \leq Dist\ media \leq 40\ m \quad Recursos\ Indicados$$

$$Dist\ media \geq 40\ m \quad Recursos\ Inferidos$$

Comparación de varianzas por mallas de muestreo

Método combinado que utiliza variables geométricas y también de kriging para asignar categorías a los bloques.

Recursos Medidos: Todo aquel cuya varianza de kriging es menor que aquella de un bloque ubicado en el centro de 4 sondajes ubicados según una malla de perforación de 50x50 metros.

Recursos Indicados: Todo bloque cuya varianza de kriging es menor que aquella de un bloque ubicado en el centro de 4 sondajes ubicados según una malla de perforación de 90x90 metros y mayor a la de un caso de 50x50 metros.

Recursos Inferidos: Todo el resto de los bloques del modelo que se encuentren dentro de los límites del modelo geológico.

Distancia a muestra más cercana según alcance variográfico

Método combinado que combina la continuidad espacial dada por el variograma y la geometría dada por la distancia del centroide bloque categorizado a la muestra más cercana.

Para escoger la distancia crítica que definirá la categoría, se utiliza como valor de corte la distancia que cumple con estar al 40% y 60% de la meseta del variograma para definir los recursos medidos e indicados respectivamente. Este criterio consiste en un valor típico en la industria. De esta forma, del variograma de los datos y considerando que la meseta es igual a 0.231.

Tabla 12: Estimación distancia de corte para categorización

	Y (Gamma)	ALCANCE
MESETA (40%)	0.0924	9.1
MESETA (60%)	0.1386	15.1

Se definen los intervalos de categoría:

$$\text{Dist muestra más cercana} \leq 9.1 \text{ m} \quad \text{Recurso Medido}$$

$$9.1 \text{ m} \leq \text{Dist muestra más cercana} \leq 15.1 \text{ m} \quad \text{Recurso Indicado}$$

$$\text{Dist muestra más cercana} \geq 15.1 \text{ m} \quad \text{Recurso Inferido}$$

Desviación de varianza media

Definido por varianza de corte escaladas a la varianza media del método. Así, si se define σ_{med}^2 como la varianza media del método y Var como la varianza del bloque. Los intervalos de categorización quedan de la forma:

$$Var \leq 1.5 * \sigma_{med}^2 \quad \text{Recursos Medidos}$$

$$1.5 * \sigma_{med}^2 \leq Var \leq 2 * \sigma_{med}^2 \quad \text{Recursos Indicados}$$

$$Var \geq 2 * \sigma_{med}^2 \quad \text{Recursos Inferidos}$$

Rangos de Varianza

Método que solo utiliza la variable de kriging Varianza para categorizar, si $Vares$ definida como la varianza del bloque a categorizar. Los intervalos de categorización:

$$Var \leq 0.0075 \quad \text{Recursos Medidos}$$

$$0.0075 \leq Var \leq 0,0135 \quad \text{Recursos Indicados}$$

$$Var \geq 0.0135 \quad \text{Recursos Inferidos}$$

Aplicación

Como se puede observar en la descripción de métodos para categorizar realizada, cada uno de ellos utiliza distintas variables y como se ha mencionado es aplicable a distintos resultados de métodos de estimación.

Se plasma mediante la Tabla 9 cada una de las variables utilizadas por los métodos para asignar categorías a los bloques:

Tabla 13: Variables por método de categorización

CLASIFICACIÓN DE MÉTODO	GEOMÉTRICO/DE CANTIDAD	GEOMÉTRICO	GEOMÉTRICO/CONTINUIDAD ESPACIAL	GEOMÉTRICO/ DE CANTIDAD	KRIGING	KRIGING	KRIGING	KRIGING	KRIGING
MÉTODO CATEGORIZACIÓN APLICADO	DENSIDAD DE SONDAJES	DISTANCIA MEDIA	DISTANCIA A MUESTRA MÁS CERCANA	DISTANCIA MEDIA + NH + NM	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	DIEHL & DAVID	RANGOS DE VARIANZA	COMPARACIÓN DE VARIANZAS POR MALLA	DESVIACIÓN DE VARIANZA MEDIA
VARIABLES									
Cut					X	X			
Var					X	X	X	X	X
Distnearestca	X		X						
Nh	X			X					
Nm				X					
Distpromcar		X		X					
Radio Búsqueda		X							
Parámetros Variograma			X						

Debido a las diferencias en las variables resultantes de cada uno de los métodos de estimación, en caso de los bloques estimados por Inverso de la distancia están restringidos a ser categorizados por métodos estrictamente geométricos o de cantidad. El caso del Kriging es común en la industria encontrarse con diversos casos, categorizados por métodos geométricos, de cantidad, por rangos de varianza (varianzas/desviación estándar escaladas) y a su vez por métodos mixtos.

8.1.5 Análisis de resultados

A continuación, se presentan los resultados de categorización entregados mediante tablas de estadísticas básicas-histogramas y gráficos tonelaje vs ley. Además de análisis visual para cada categorización realizada.

Resultados generales

Los resultados de categorización de cada uno de los métodos se analizan en forma separada. Se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 14: Resumen resultados Categorización por método

CLASIFICACIÓN DE MÉTODO		GEOMÉTRICO/DE CANTIDAD		GEOMÉTRICO		GEOMÉTRICO - CONTINUIDAD ESPACIAL		GEOMÉTRICO/ DE CANTIDAD		KRIGING	KRIGING	KRIGING	KRIGING	KRIGING	
MÉTODO CATEGORIZACIÓN APLICADO		DENSIDAD DE SONDAJES		DISTANCIA MEDIA		DISTANCIA A MUESTRA MÁS CERCANA		DISTANCIA MEDIA + NH + NM		COEFICIENTE DE VARIACIÓN	DIEHL & DAVID	RANGOS DE VARIANZA	COMPARACIÓN DE VARIANZAS POR MALLA	DESVIACIÓN DE VARIANZA MEDIA	
MÉTODO ESTIMACIÓN	UNIDAD	INVERSO DISTANCIA	KRIGING ORDINARIO	INVERSO DISTANCIA	KRIGING ORDINARIO	INVERSO DISTANCIA	KRIGING ORDINARIO	INVERSO DISTANCIA	KRIGING ORDINARIO	KRIGING ORDINARIO	KRIGING ORDINARIO	KRIGING ORDINARIO	KRIGING ORDINARIO	KRIGING ORDINARIO	
MEDIDOS	TONELAJE	kton	3124.45	3122.35	4130	4126.85	7308	7303.45	3647.70	3644.55	1448.3	1290.80	7139.3	8054.55	8900.50
	LEY MEDIA	%	0.4168	0.4164	0.419	0.4175	0.447	0.446	0.4185	0.417	0.857	0.88	0.445	0.447	0.423
	% TON	%	26.1	26.1	34.5	34.5	61.1	61.0	30.5	30.5	12.1	10.8	59.7	67.3	74.4
INDICADOS	TONELAJE	kton	3447.5	3445.1	3997.0	3993.2	1734.6	1732.5	5121.9	5117.7	2249.1	6992.3	2960.0	2143.1	1396.9
	LEY MEDIA	%	0.4496	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4
	% TON	%	28.8	28.8	33.4	33.4	14.5	14.5	42.8	42.8	18.8	58.4	24.7	17.9	11.7
INFERIDOS	TONELAJE	kton	5399.8	5397.0	3844.8	3844.4	2929.2	2928.5	3202.2	3202.2	8267.0	3681.3	1887.2	1766.8	1667.1
	LEY MEDIA	%	0.4768	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.5	0.5	0.4
	% TON	%	45.1	45.1	32.1	32.1	24.5	24.5	26.7	26.8	69.1	30.8	15.7	14.8	13.9

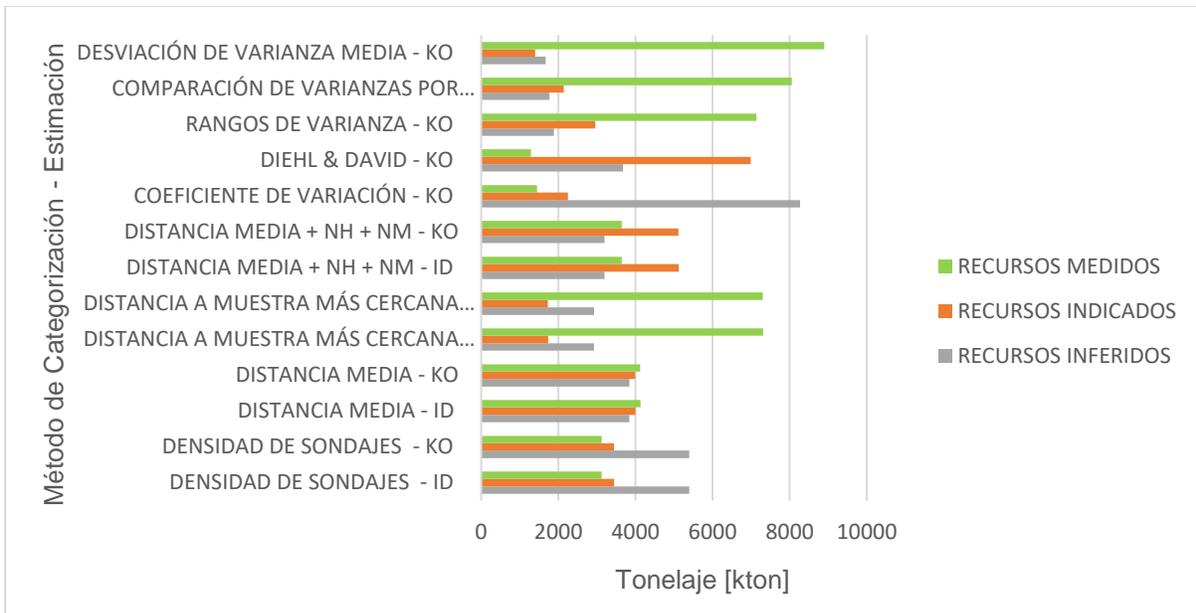


Figura 58: Resumen distribución de tonelajes según método de categorización aplicado

Se muestran un resumen de estadísticas básicas donde se puede observar que hay diferencias significativas entre los resultados de cada uno de los métodos, atribuible a las diferencias entre los parámetros utilizados para la categorización. Por el contrario, al aplicar el mismo método a resultados de distintos métodos de estimación, por ejemplo, al categorizar por densidad de sondajes los bloques resultantes tanto de Kriging Ordinario como Inverso de Distancia se muestran resultados similares para las 3 categorías en cuanto a leyes y tonelajes. Lo anterior se puede atribuir a que al realizar la estimación ambos métodos utilizan en la estimación de un bloque X muestras similares.

Como se menciona, si bien no se encuentran similitudes notorias analizando distribución de tonelajes y leyes entre métodos de categorización. Cierta similitud se encuentra entre los métodos densidad de sondajes y distancia media, debido a que realizan la categorización en forma geométrica similar.

Análisis individual de resultados

Realizar análisis de cada uno de los métodos aplicados, las variables utilizadas y ver qué sucede con las variables restantes.

Categorización por densidad de sondajes

Como fue antes descrito este método al categorizar considera la distancia mayor a los 3 sondajes más cercanos al bloque que se está categorizando. Si dicha distancia es menor a 25 m el bloque es categorizado como recurso medido, si dicha distancia es menor a 55 m y a su vez mayor a 25 m será categorizado como indicado. Por último, en caso de que aquella distancia sea mayor a 55 m será considerado recurso inferido.

De la información entregada en la tabla anterior, no tiene implicancia la utilización de un método u otro de estimación (Kriging Ordinario o Inverso de la Distancia). Los resultados de cada uno tienen variación mínima, respecto a la presentación de tanto de tonelajes como de leyes medias en el modelo de bloques.

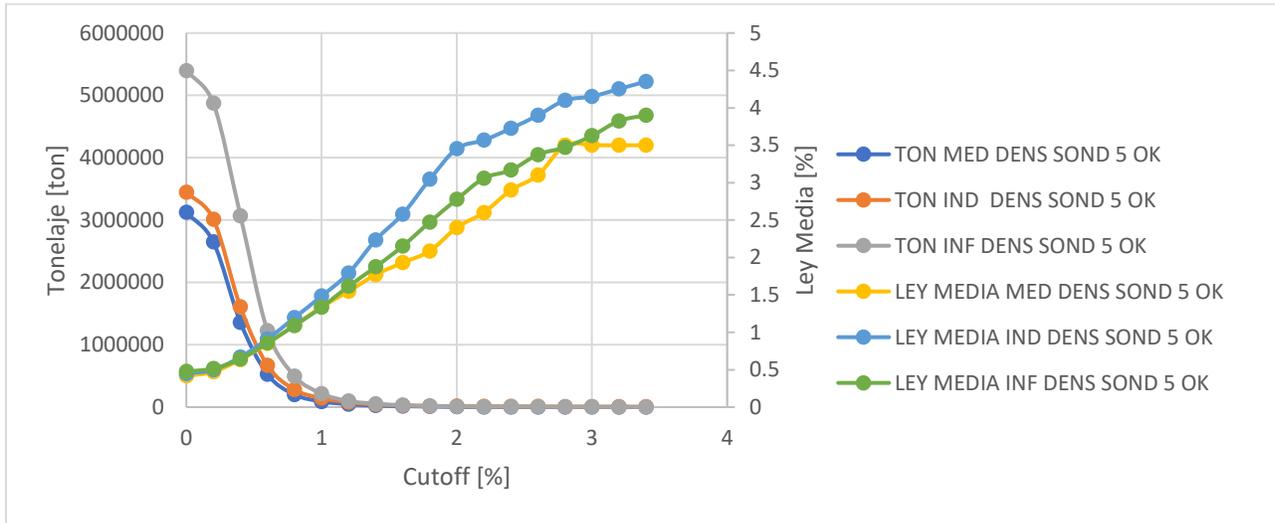


Figura 59: Gráfico Tonelaje vs Ley bloques resultantes de categorización por densidad de sondajes (Estimados mediante Kriging Ordinario)

Tabla 15: Resultados categorización por densidad de sondajes y estimación por Kriging Ordinario

CUTOFF	TON MED DENS SOND 5 OK	LEY MEDIA MED DENS SOND 5 OK	TON IND DENS SOND 5 OK	LEY MEDIA IND DENS SOND 5 OK	TON INF DENS SOND 5 OK	LEY MEDIA INF DENS SOND 5 OK
%	kton	%	kton	%	kton	%
0	3122.350	0.415	3445.050	0.447	5397.000	0.475
0.2	2647.750	0.472	3013.850	0.4973	4874.100	0.516
0.4	1358.000	0.636	1606.850	0.67	3070.200	0.642
0.6	526.750	0.851	669.200	0.908	1224.300	0.858
0.8	201.950	1.094	281.400	1.196	498.050	1.08
1	89.950	1.337	143.150	1.482	217.350	1.334
1.2	47.600	1.548	79.450	1.789	98.700	1.615
1.4	25.200	1.769	41.650	2.234	54.250	1.874
1.6	15.750	1.931	28.350	2.579	31.150	2.151
1.8	9.450	2.085	18.550	3.043	18.200	2.473
2	3.500	2.4	13.650	3.453	11.900	2.776
2.2	2.100	2.6	12.600	3.566	8.400	3.058
2.4	1.050	2.9	11.200	3.725	7.350	3.166
2.6	0.700	3.1	9.800	3.9	5.600	3.375

2.8	0.350	3.5	8.400	4.1	4.900	3.47
3	0.350	3.5	8.050	4.152	3.850	3.627
3.2	0.350	3.5	7.350	4.252	2.800	3.825
3.4	0.350	3.5	6.650	4.352	2.450	3.9

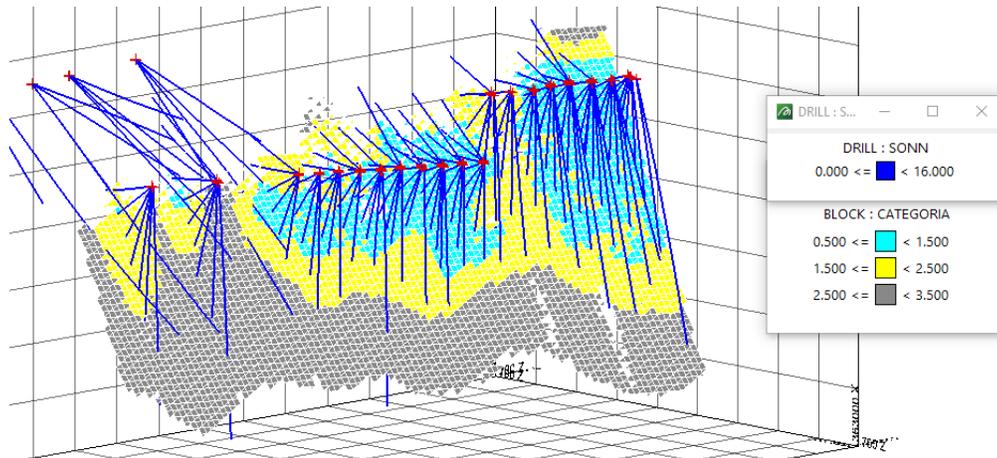


Figura 60: Vista sección bloques por categoría y ubicación de sondajes. Bloques resultantes de categorización por densidad de sondajes (Estimados mediante Kriging Ordinario).

Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

La distribución de tonelajes en este resultado de categorización como lo menciona está centrado en la densidad de sondajes, donde siguiendo la lógica un lugar mayormente muestreado traerá consigo menor incertidumbre al momento de observar los resultados provenientes del proceso de estimación. La parte de recursos medidos e indicados, se encuentran en la parte superior de la zona mineralizada que es donde hay mayor densidad de sondajes. En cuanto a las leyes se encuentra una leve superioridad en un tramo en los recursos indicados, esto se debe solo a que coincide el área geométrica con donde se encuentran recursos de alta ley pero están poco o medianamente muestreadas.

En total, aproximadamente 6500 kton pueden ir a análisis de reservas. Mientras que para seguir con análisis de recursos inferidos, sería necesario agregar muestreo para transformarlos en recursos indicados o medidos.

Relacionado a las variables no utilizadas para categorizar por este método, se observa que en los sectores más densamente muestreados (recursos medidos) variables como nh, nm, slope of regression, varianza de kriging, entre otras, se vuelven óptimas o toman valores ideales. Al disminuir la confiabilidad en la estimación (recursos inferidos) comienzan a aumentar valores como distancias a las muestras y a aumentar también la incertidumbre debido a que se trata de áreas bajamente muestreadas. En cuanto a leyes, el comportamiento en general es parejo para las 3 categorías.

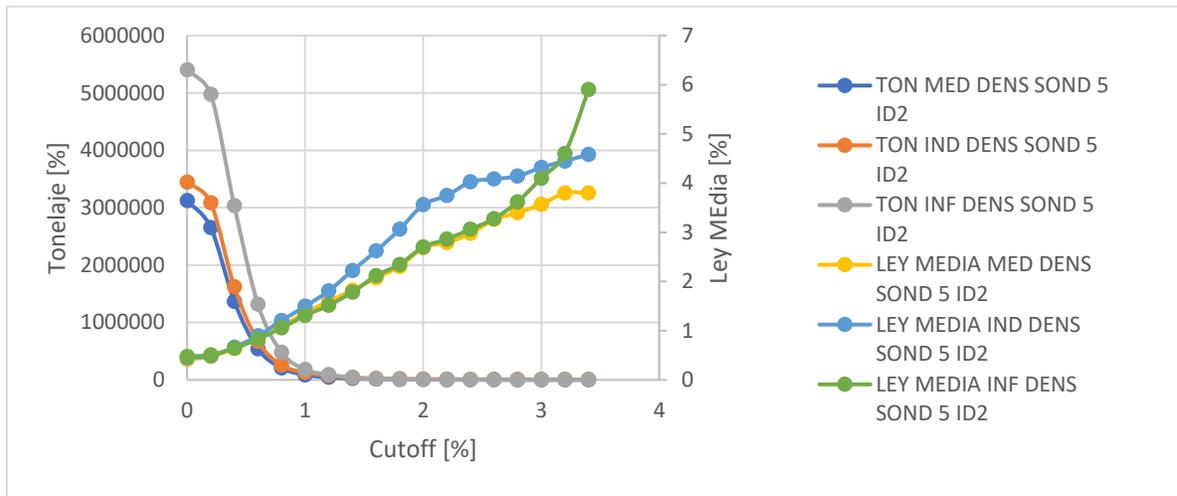


Figura 61: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por densidad de sondajes de bloques estimados por Inverso de la Distancia

Tabla 16: Resultados categorización por densidad de sondajes y estimación por Inverso de la distancia

CUTOFF [%]	TON MED DENS SOND 5 ID2 [kton]	LEY MEDIA MED DENS SOND 5 ID2 [%]	TON IND DENS SOND 5 ID2 [kton]	LEY MEDIA IND DENS SOND 5 ID2 [%]	TON INF DENS SOND 5 ID2 [kton]	LEY MEDIA INF DENS SOND 5 ID2 [%]
0	3124.450	0.417	3447.500	0.449	5399.800	0.476
0.2	2654.050	0.474	3087.000	0.490	4974.550	0.509
0.4	1363.950	0.63	1621.200	0.662	3035.200	0.642
0.6	541.100	0.849	671.300	0.891	1315.650	0.828
0.8	207.200	1.090	254.450	1.205	478.450	1.054
1	85.750	1.359	130.900	1.494	181.300	1.307
1.2	44.800	1.596	72.800	1.808	91.000	1.513
1.4	25.550	1.820	40.250	2.22	40.250	1.783
1.6	14.350	2.070	25.900	2.618	18.550	2.115
1.8	8.750	2.308	17.500	3.06	11.900	2.347
2	4.550	2.684	12.250	3.557	6.650	2.700
2.2	3.850	2.790	10.850	3.745	5.250	2.86
2.4	2.800	2.975	9.100	4.023	3.850	3.063636364
2.6	1.750	3.26	8.750	4.084	2.800	3.275
2.8	1.400	3.4	8.400	4.141	1.750	3.62
3	1.050	3.56	7.350	4.319	1.050	4.1
3.2	0.700	3.8	6.650	4.447	0.700	4.6

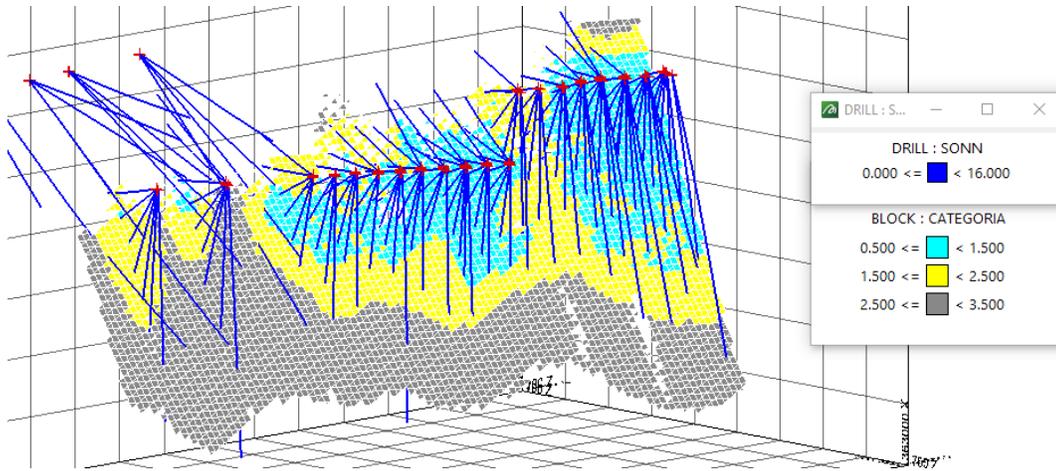


Figura 62: Vista sección bloques por categoría y ubicación de sondaje. Bloques resultantes de categorización por densidad de sondajes (Estimados mediante Inverso de la Distancia).

Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

No se observan diferencias muy notables respecto de la categorización de los bloques obtenidos por kriging ordinario.

Relacionado a las variables geométricas, a medida que disminuye la confiabilidad en la estimación variables como n_h , n_m o distancia promedio a las muestras se vuelven también menos óptimas, por ejemplo, los bloques pertenecientes a la categoría de inferidos fueron estimados por información de menos cantidad de sondajes que los medidos, también por una menor cantidad de muestras y con una distancia promedio mayor.

Distancia media, nh y nm

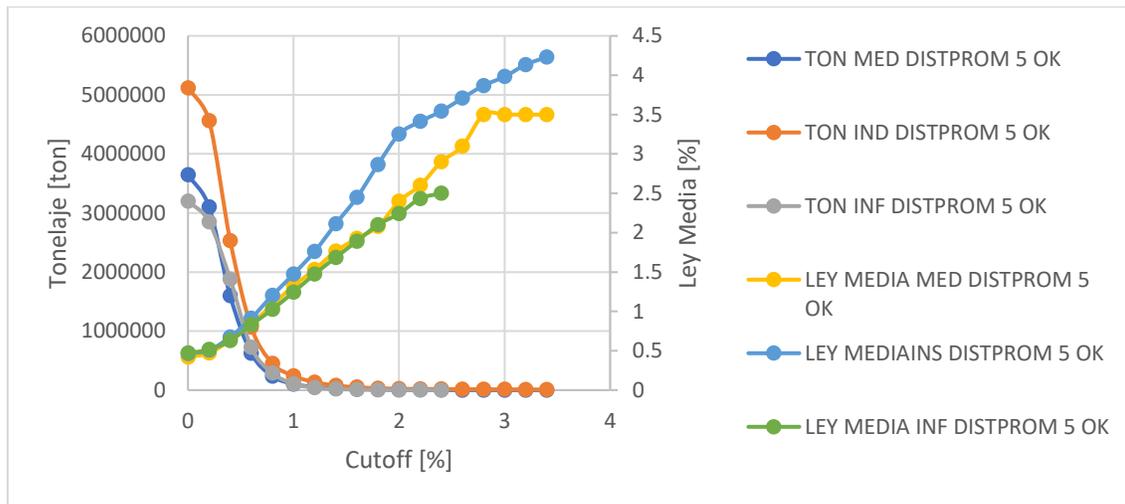


Figura 63: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por distancia media, nh y nm - Estimación por Kriging Ordinario

Tabla 17: Resultados categorización por distancia media, nh y nm y estimación por Kriging Ordinario

Cutoff [%]	TON MED DISTPROM 5 OK [kton]	LEY MEDIA MED DISTPROM 5 OK [%]	TON IND DISTPROM 5 OK [kton]	LEY MEDIAINS DISTPROM 5 OK [%]	TON INF DISTPROM 5 OK [kton]	LEY MEDIA INF DISTPROM 5 OK [%]
0	3644.550	0.417	5117.700	0.463	3202.150	0.470
0.2	3102.750	0.472	4562.250	0.507	2851.800	0.515
0.4	1596.350	0.635	2529.450	0.674	1878.100	0.62
0.6	625.100	0.845	1065.050	0.914	723.450	0.830
0.8	237.650	1.082	452.200	1.204	289.100	1.026
1	102.550	1.323	240.100	1.472	106.050	1.244
1.2	53.200	1.531	135.450	1.760	40.950	1.474
1.4	26.600	1.763	77.000	2.110	18.550	1.68
1.6	16.450	1.925	49.700	2.446	8.750	1.8
1.8	9.800	2.07	31.850	2.864	4.200	2.1
2	3.500	2.4	22.750	3.250	2.450	2.242
2.2	2.100	2.6	19.950	3.412	1.050	2.433
2.4	1.050	2.9	17.850	3.543	0.700	2.5
2.6	0.700	3.1	15.400	3.709		
2.8	0.350	3.5	13.300	3.868		
3	0.350	3.5	11.900	3.982		
3.2	0.350	3.5	10.150	4.134		
3.4	0.350	3.5	9.100	4.230		

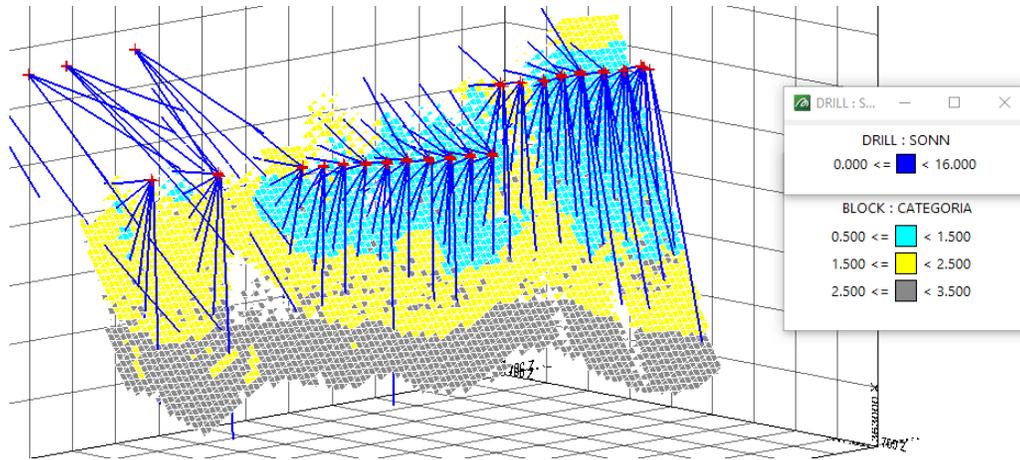


Figura 64: Vista bloques resultados Categorización por distancia media, nh y nm - Estimación por Kriging Ordinario. Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

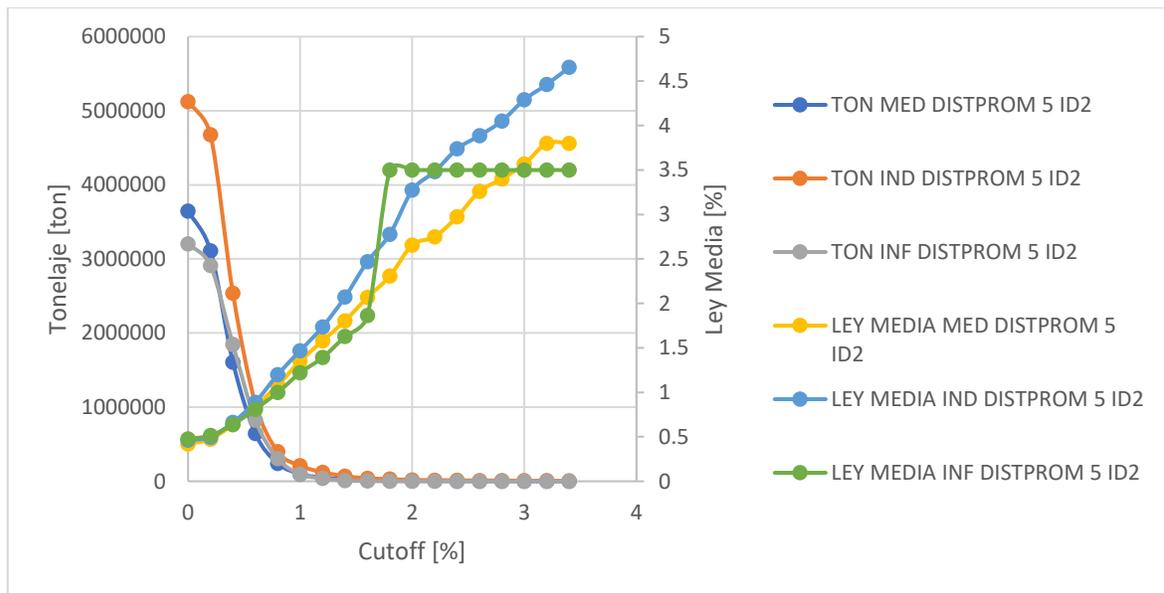


Figura 65: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por distancia media, nh y nm - Estimación por Inverso de la Distancia

Tabla 18: Resultados categorización por distancia media, nm y nh, estimación por Inverso de la distancia

Cutoff [%]	TON MED DISTPROM 5 ID2 [kton]	LEY MEDIA MED DISTPROM 5 ID2 [%]	TON IND DISTPROM 5 ID2 [kton]	LEY MEDIA IND DISTPROM 5 ID2 [%]	TON INF DISTPROM 5 ID2 [kton]	LEY MEDIA INF DISTPROM 5 ID2 [%]
0	3647.700	0.419	5121.900	0.461	3202.150	0.477
0.2	3109.050	0.474	4674.950	0.496	2911.650	0.514
0.4	1607.200	0.637	2536.800	0.66	1845.200	0.639
0.6	645.750	0.842	1052.100	0.889	826.000	0.81

0.8	242.200	1.080	398.300	1.200	305.200	1
1	96.950	1.350	211.050	1.467	95.550	1.219
1.2	50.750	1.57	121.800	1.736	39.200	1.391
1.4	28.000	1.80	68.950	2.071	10.850	1.629
1.6	15.050	2.06	40.600	2.470	3.850	1.863
1.8	9.100	2.307	29.050	2.777	0.350	3.5
2	4.900	2.65	18.550	3.273	0.350	3.5
2.2	4.200	2.75	15.750	3.482	0.350	3.5
2.4	2.800	2.975	12.950	3.737	0.350	3.5
2.6	1.750	3.26	11.550	3.887	0.350	3.5
2.8	1.400	3.4	10.150	4.051	0.350	3.5
3	1.050	3.566	8.400	4.291	0.350	3.5
3.2	0.700	3.8	7.350	4.461	0.350	3.5
3.4	0.700	3.8	6.300	4.655	0.350	3.5

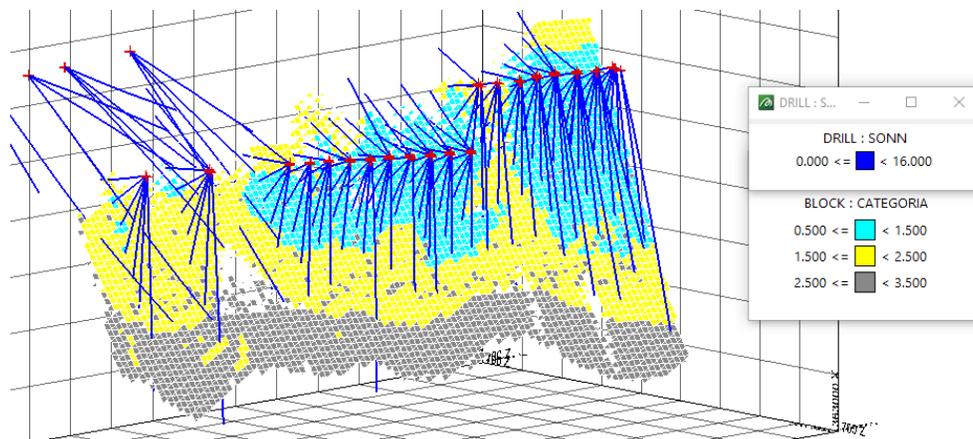


Figura 66: Vista bloques resultado de Categorización por distancia media, nh y nm - Estimación por Inverso de la Distancia. Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

Método de resultados similar al de densidad de sondajes, pero debido a los parámetros de interfase seleccionados (obtenidos de SEDAR base datos de TSX canadiense) se obtienen algunas diferencias en la distribución de tonelajes, principalmente en las cantidades. Pero de igual manera los recursos inferidos se ubican en zonas alejadas al muestreo denso presente en la parte superior de la mineralización.

Las zonas mayormente muestreadas que se suponen son de mayor confiabilidad almacenan en su totalidad a los recursos medidos, mientras que a medida nos alejamos de aquello aumenta la incertidumbre y se encuentran bloques de categoría indicado o inferido.

VARIABLES como ley de cobre no tienen efecto sobre este método geométrico. De todas formas, aumenta la eficiencia de la estimación (slope of regression cercano a 1) en zonas mas densamente muestreadas y disminuye la varianza de kriging.

Distancia Media

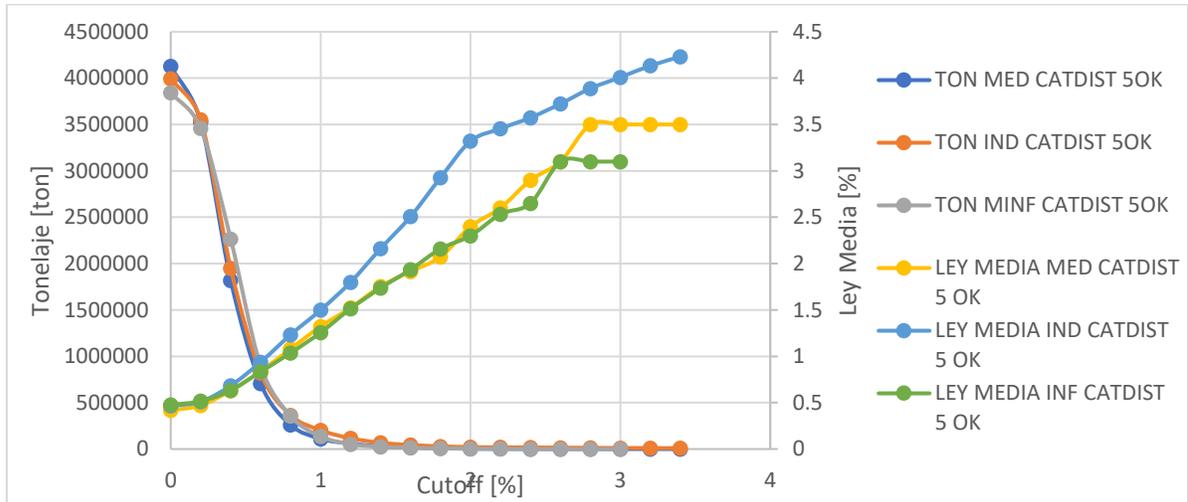


Figura 67: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por distancia media - Estimación por Kriging Ordinario

Tabla 19: Resultados categorización por distancia media y estimación por Kriging Ordinario

Cutoff [%]	TON MED CATDIST 5OK [kton]	LEY MEDIA MED CATDIST 5 OK [%]	TON IND CATDIST 5OK [kton]	LEY MEDIA IND CATDIST 5 OK [%]	TON MINF CATDIST 5OK [kton]	LEY MEDIA INF CATDIST 5 OK [%]
0	4126.85	0.41	3993.1	0.46	3844.4	0.47
0.2	3526.25	0.47	3550.4	0.51	3459.0	0.51
0.4	1819.65	0.63	1949.8	0.68	2265.5	0.63
0.6	705.95	0.84	818.6	0.93	895.6	0.8
0.8	260.40	1.08	365.0	1.23	355.9	1.03
1	111.30	1.32	203.0	1.49	136.1	1.25
1.2	58.4	1.52	115.8	1.7	51.4	1.5
1.4	28.700	1.75	67.2	2.16	25.2	1.73
1.6	17.50	1.91	44.1	2.50	13.6	1.93
1.8	10.15	2.07	29.0	2.9	7.0	2.16
2	3.50	2.4	21.0	3.32	4.5	2.3
2.2	2.10	2.6	18.9	3.45	2.1	2.53
2.4	1.05	2.9	17.1	3.57	1.4	2.65
2.6	0.70	3.1	15.0	3.72	0.3	3.1
2.8	0.35	3.5	12.9	3.88	0.3	3.1

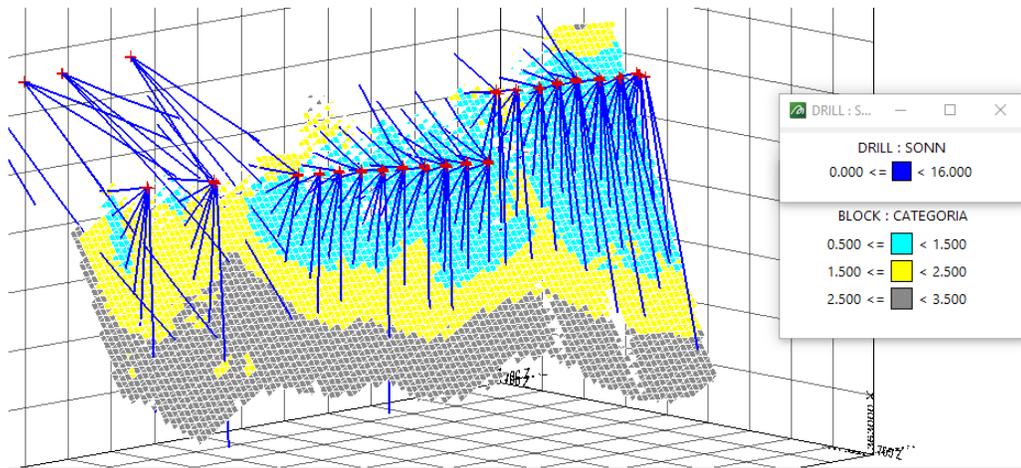


Figura 68: Vista resultados Categorización por distancia media - Estimación por Kriging Ordinario.

Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

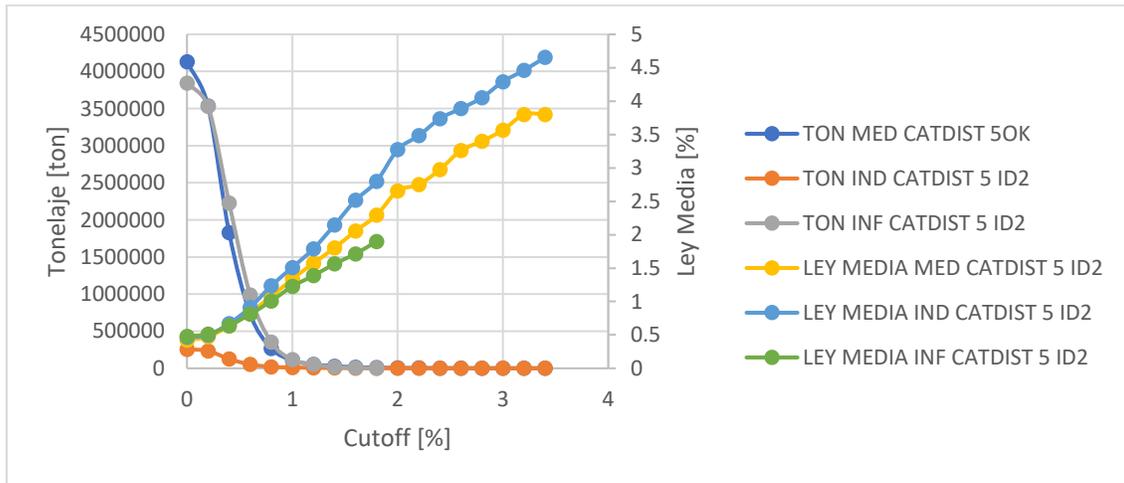


Figura 69: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por distancia media - Estimación por Inverso de la Distancia

Tabla 20: Resultados categorización por distancia media y estimación por Inverso de la distancia

cuttoff	TON MED CATDIST 50K	LEY MEDIA MED CATDIST 5 OK	TON IND CATDIST 50K	LEY MEDIA IND CATDIST 5 OK	TON MINF CATDIST 50K	LEY MEDIA INF CATDIST 5 OK
[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]
0.00	4127	0.42	3993.150	0.47	3844.40	0.48
0.20	3526.25	0.47	3550.400	0.51	3459.05	0.52
0.40	1819.65	0.63	1949.850	0.68	2265.55	0.63

0.60	705.95	0.84	818.650	0.94	895.65	0.83
0.80	260.40	1.08	365.050	1.23	355.95	1.04
1.00	111.30	1.32	203.000	1.50	136.15	1.26
1.20	58.45	1.52	115.850	1.80	51.45	1.51
1.40	28.70	1.75	67.200	2.16	25.20	1.74
1.60	17.50	1.92	44.100	2.51	13.65	1.94
1.80	10.15	2.07	29.050	2.93	7.00	2.16
2.00	3.50	2.40	21.000	3.32	4.55	2.30
2.20	2.10	2.60	18.900	3.46	2.10	2.53
2.40	1.05	2.90	17.150	3.57	1.40	2.65
2.60	0.70	3.10	15.050	3.72	0.35	3.10
2.80	0.35	3.50	12.950	3.89	0.35	3.10
3.00	0.35	3.50	11.550	4.01	0.35	3.10
3.20	0.35	3.50	10.150	4.13		
3.40	0.35	3.50	9.100	4.23		

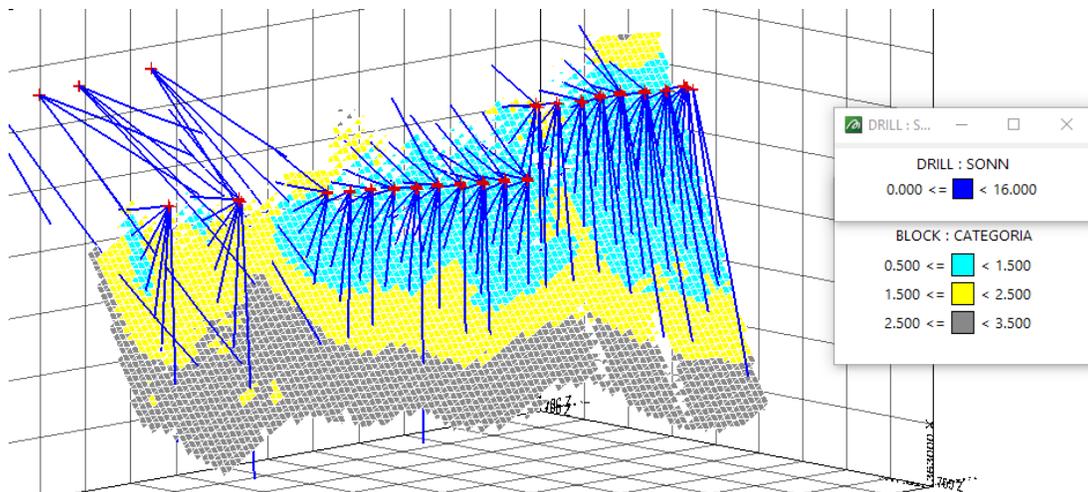


Figura 70: Resultados Categorización por distancia media - Estimación por Inverso de la Distancia.

Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

Para ambos resultados (Kriging e Inverso de distancia) la distribución de tonelajes es similar se consideran nuevamente más confiables los recursos en zonas altamente muestreadas y con mayor incertidumbre las zonas o los bloques alejados de los sondeos.

Distancia a muestra más cercana según alcance variográfico

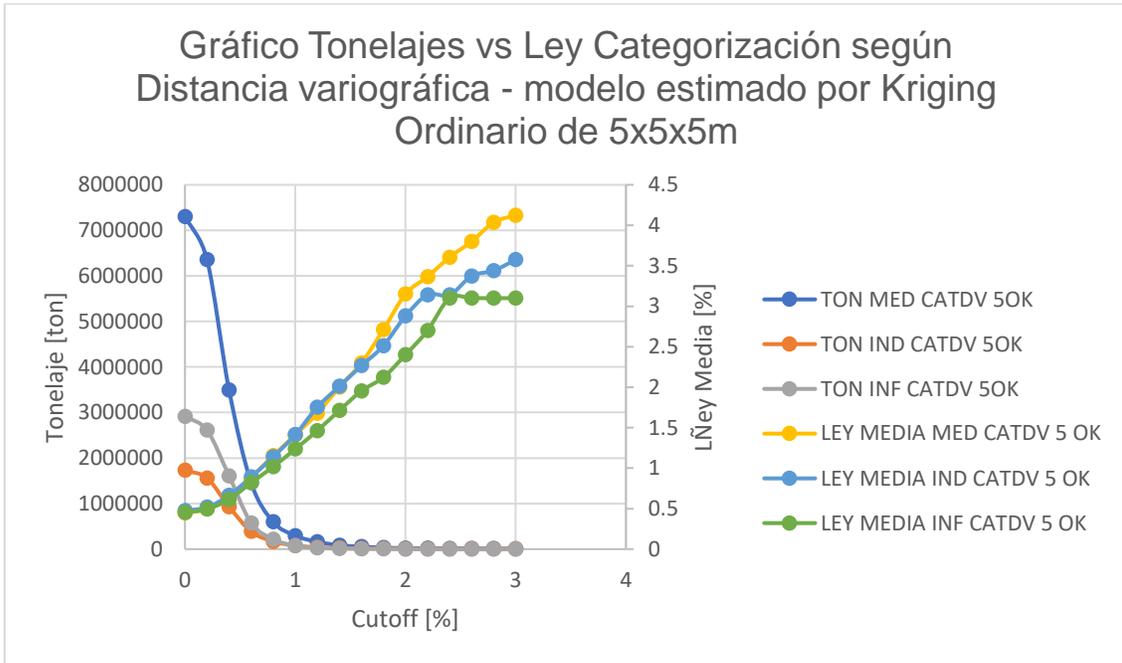


Figura 71: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización según distancia variográfica - Estimación por Kriging Ordinario

Tabla 21: Resultados categorización por distancia variográfica y estimación por Kriging Ordinario

CUTOFF	TON MED CATDV 50K	LEY MEDIA MED CATDV 5 OK	TON IND CATDV 50K	LEY MEDIA IND CATDV 5 OK	TON INF CATDV 50K	LEY MEDIA INF CATDV 5 OK
[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]
0.00	7303.45	0.45	1732.50	0.48	2914.45	0.45
0.20	6358.10	0.50	1560.30	0.52	2608.90	0.49
0.40	3491.95	0.66	930.65	0.66	1608.60	0.61
0.60	1458.45	0.89	387.10	0.89	574.70	0.82
0.80	596.75	1.15	168.70	1.14	215.95	1.02
1.00	295.75	1.41	79.10	1.41	75.60	1.24
1.20	159.60	1.68	37.80	1.75	28.35	1.46
1.40	85.75	2.00	24.15	2.01	11.20	1.71
1.60	53.90	2.30	16.10	2.27	5.25	1.95
1.80	31.85	2.71	11.20	2.51	3.15	2.12
2.00	20.65	3.15	7.00	2.88	1.40	2.40
2.20	17.15	3.37	5.25	3.14	0.70	2.70
2.40	14.00	3.61	5.25	3.14	0.35	3.10
2.60	11.90	3.80	3.85	3.37	0.35	3.10

2.80	9.80	4.04	3.50	3.44	0.35	3.10
3.00	9.10	4.12	2.80	3.58	0.35	3.10
3.20	8.05	4.26	2.45	3.64		
3.40	7.35	4.35	2.10	3.70		

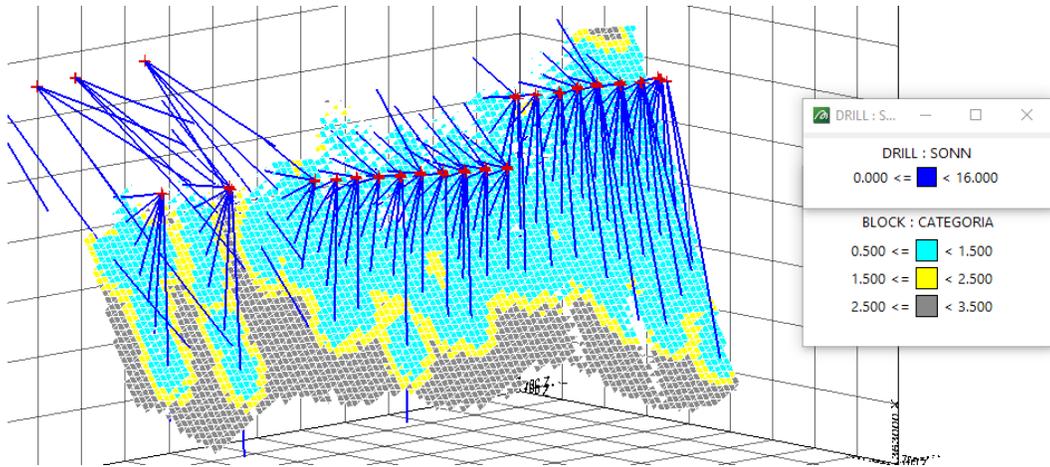


Figura 72: Resultados Categorización por Distancia Variográfica - Estimación por Kriging Ordinario.

Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

Al igual que el resto de los métodos geométricos pero en menor medida los recursos medidos son ubicados en zonas altamente muestreadas, la distribución de leyes es pareja comparando las 3 categorías de recursos. Lo anterior indica que variables de eficiencia de la estimación como varianza o slope of regression se optimizan en los recursos a los que le asigna mayor confiabilidad.

Comparación varianzas por mallas de muestreo

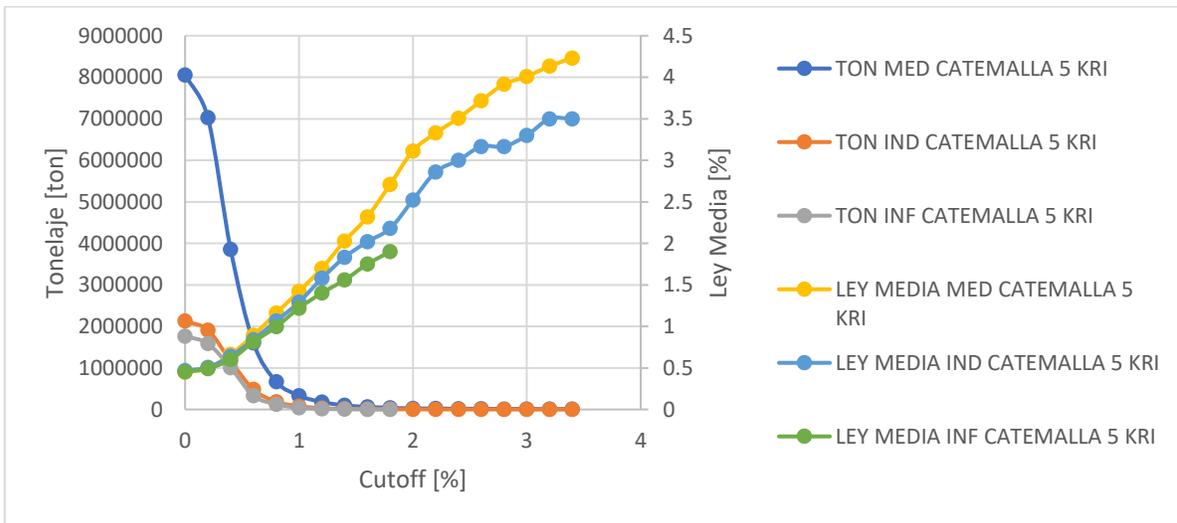


Figura 73: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización según malla de muestreo - Estimación por Kriging Ordinario

Tabla 22: Resultados categorización por mallas de muestreo y estimación por Kriging Ordinario

CUTOFF	TON MED CATEMALLA 5 KRI	LEY MEDIA MED CATEMALLA 5 KRI	TON IND CATEMALLA 5 KRI	LEY MEDIA IND CATEMALLA 5 KRI	TON INF CATEMALLA 5 KRI	LEY MEDIA INF CATEMALLA 5 KRI
[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]
0.00	8054.55	0.45	2129.05	0.47	1766.8	0.45
0.20	7025.90	0.50	1912.05	0.51	1585.5	0.49
0.40	3852.10	0.66	1166.2	0.64	1008.35	0.60
0.60	1606.15	0.89	480.55	0.84	330.75	0.81
0.80	668.15	1.16	186.2	1.07	126	1.00
1.00	333.90	1.42	78.4	1.29	37.8	1.22
1.20	179.20	1.70	31.5	1.58	15.05	1.40
1.40	98.70	2.03	16.45	1.83	5.95	1.56
1.60	63.35	2.32	10.5	2.02	1.4	1.75
1.80	38.85	2.71	7	2.18	0.35	1.90
2.00	25.90	3.11	3.15	2.52		
2.20	21.35	3.33	1.75	2.86		
2.40	18.20	3.51	1.4	3.00		
2.60	15.05	3.72	1.05	3.17		
2.80	12.60	3.92	1.05	3.17		
3.00	11.55	4.01	0.7	3.30		
3.20	10.15	4.13	0.35	3.50		
3.40	9.10	4.23	0.35	3.50		

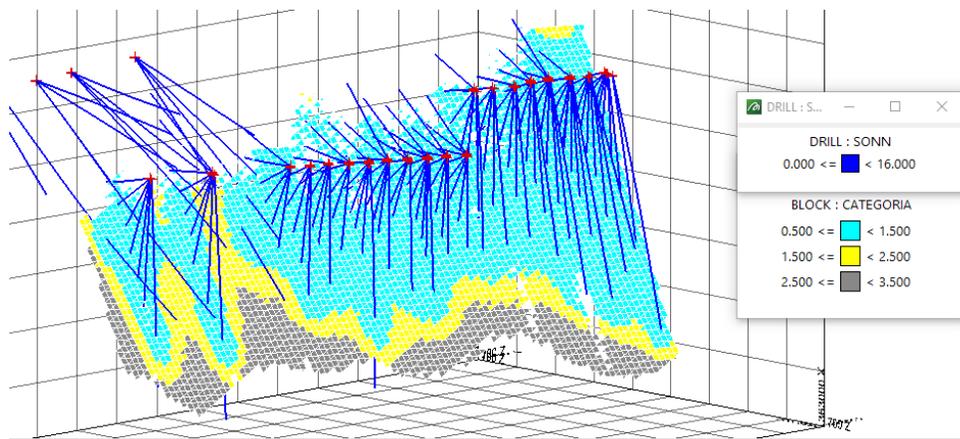


Figura 74: Vista resultados categorización por malla de muestreo - Estimación por Kriging Ordinario.

Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

Se muestra la mayor concentración de bloques asignados a recursos medidos debido a que en general la veta (modelo geológico) se encuentra bien muestreada, entonces al considerar como

criterio una malla de sondajes cuadrada de 50x50m es lógico que a la mayor parte de los bloques se les asignaría la categoría de medidos, ya que en general el muestreo en la veta es más denso que lo requerido. En general muestra valores similares a los métodos geométricos, ya que al encontrar zonas bajamente muestreadas tiene a asignar bloques a categoría inferidos.

Desviación de varianza media

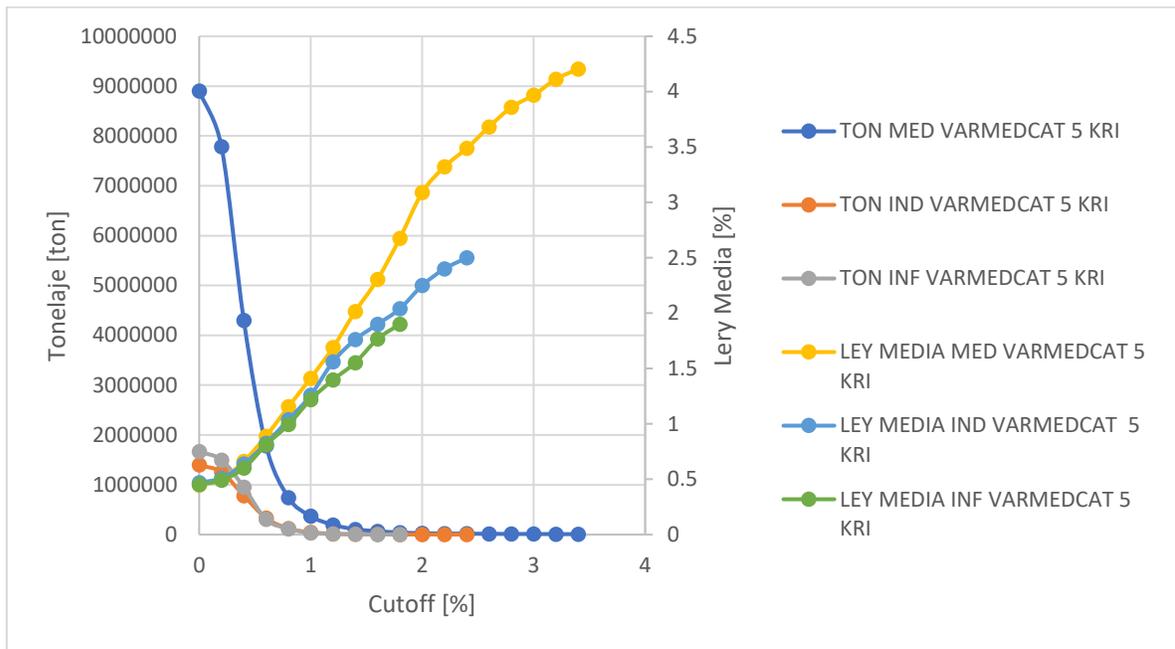


Figura 75: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por rangos de varianza media escalados - Estimación por Kriging Ordinario

Tabla 23: Resultados categorización por varianza media escalada y estimación por Kriging Ordinario

CUTOFF	TON MED VARMEDCAT 5 KRI	LEY MEDIA MED VARMEDCAT 5 KRI	TON IND VARMEDCAT 5 KRI	LEY MEDIA IND VARMEDCAT 5 KRI	TON INF VARMEDCAT 5 KRI	LEY MEDIA INF VARMEDCAT 5 KRI
[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]
0.00	8900.50	0.45	1396.85	0.47	1667.05	0.45
0.20	7783.30	0.50	1254.05	0.51	1498.35	0.49
0.40	4300.10	0.66	782.60	0.64	952.35	0.60
0.60	1782.20	0.89	331.80	0.82	306.25	0.81
0.80	743.40	1.15	121.80	1.04	116.20	0.99
1.00	369.60	1.41	46.90	1.26	33.95	1.22
1.20	196.00	1.69	16.10	1.56	13.65	1.40

1.40	106.75	2.02	9.10	1.76	5.25	1.55
1.60	68.25	2.31	5.95	1.90	1.05	1.77
1.80	42.35	2.68	3.50	2.04	0.35	1.90
2.00	27.65	3.09	1.40	2.25		
2.20	22.40	3.32	0.70	2.40		
2.40	19.25	3.49	0.35	2.50		

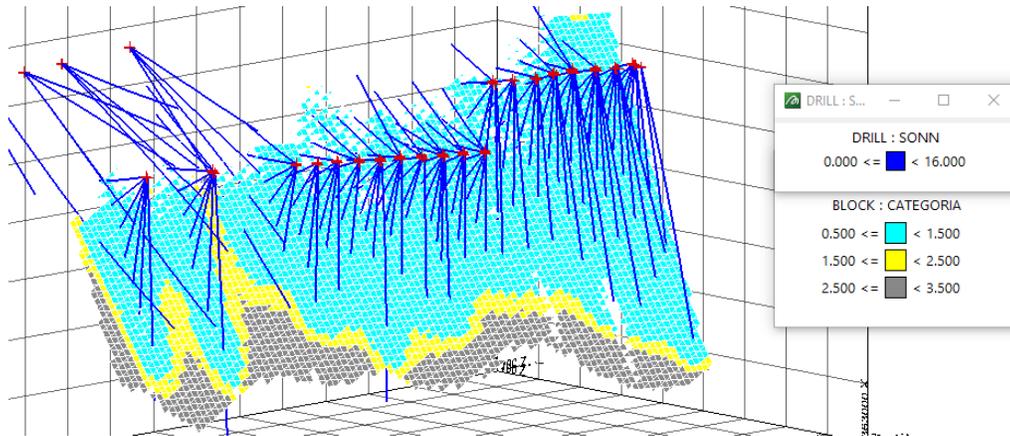


Figura 76: Resultados categorización por varianza media escalada - Estimación por Kriging Ordinario.

Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

Distribución similar a la de los métodos geométricos, muestra recursos de mayor confiabilidad en zonas más densamente muestreadas.

Rangos de varianza

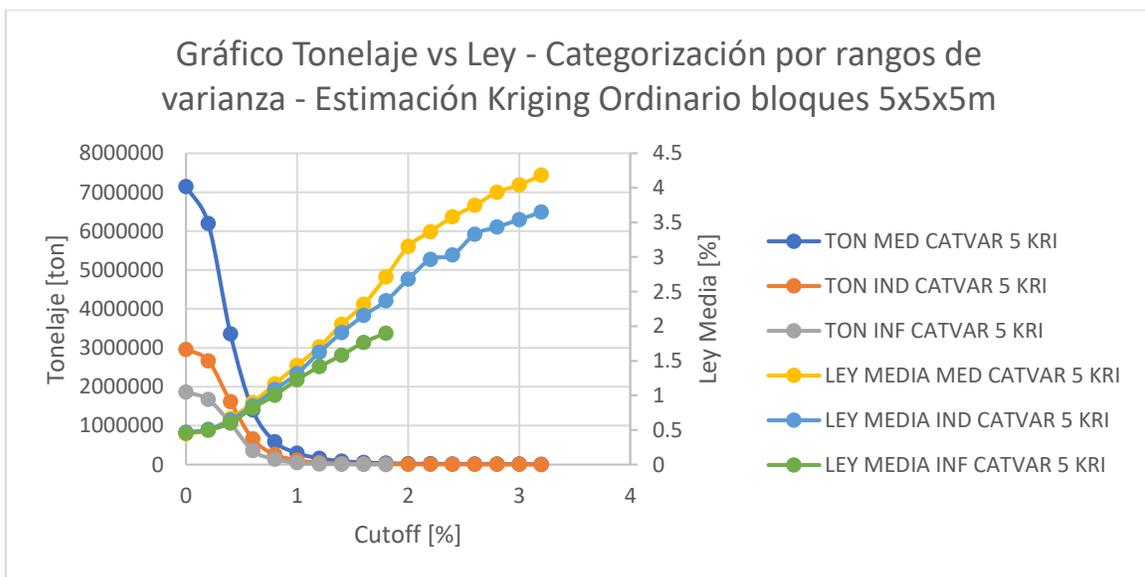


Figura 77: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por rangos de varianza - Estimación por Kriging Ordinario

Tabla 24: Resultados categorización por rangos de varianza y estimación por Kriging Ordinario

cutoff	TON MED CATVAR 5 KRI	LEY MEDIA MED CATVAR 5 KRI	TON IND CATVAR 5 KRI	LEY MEDIA IND CATVAR 5 KRI	TON INF CATVAR 5 KRI	LEY MEDIA INF CATVAR 5 KRI
[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]
0.0	7139.3	0.4	2960.0	0.5	1865.2	0.5
0.2	6198.2	0.5	2666.0	0.5	1671.6	0.5
0.4	3358.6	0.7	1613.2	0.6	1063.3	0.6
0.6	1406.3	0.9	657.3	0.9	356.7	0.8
0.8	587.0	1.2	258.7	1.1	135.8	1.0
1.0	293.3	1.4	114.5	1.3	42.7	1.2
1.2	161.7	1.7	46.9	1.6	17.2	1.4
1.4	89.3	2.0	24.9	1.9	7.0	1.6
1.6	57.8	2.3	15.4	2.2	2.1	1.8
1.8	35.0	2.7	10.5	2.4	0.7	1.9
2.0	22.8	3.2	6.3	2.7		
2.2	18.9	3.4	4.2	3.0		
2.4	15.8	3.6	3.9	3.0		
2.6	13.7	3.7	2.5	3.3		
2.8	11.6	3.9	2.1	3.4		
3.0	10.5	4.0	1.8	3.5		
3.2	9.1	4.2	1.4	3.7		

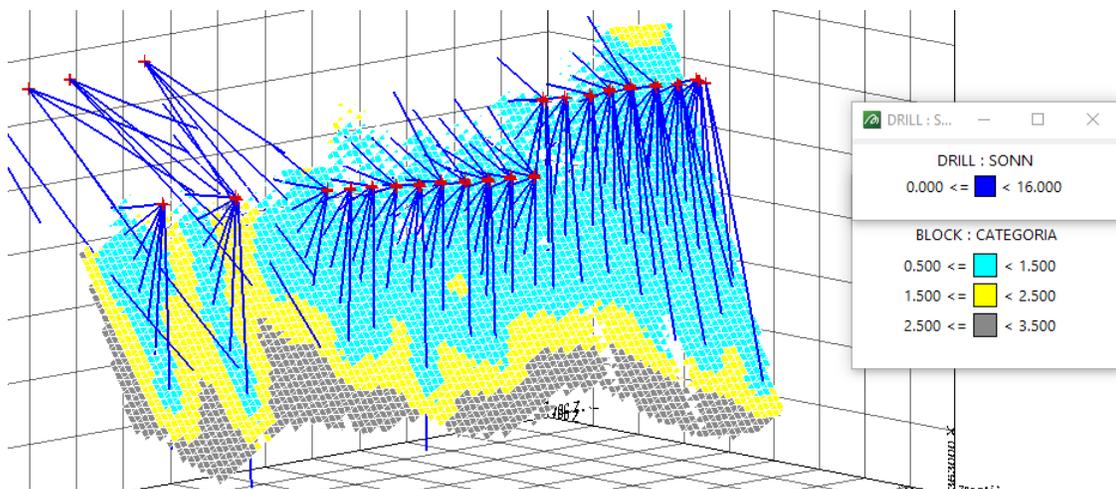


Figura 78: Resultados categorización por rangos de varianza - Estimación por Kriging Ordinario.

Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

Este método de rangos de varianza sigue la tendencia de los métodos geométricos de asignar mayor confiabilidad a los recursos ubicados en zonas mayormente muestreadas.

Coeficiente de variación

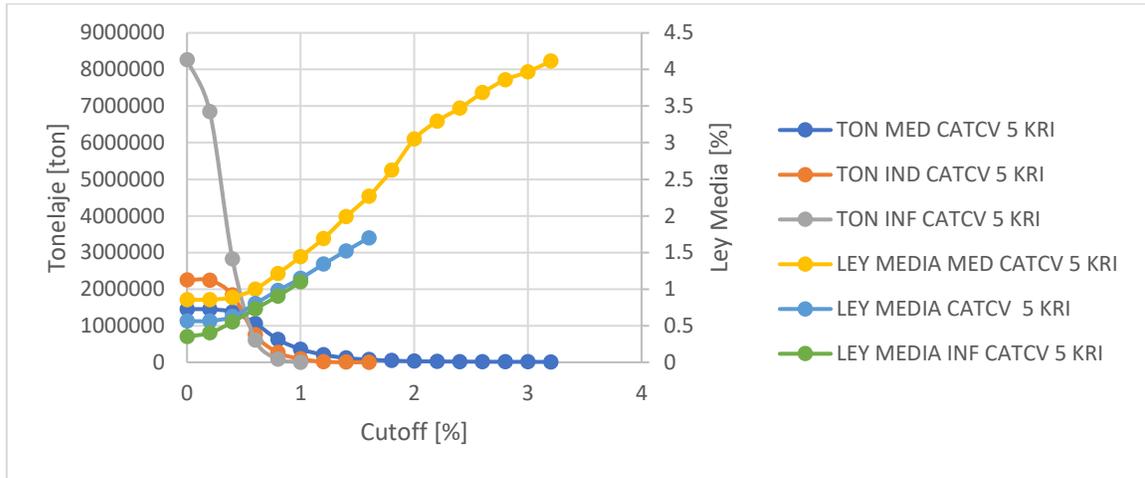


Figura 79: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por coeficiente de variación - Estimación Kriging Ordinario

Tabla 25: Resultados categorización por coeficiente de variación y estimación por Kriging Ordinario

CUTOFF	TON MED CATCV 5 KRI	LEY MEDIA MED CATCV 5 KRI	TON IND CATCV 5 KRI	LEY MEDIA CATCV 5 KRI	TON INF CATCV 5 KRI	LEY MEDIA INF CATCV 5 KRI
[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]
0.00	1448.30	0.86	2249.10	0.56	8267.00	0.35
0.20	1448.30	0.86	2238.25	0.57	6849.15	0.40
0.40	1372.70	0.89	1842.40	0.62	2819.95	0.55
0.60	1061.20	1.00	751.45	0.80	607.60	0.73
0.80	623.00	1.21	269.50	0.98	88.90	0.90
1.00	358.40	1.44	89.95	1.15	2.10	1.10
1.20	208.25	1.69	17.50	1.34		
1.40	117.95	1.99	3.15	1.52		
1.60	74.90	2.27	0.35	1.70		
1.80	46.20	2.62				
2.00	29.05	3.05				
2.20	23.10	3.29				
2.40	19.60	3.47				
2.60	16.10	3.68				
2.80	13.65	3.86				
3.00	12.25	3.97				
3.20	10.50	4.11				
3.40	9.45	4.20				

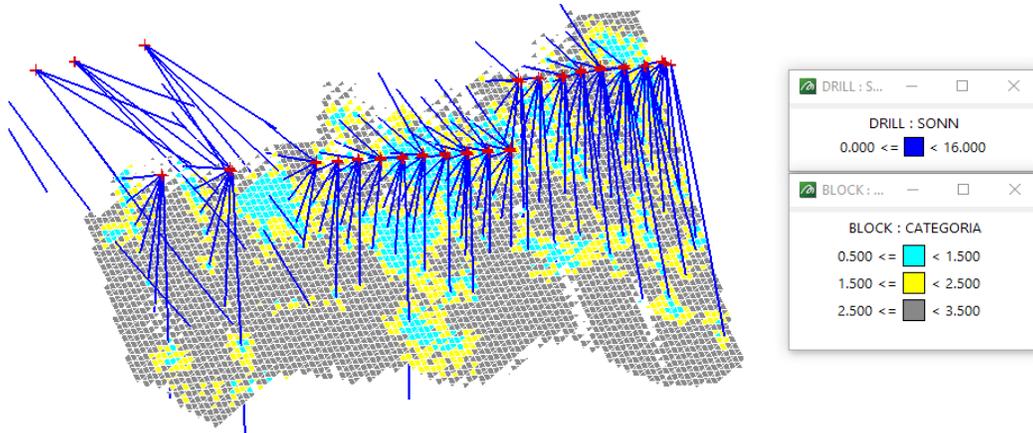


Figura 80: Vista sección de bloques Categorización por coeficiente de variación - Estimación Kriging Ordinario.

Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

Analizando los resultados de la categorización por coeficiente de variación, es posible observar que principalmente se encuentran recursos medidos en zonas de alta ley. Esto se debe a que aumentos en los valores de ley de los bloques generan disminución en el cociente de interfase y esto trae consigo el efecto producido por áreas de alta ley. Específicamente en la zona baja de la mineralización se encuentran grandes acumulaciones de mineral categorizado como medido lo que genera duda debido a que es una zona con baja densidad de sondajes y que por ende posee alta incertidumbre.

Al disminuir la confiabilidad de los recursos, se muestra también una alta disminución en las leyes. Se debe a que este método beneficia a zonas de alta ley debido a su forma de definir categorías. Lo anterior, puede ser útil debido a que en general el interés está enfocado en zonas de alta ley, pero antes de llevar a análisis de reservas dichas áreas clasificadas como recursos medidos deberían ser muestreadas para asegurar la calidad, cantidad y confiabilidad de los recursos allí presentes. Este método no tiene efecto en variables geométricas ya que como se menciona está altamente influenciado por los valores de ley.

Diehl & David

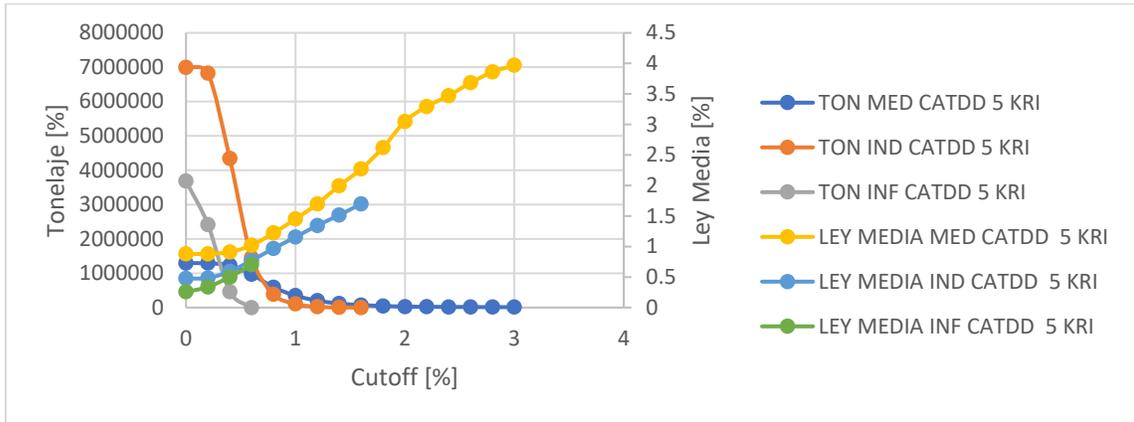


Figura 81: Gráfico Tonelaje vs Ley - Categorización por Diehl & David - Estimación por Kriging Ordinario

Tabla 26: Resultados categorización por Diehl & David y estimación por Kriging Ordinario

CUTOFF	TON MED CATDD 5 KRI	LEY MEDIA MED CATDD 5 KRI	TON IND CATDD 5 KRI	LEY MEDIA IND CATDD 5 KRI	TON INF CATDD 5 KRI	LEY MEDIA INF CATDD 5 KRI
[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]	[kton]	[%]
0.00	1290.80	0.88	6992.30	0.48	3681.30	0.26
0.20	1290.80	0.88	6825.00	0.49	2419.90	0.34
0.40	1228.50	0.91	4344.55	0.59	462.00	0.50
0.60	966.70	1.02	1453.20	0.77	0.35	0.70
0.80	591.15	1.22	390.25	0.97		
1.00	345.80	1.45	104.65	1.15		
1.20	202.65	1.70	23.10	1.35		
1.40	116.20	2.00	4.90	1.51		
1.60	74.90	2.27	0.35	1.70		
1.80	46.20	2.62				
2.00	29.05	3.05				
2.20	23.10	3.29				
2.40	19.60	3.47				
2.60	16.10	3.68				
2.80	13.65	3.86				
3.00	12.25	3.97				
3.20	10.50	4.11				
3.40	9.45	4.20				

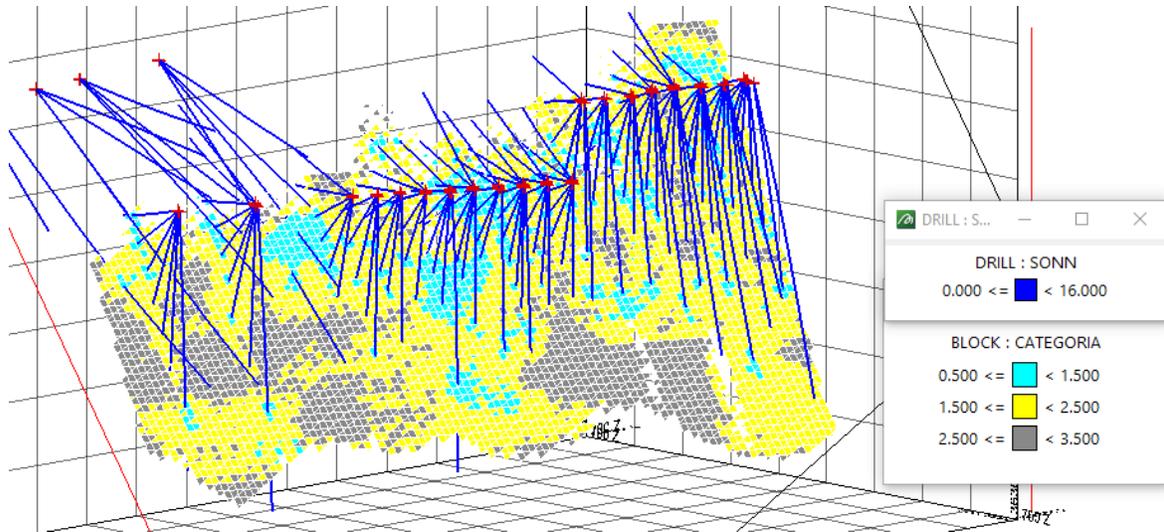


Figura 82: Vista sección resultados Categorización por Diehl & David - Estimación por Kriging Ordinario.

Categoría 1: Medidos. 2: Indicados. 3: Inferidos.

Método de funcionamiento similar al de coeficiente de variación en el sentido que privilegia zonas de alta ley. Es fácil de observar en la Tabla de resultados XX en los recursos medidos se encuentran los bloques con mayores valores de ley.

9. Conclusiones y discusiones

En general, los métodos geométricos muestran comportamientos similares en cuanto a una tendencia o distribución de tonelajes, categorizando como dicta la lógica como más confiables los recursos en zonas mayormente muestreadas. Las variaciones presentadas se atribuyen principalmente a las diferencias entre los valores de corte de categorización (de interfases) ya que estas se realizaron según catastro realizado en SEDAR base de datos de TSX canadiense.

Los métodos de categorización por variables de Kriging principalmente se diferencian en los que utilizan rangos de varianza para categorizar (varianza como valores de interfases) y los que escalan la varianza o desviación estándar con la ley. Estos métodos muestran diferencias claras ya que los métodos al escalar la varianza por la ley, les dan privilegio a zonas de alta ley, mientras que los métodos de interfases definidos con valores de varianza nos indican que tienen alta dependencia de variables geométricas debido a que en general los valores de varianza disminuyen en áreas mayormente muestreadas y lo opuesto ocurre en áreas escasamente muestreadas.

Respecto a la utilidad de esta tesis, es útil hacer un estudio de este estilo ya que no se encuentran referencias relacionadas o estudios parecidos. Es útil al momento de que la persona o profesional competente que realice la estimación esté al tanto de la relación o lo que sucede con cada variable dentro del modelo geológico definido a categorizar.

Sería bueno quizá estandarizar un tipo de “densidad de información” o de muestreo para distintos tipos de depósitos. Ya que dicha información solo se puede saber con la experiencia lo que genera mucha dependencia a la experiencia o a los conocimientos de la persona competente, generalmente no teniendo una contra opinión o debate si no se realiza con un experto que tenga la misma o mayor experiencia.

Es vital el conocimiento tanto geológico como de leyes del depósito para hacer una buena definición de valores de corte de interfase, así como definición de planes de estimación.

El proceso completo de estimación tiene incidencia en la categorización, cada una de las partes puede generar incertidumbre desde la toma de la muestra, siguiendo por su manejo, tratamiento de datos, análisis posteriores previos a la estimación, definición de parámetros (plan estimación).

10. Bibliografía

[1] Blackwell, G. 1998. *Relative kriging errors - a basis for mineral resource classification, Exploration and Mining Geology*. 1998. Vol. 7.

[2] Canadian Securities Administration. 2001. *National Instrument 43-101 – Standards of Disclosure for Mineral Projects*. 2001.

[3] *Categorización de recursos y reservas mineras*. ORTIZ, Julian y EMERY, Xavier. 2004. 2004. págs. 198-208.

[4] *Classification of ore reserves based on geostatistical and economic parameters*. Wober, H. y Morgan, P. 1993. 1993, CIM Bulletin , Vol. 86, págs. 73-76.

[5] *Classification of ore reserves/resources based on geostatistical methods* . Diehl, P. y David, M. 1982. 1982, CIM Bulletin, Vol. 75, págs. 127-136.

[6] Emery, Xavier. 2007. *Geoestadística*. 2007.

[7] Fernández, Juan Luis. 2005. *Notas sobre modelización geoestadística (Versión 1.0)*. 2005.

[8] Ferraz. 2018. *Informe Modelo e Inventario de Recursos Geológicos 2017, División Andina. Nota Interna GRMDSGEO-021-2018*. CODELCO Chile, División Andina. 2018.

[9] <http://www.sedar.com/>. [En línea]

[10] <https://www.tsx.com/resource/en/101>. [En línea]

[11] Instituto de Ingenieros de Minas de Chile (IIMCh). 2003. *Código para la certificación de prospectos de exploración, recursos y reservas mineras*. 2003.

[12] International Council on Mining and Metals. 2019. *International Reporting Template for the public reporting of Exploration Targets, Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves*,. 2019.

[13] Joint Ore Reserve Committee of the Australasian Institute of Mining And Metallurgy. 2012. *Australasian code for reporting of mineral resources and ore reserves*. 2012.

[14] *Mineral resource classification: a comparison of new and existing techniques*. Silva, D.S. y Boisvert, J. B. 2014. 2014, The journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 114, págs. 265-273.

[15] *National and International codes for reporting mineral resources and reserves: Their relevance, future and comparison*. Camisani-Calzolari, F. A. 2004. 06 de 2004, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 104, págs. 297-305.

[16] País, G. 2021. *Definición de un nuevo criterio de categorización de recursos minerales basado en simulaciones geoestadísticas*. 2021.

[17] Pierre, Goovaerts. 1997. *Geostatistics for Natural Resource Evaluation*. 1997, Vol. 42.

[18] *Principles of geoestadistics*. Matheron, G. 1963. 1963, Vol. 58.

[19] *Resource/reserve inventories : What are the objectives?* Vallée, M. 1999. 1999, CIM Bulletin, Vol. 92, págs. 151-155.

[20] Rossi, Mario E. y Deutsch, Clayton V. 2013. *Mineral resource estimation*. s.l. : Springer Science & Business Media, 2013.

[21] Solé, M., y otros. 2014. *Modelamiento geológico integrado del sector comprendido entre las secciones XC-055 a XC- 455: sectores Río Blanco-Don Luis*. CODELCO Chile, División Andina. 2014.

[22] South African Mineral Resource Committee. *South African Code for Reporting of Mineral Resources and Mineral, Prepared under the auspices of the South African Institute of Mining*.

[23] *Statistical approach to inverse distance interpolation*. Babak, Olena y Deutsch, Clayton. 2008. 2008, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol. 23, págs. 543-553.

[24] *Variogram maps from LiDAR data as fingerprints of surface morphology on scree slopes*. Treviscani, S., Cavalli, M. y Marchi, L. 2009. 2009, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 9.

[25] Vukasovic, M. 2015. *Modelamiento geológico implícito para los recursos potenciales del proyecto Mocha*. 2015.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título:		
Categorización de recursos minerales: Análisis de variables y valores de corte		
Nombre Memorista: BYRON GABRIEL VEGAS FICA		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	MUY BUENO	 Prof. Roberto fustos T.
Calificación	6.6	
Fecha	27.03.2024	
 Prof. René Gómez P.		Ingeniero Supervisor:
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Jean Navarrete		 Prof. Asieh Hekmat
Resumen		
<p>Investigación bibliográfica y en base de datos de la Toronto stock xchange sobre los métodos de categorización más utilizados según tipo de depósito. Posterior análisis de variables incluidas en informes de categorización en conjunto a sus valores de corte. Comparación de métodos y análisis de resultados.</p>		