

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



TESIS

**“ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE Y DETERMINACIÓN DEL
ESPACIAMIENTO ÓPTIMO EN MALLAS DE SONDAJES PARA
LA CATEGORIZACIÓN DE RECURSOS UTILIZANDO
SIMULACIÓN GEOESTADÍSTICA”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO GEÓLOGO**

**ELABORADO POR
YAMTAN ROBERTO ANTONIO NAGATA TEJADA**

**ASESOR
M.Sc. ING. CÉSAR AUGUSTO MENDOZA TARAZONA**

LIMA-PERU

2022

DEDICATORIA

El presente trabajo es dedicado a mis padres José y María, cuya dedicación constante hacia sus hijos han hecho posible que alcance esta meta en mi desarrollo profesional. A mi hermano mayor Shigueru, que representa un ejemplo a seguir por sus logros académicos. A mi hermana menor Jaseno, del cual debo ser un buen ejemplo para seguir.

AGRADECIMIENTO

A cada uno de mis profesores en la universidad, quienes mostraron una dedicación constante hacia sus alumnos en beneficio de su aprendizaje.

A mi asesor el M. Sc. Ing. César Mendoza y a mi profesor especialista el M. Sc. Ing. César Santiago por sus recomendaciones y consejos durante el desarrollo de mi investigación.

ÍNDICE

DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTO	2
ÍNDICE	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
CAPITULO I	12
GENERALIDADES	12
1.1 Realidad problemática	12
1.2 Formulación del problema	12
1.3 Justificación de la investigación	13
1.4 Objetivos	14
1.5 Antecedentes referenciales	15
CAPÍTULO II	22
MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL	22
2.1 Marco teórico	22
2.1.1 Recursos minerales	22
2.1.2 Reservas minerales	24
2.1.3 Estimación de recursos y reservas	25
2.2 Marco conceptual	33
CAPÍTULO III	35
HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	35
3.1 Hipótesis	35
3.2 Operacionalización de variables	35
CAPITULO IV	37
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	37
4.1 Tipo y diseño de la investigación	37
4.2 Matriz de consistencia	44
CAPÍTULO V	45

DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	45
5.1 Recolección de la información	45
5.2 Validación de la información.....	45
5.3 Análisis exploratorio de datos	52
5.4 Control de valores altos	55
5.5 Composición de las muestras	57
5.6 Desagrupamiento de las muestras.....	59
5.7 Transformación gaussiana de los datos	62
5.8 Análisis variográfico	64
5.8.1 Modelamiento del variograma.....	69
5.9 Configuración de la simulación geoestadística	70
5.9.1 Parámetros de la grilla	70
5.9.2 Parámetros de la simulación.....	71
5.10 Visualización de las realizaciones.....	72
5.11 Validación de las realizaciones	80
5.11.1 Reproducción de la variabilidad espacial de las muestras	80
5.11.2 Reproducción de la distribución de las muestras	81
5.11.3 Procesamiento de las realizaciones.....	82
5.12 Creación de mallas de perforación y asignación de leyes	90
5.13 Simulación geoestadística utilizando las mallas de perforación.....	93
CAPÍTULO VI.....	96
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	96
6.1 Definición de la unidad de volumen de producción	96
6.2 Mapas de probabilidad al 15% de incertidumbre	97
6.3 Análisis del espaciamiento entre sondajes	100
CONCLUSIONES.....	102
RECOMENDACIONES.....	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXOS.....	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de recursos en mina Animon	14
Tabla 2: Operacionalización de variables.....	36
Tabla 3: Matriz de consistencia.....	44
Tabla 4: Comparación entre el número de muestras en la base de datos y la selección a partir del sólido.....	47
Tabla 5: Variación volumétrica en el sólido de la veta.....	50
Tabla 6: Medidas estadísticas considerando el total de los datos	52
Tabla 7: Medidas estadísticas a diferentes valores de capping de ley de Zn, señalando el valor de capping utilizado para la investigación.....	57
Tabla 8: Comparativo estadístico entre datos compositados y no compositados (pesados por el campo “length”)	58
Tabla 9: Media y varianza de los datos antes y después de aplicar el método de desagrupamiento por celdas	61
Tabla 10: Comparativo estadístico de la ley de Zn antes y después de la transformación Gaussiana	63
Tabla 11: Parámetros utilizados para el cálculo del mapa variográfico	65
Tabla 12: Parámetros utilizados para el cálculo del variograma omnidireccional	68
Tabla 13: Parámetros utilizados para el modelamiento del variograma experimental	69
Tabla 14: Parámetros de la grilla utilizada	70
Tabla 15: Parámetros de la vecindad de búsqueda para las realizaciones.....	72
Tabla 16: Producción anual planificada desde el año 2022 al 2027	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Variograma de indicadores y p-grama en uno de los principales dominios del depósito: a) Variograma de indicadores experimental y modelado; b) p-grama experimental.	18
Figura 2: Relación entre Recursos y Reservas	25
Figura 3: Variable regionalizada en un espacio unidimensional	26
Figura 4: Partes del Variograma.....	30
Figura 5: Ubicación de la mina Animón	39
Figura 6: Flujograma utilizado para la generación de los dominios geológicos	41
Figura 7: Zona proximal y distal en la veta Ramal Piso 3 Principal	43
Figura 8: Vista longitudinal mostrando el total de muestras del yacimiento y el sólido de la veta.	46
Figura 9: Vista longitudinal mostrando la selección de muestras dentro de la estructura.	47
Figura 10: Histograma de Zn para los datos dentro del sólido de la veta	49
Figura 11: Ubicación de las leyes por debajo del límite de detección	50
Figura 12: Secciones utilizadas para la revisión de los tramos asignados al sólido.	51
Figura 13: Histograma de Zn para los datos fuera del frente de mena.....	53
Figura 14: Histograma de Zn para los datos dentro del frente de mena.....	54
Figura 15: Curva de probabilidad acumulada de las leyes de Zn.....	55
Figura 16: Histograma de leyes de Zn luego de aplicar el método de capping.	56
Figura 17: Histograma de las longitudes de muestreo en los datos.	58
Figura 18: Histograma de la ley compositada de Zn.	59
Figura 19: Media de los datos desagrupados aplicando el método de celdas.....	60
Figura 20: Histograma de la ley desagrupada de Zn.....	61
Figura 21: Distribución espacial de los pesos asignados a cada muestra obtenidos a partir del desagrupamiento por el método de celdas.	62
Figura 22: Modelamiento de la anamorfosis Gaussiana para la ley de Zn.....	63
Figura 23: Histograma de la ley de Zn transformada.	64
Figura 24: Mapas variográficos de la ley de Zn indicando las posibles direcciones de anisotropía (Izquierda: Ley de Zn sin transformar. Derecha: Ley de Zn transformada).	65
Figura 25: Direcciones de anisotropía para los valores de ley de Zn transformados (Arriba: Dirección 1. Abajo: Dirección 2)	66
Figura 26: Distribución de leyes de Zn sobre la veta a diferentes valores de corte.....	67
Figura 27: Variograma omnidireccional experimental de la ley de Zn transformada	68
Figura 28: Variograma teórico ajustado al variograma experimental	70
Figura 29: Vista de la grilla conteniendo a la estructura mineral.....	71
Figura 30: Vista longitudinal de la realización N° 01	73
Figura 31: Vista longitudinal de la realización N° 05	74
Figura 32: Vista longitudinal de la realización N° 25	75
Figura 33: Vista longitudinal de la realización N° 45	76
Figura 34: Vista longitudinal de la realización N° 50.....	77
Figura 35: Vista de las muestras condicionantes para las realizaciones	78
Figura 36: Comparación entre los variogramas de las realizaciones y los datos reales en la dirección este y vertical.....	80

Figura 37: Histograma entre las realizaciones y los datos reales	81
Figura 38: Modelo E-Type de las 50 realizaciones	83
Figura 39: Modelo de desviación estándar condicional de las 50 realizaciones	85
Figura 40: Probabilidad de que la ley del bloque este por encima de 6% de Zn.....	87
Figura 41: Modelo de intervalo de confianza al 90%	89
Figura 42: Grilla de puntos equidistantes a 40 metros sobre la estructura mineral	91
Figura 43: Comparación de la distribución de leyes entre la realización 46 (izquierda) y la data real (derecha).....	93
Figura 44: Grillas de puntos con leyes asignadas	94
Figura 45: Ejemplos de realizaciones a partir de las grillas de sondajes sintéticos.....	95
Figura 46: Mapas de probabilidad al 15% de incertidumbre	99
Figura 47: Incertidumbre asociada a las mallas de perforación a diferentes volúmenes de producción	100

RESUMEN

El objetivo del trabajo de investigación es determinar el espaciamiento óptimo entre sondajes mediante el uso de simulación geoestadística y de esa forma establecer la separación necesaria para categorizar los recursos minerales bajo un nivel aceptable de incertidumbre.

El capítulo I describe las generalidades, el planteamiento de la realidad problemática y el problema que se desea resolver, el objetivo que se desea alcanzar y los antecedentes referenciales de esta investigación.

El capítulo II contiene el marco teórico, donde se presentan las consideraciones teóricas y conceptos claves para entender el desarrollo del trabajo de investigación.

El capítulo III presenta la hipótesis del trabajo de investigación, así como la descripción y operacionalización de las variables involucradas.

El capítulo IV presenta la metodología de investigación utilizada. Se describe la unidad de análisis donde se detalla el contexto geológico de la zona analizada.

El capítulo V describe el desarrollo de la investigación, desde la etapa de recolección de la información, continuando con el procesamiento de los datos, hasta la presentación de los resultados obtenidos.

El capítulo VI presenta el análisis de los resultados obtenidos.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones establecidas a partir de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación.

ABSTRACT

The objective of the research work is to determine the optimum spacing between drill holes using geostatistical simulation and thus establish the necessary separation to categorize mineral resources under an acceptable level of uncertainty.

Chapter I describes the generalities, the approach of the problematic reality and the problem to be solved, the objective to be achieved and the referential background of this research.

Chapter II contains the theoretical framework, where the theoretical considerations and key concepts to understand the development of the research work are presented.

Chapter III presents the hypothesis of the research work, as well as the description and operationalization of the variables involved.

Chapter IV presents the research methodology used. The unit of analysis is described, detailing the geological context of the analyzed area.

Chapter V describes the development of the research, from the data collection stage, continuing with the data processing, to the presentation of the results obtained.

Chapter VI presents the analysis of the results obtained.

Finally, the conclusions and recommendations established from the results obtained during the development of the research are presented.

INTRODUCCIÓN

La continuidad de las variables geológicas puede ser confirmada a partir de una adecuada distribución de sondajes en un yacimiento mineral y por ende su clasificación en recursos medidos, indicados e inferidos puede ser realizada satisfactoriamente.

Entender cuál es la separación óptima entre sondajes que permita predecir las leyes con un aceptable grado de incertidumbre y que no represente un gasto considerable para la empresa, es el objetivo de este trabajo de investigación.

La investigación se realizó en la veta Ramal Piso 3 Principal de la unidad minera Chungar en Cerro de Pasco, propiedad de la compañía minera Volcan. Se evaluaron cinco mallas de perforación con distintas separaciones entre 10 y 80 metros y se calculó la incertidumbre asociada a cada una de ellas a partir de cincuenta realizaciones obtenidas mediante el método de simulación geoestadística por bandas rotantes.

El resultado indicó que para categorizar recursos medidos se debe utilizar una malla de perforación con una separación de entre 20 y 25 metros considerando un volumen de producción mensual y para categorizar los recursos indicados se debe utilizar una malla con una separación de entre 40 y 45 metros considerando un volumen de producción anual.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 Realidad problemática

Debido a que las leyes geológicas son variables en todo el yacimiento, es necesario contar con una adecuada densidad de muestras que nos permita “capturar”, lo mejor posible, esa variabilidad presente en las leyes y de esa forma poder predecirlas con aceptable grado de certeza utilizando técnicas geoestadísticas.

El inconveniente surge en la necesidad de establecer una adecuada malla de perforación diamantina que disminuya la incertidumbre en la ley de Zn y cuya ejecución represente una inversión aceptable para la compañía.

1.2 Formulación del problema

¿Cuál es la separación óptima entre los sondajes que logré reducir la incertidumbre de la ley de Zn a un nivel considerado como aceptable, es decir, que la

ley de Zn se encuentre dentro de un intervalo de +/- 15% de la media de las leyes simuladas en el 90% de las simulaciones, dentro de un determinado periodo de producción (ver Tabla 1) y cuya ejecución no incurra en una elevada inversión para la empresa?

1.3 Justificación de la investigación

Pretender reducir en gran medida la incertidumbre en el modelo conllevará a ejecutar una malla de perforación muy densa que puede resultar en un presupuesto muy elevado para la empresa y un gasto innecesario de recursos.

Por otro lado, ejecutar una malla de perforación cuyos sondajes están muy separados unos de otros, sin tener un cálculo de la incertidumbre asociada dificultará la predicción de la ley en el modelo.

Bajo ese enfoque, en el presente trabajo de investigación trataré de determinar la separación óptima en una malla de perforación diamantina que permita tener un nivel aceptable de incertidumbre para una unidad de producción determinada y de esa forma poder definir recursos medidos, indicados e inferidos.

La definición de cada categoría de recurso para el caso en particular de mina Animon y basado en el enfoque propuesto por el Dr. Harry Parker, es la siguiente:

Tabla 1: Clasificación de recursos en mina Animon

Estatus del Recurso	Categoría	Nivel de Incertidumbre
Reportado	Medido	+/- 15% de metal contenido 9 veces de 10 sobre una unidad de producción mensual o trimestral.
	Indicado	+/- 15% de metal contenido 9 veces de 10 en una unidad de producción anual.
	Inferido	+/- 50% de metal contenido. Información insuficiente para establecer niveles de confianza.

Fuente: Estándar de Estimación de Recursos Minerales (Área de Geología – Cía. Minera Volcan)

Finalmente, realizar simulaciones geoestadísticas y análisis de espaciamientos óptimos de sondajes en varias estructuras representativas nos permitirá entender la incertidumbre de las leyes geológicas a lo largo del depósito mineral.

Resultados consistentes pueden ser utilizados para configurar estrategias de perforación más robustas orientadas a una adecuada clasificación de recursos. Por lo que es necesario establecer un adecuado flujo de trabajo para llevar a cabo el proceso de simulación y DHSAs (por sus siglas en inglés *Drillhole Spacing Analysis*).

1.4 Objetivos

- Analizar la incertidumbre asociada a mallas de perforación con distintas separaciones dentro del sector del frente de mena en una estructura representativa del yacimiento.
- Determinar la separación óptima de sondajes para categorizar consistentemente los recursos minerales cumpliendo con los requisitos detallados en la tabla 1 y cuya ejecución represente una inversión viable para la empresa.

1.5 Antecedentes referenciales

Machuca Mory & Deutsch (2006) comentan en su publicación “A Program for Robust Calculation of Drillhole Spacing in Three Dimensions” el hecho de que los diferentes códigos de reporte de Recursos y Reservas resaltan que la distribución y/o configuración de los datos es un criterio importante para confirmar la continuidad geológica y/o de leyes y, por lo tanto, para clasificar los recursos en Medidos, Indicados e Inferidos en orden de confianza geológica decreciente.

Sin embargo, estos códigos internacionales no especifican los umbrales para el espaciamiento de datos u otros factores para la delimitación de las categorías de recursos minerales, dando un amplio margen al juicio y experiencia de la Persona Competente sobre la elección de los criterios de clasificación apropiados. Cabe mencionar que, aunque los códigos internacionales no requieren el uso de criterios probabilísticos, estos fomentan la cuantificación de la incertidumbre asociada a la ley.

Ellos afirman que el espaciamiento de los datos a menudo está directamente relacionado con la incertidumbre de la ley, se ha utilizado tradicionalmente como un factor determinante para la clasificación de recursos y puede ser comparado con las dimensiones de las características relevantes para definir su continuidad.

Por lo tanto, un criterio más completo para la clasificación de los recursos minerales debería ser uno que combine las características geométricas de los datos, como el espaciamiento y la densidad, con diferentes consideraciones geológicas, y esté respaldado por medidas probabilísticas.

Nowak & Leuangthong (2019) resaltan en su publicación “Optimal drill hole spacing for resource classification”, la importancia de asignarle al recurso mineral al menos

una categoría de indicado y el potencial que este recurso tiene de convertirse en reservas probables, como un paso necesario para avanzar hacia la factibilidad de un proyecto y eventualmente hacia el desarrollo y construcción de la mina.

Ellos mencionan que las definiciones de las categorías de recursos minerales son similares o guardan cierta relación en los distintos códigos de las diferentes instituciones reguladoras alrededor del mundo (CIM, JORC, SAMREC) y a menudo se basan en la evaluación subjetiva de la Persona Calificada (Qualified Person) para determinar el grado de confianza sobre el tonelaje y ley estimados.

Para este propósito, existen un número de factores que pueden ser considerados por la Persona Calificada para la clasificación de los recursos: (1) calidad de los datos, (2) entorno estructural, (3) continuidad geológica, (4) espaciamiento entre sondajes, (5) continuidad de leyes, a menudo basada en el análisis variográfico, (6) cut-off aplicado para el reporte de recursos y (7) datos utilizados para la estimación del bloque (número de sondajes, número de muestras, número de octantes y la distancia promedio al composito). De todos ellos, el factor discutido y utilizado con más frecuencia para la clasificación de recursos es el espaciamiento entre sondajes.

Responder a la interrogante de cuál es el espaciamiento necesario para poder clasificar al recurso al menos en la categoría de indicado no es una tarea sencilla, más aún si se considera el hecho de que las categorías asignadas al recurso son subjetivas y están abiertas a nuevas interpretaciones y posibles modificaciones, de ahí el propósito de la investigación que desarrollaron.

Su estudio tuvo como objetivo presentar distintos métodos para realizar una clasificación menos subjetiva del recurso utilizando herramientas geoestadísticas, para

lo cual se enfocaron en dos grupos principales de métodos: (1) aquellos que apuntan a una evaluación general del espaciamiento entre sondajes y pueden ser aplicables en las primeras etapas de un proyecto y (2) aquellos dirigidos a evaluaciones locales del espaciamiento entre sondajes teniendo en cuenta la variabilidad local de las leyes y que pueden ser más relevantes para etapas intermedias y avanzadas de un proyecto.

Dentro del primer grupo de métodos, se encuentra el modelado de un variograma de indicadores, como una de las herramientas más sencilla para evaluar el espaciado de los sondajes. Por lo general, se considera una distancia correspondiente a los $2/3$ del rango del variograma como el espaciado necesario para clasificar el recurso como indicado.

Otra herramienta, menos conocida, se basa en una técnica llamada “p-grama”. Para construir un p-grama, los compositos por encima de una ley de corte predefinida se codifican con una variable indicadora. Mediante un proceso similar al variograma de indicadores, los datos se emparejan en un conjunto de *lags* y solo se consideran aquellos pares para los que la “cola” está en mineral (indicador 1). Para cada *lag* del p-grama, se determina la proporción de pares con “cabeza” y “cola” iguales a 1, es decir, que empiezan y terminan en mineral. Cuanto mayor sea la proporción, mayor será la continuidad de las leyes altas. Los resultados, cuando se grafican contra los *lags*, representan la probabilidad promedio de que dos muestras, separadas por determinado *lag*, se encuentren por encima del cut-off. La curva trazada se puede considerar similar a un correlograma tradicional en el sentido que tiene un *nugget*, una meseta y un rango. El rango es el *lag* en el cual la curva se nivela con la meseta.

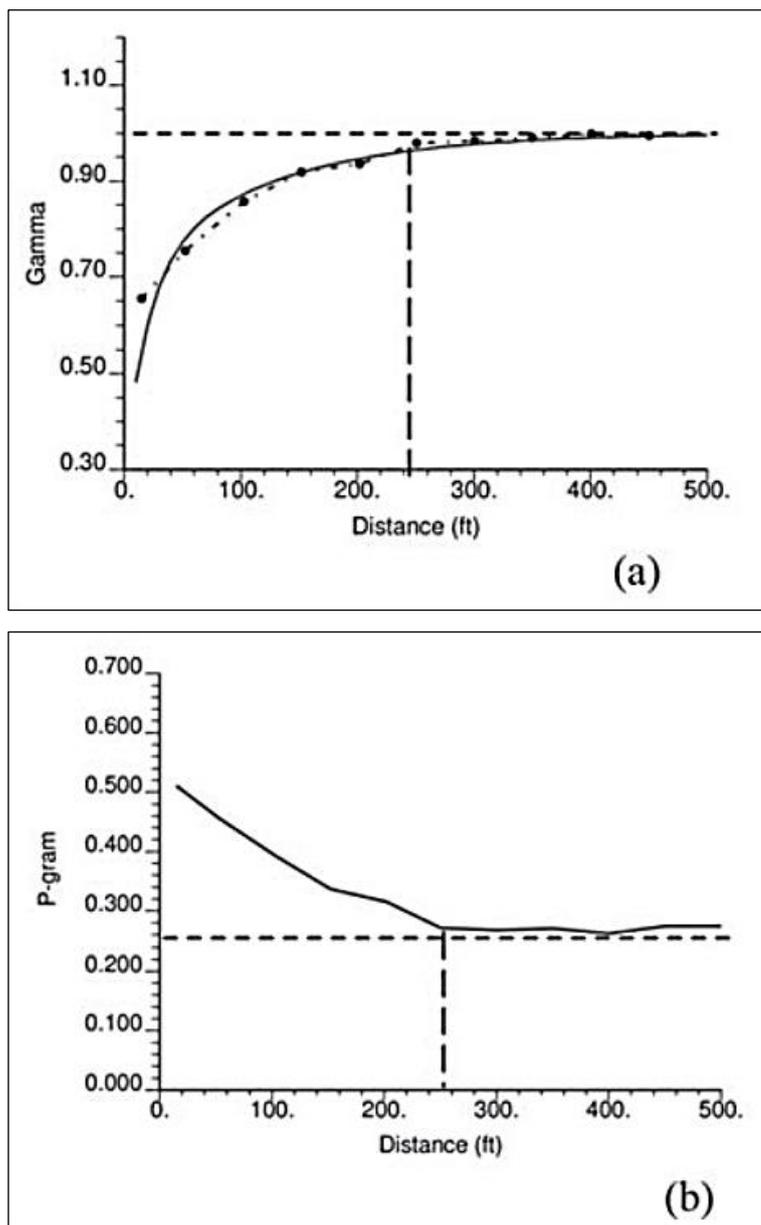


Figura 1: Variograma de indicadores y p-grama en uno de los principales dominios del depósito: a) Variograma de indicadores experimental y modelado; b) p-grama experimental.

Fuente: (Nowak & Leuangthong, 2019)

Dentro del segundo grupo de métodos, se encuentran aquellos que intentan considerar la variabilidad local de la ley dentro de paneles o periodos de producción razonablemente grandes. Los intervalos de confianza y la incertidumbre de las leyes dentro de estos grandes paneles forman la base para la asignación a una categoría indicada. En esta sección ponen a discusión dos enfoques para calcular el intervalo de

confianza local: (1) un enfoque basado en Kriging, ajustado a los datos locales y (2) un enfoque de simulación modificado que utiliza las estadísticas locales simuladas.

Ellos concluyen que la definición de categorías rara vez se basa en más que el espaciado entre sondajes y los rangos de continuidad definidos a partir del modelado del variograma. Resaltando que la aplicación de los métodos discutidos en su investigación podría generar ahorros sustanciales, con el potencial de reducir el número de sondajes; además de que las herramientas geoestadísticas presentadas son una mejora al enfoque típico aplicado por los geólogos de recursos, debido a que toman en cuenta la variabilidad local de las leyes.

Artica & Fowler (2021) abordan en su publicación “Drillhole Spacing Studies” que los estudios de espaciado de sondajes intentan cuantificar el incremento de confianza que se obtiene a partir del aumento de la perforación. Esto se puede medir en términos de la mejora en la calidad de la estimación teórica o la mejora en la predictibilidad de la ley en la producción de la mina.

Por lo general, los estudios de espaciado de sondajes se utilizan para respaldar la clasificación de los recursos minerales; sin embargo, también se pueden usar para guiar los programas de perforación *infill* para la definición de recursos o para el diseño de sondajes de control de ley. Cabe indicar que todos los estudios deben basarse en dominios bien definidos y un confiable modelo de variograma.

Los tipos de estudios se dividen en tres grupos principales: (1) Estudios de calidad de la estimación, (2) Estudios de kriging de bloque único y (3) Estudios de simulación condicional.

En los estudios de calidad de la estimación, se realiza una estimación teórica considerando diferentes grillas de perforación con dimensiones crecientes, para luego comparar los resultados. La estadística utilizada para comparar la calidad de las estimaciones suele ser la pendiente de regresión (SR), que es el coeficiente de correlación entre la ley del bloque estimada y teórica considerada como “verdadera”; o la eficiencia del kriging (KE), que es la varianza de kriging normalizada por la varianza de los bloques “verdaderos”. La estimación utiliza la variabilidad 3D modelada a partir de los variogramas, por lo tanto, los resultados están fuertemente influenciados por la calidad del modelo de variograma.

El método de kriging de bloque único considera la tasa de producción, el modelo de variograma y el coeficiente de variación de la muestra para evaluar la variabilidad de la estimación de la ley durante varios períodos de producción para varias grillas de sondajes. Se denomina método de kriging de un solo bloque porque el volumen de producción se representa como un solo bloque grande, que puede ser equivalente a un mes o un trimestre de producción.

Los estudios basados en simulación condicional adoptan muchas formas, pero todas están dirigidas a cuantificar la reducción del riesgo resultante del aumento de la perforación. Esto se puede cuantificar utilizando la tasa de producción y la regla del "error del 15 % al intervalo de confianza del 90 %", o se puede relacionar con factores de valor específicos, como el retorno neto de la fundición, el espesor de la zona de transición o la presencia de elementos nocivos, por nombrar algunos ejemplos.

Las ventajas de los estudios con simulación condicional sobre los otros dos tipos de estudios es que es más sólido desde el punto de vista estadístico, ya que se basa menos

en suposiciones teóricas y puede tener en cuenta el efecto proporcional (las leyes más altas tienen una variación más alta).

La desventaja es el tiempo considerable para configurar, ejecutar y validar una simulación condicional, que en parte se ve influenciado por el software que se está utilizando y la potencia de procesamiento de la computadora.

CAPÍTULO II

MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Marco teórico

2.1.1 Recursos minerales

Un “Recurso Mineral” es una concentración u ocurrencia de material solido de interés económico dentro o sobre la corteza terrestre en tal forma, ley y cantidad que hay expectativas razonables para una eventual extracción económica. La ubicación, cantidad, ley, continuidad y otras características geológicas de un Recurso Mineral son conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencia y conocimiento geológico específico, incluyendo muestreo. Los Recursos Minerales se subdividen en orden de creciente confianza geológica en las categorías Inferido, Indicado y Medido (Australasian Joint Ore Reserves Committee, 2012).

Las definiciones dentro del código JORC para cada categoría de recurso son las siguientes:

2.1.1.1 Recurso inferido

Un ‘Recurso Mineral Inferido’ es aquella parte de un Recurso Mineral en la que la cantidad y ley se estima sobre la base de evidencia geológica y muestreo limitados. La evidencia geológica es suficiente para suponer pero no verificar la continuidad geológica y de ley. Se basa en información de exploración, muestreo y pruebas recogidas a través de técnicas apropiadas de ubicaciones tales como afloramientos, trincheras, excavaciones, labores y sondajes.

2.1.1.2 Recurso indicado

Un ‘Recurso Mineral Indicado’ es aquella parte de un Recurso Mineral por el cual la cantidad, ley, densidades, forma y características físicas se estiman con suficiente confianza para permitir la aplicación de Factores Modificadores en suficiente detalle para sustentar el planeamiento de minado y evaluación de la viabilidad económica del depósito.

La evidencia geológica se deriva de exploración adecuadamente detallada y confiable, muestreo y pruebas recogidas a través de técnicas apropiadas de lugares tales como afloramientos, trincheras, pozos, labores y sondajes y es suficiente para asumir la continuidad geológica y de ley entre los puntos de observación donde se recogen los datos y las muestras.

2.1.1.3 Recurso medido

Un ‘Recurso Mineral Medido’ es aquella parte de un Recurso Mineral para la cual la cantidad, ley, densidades, forma y características físicas se estiman con confianza suficiente para permitir la aplicación de Factores

Modificadores para sustentar un planeamiento de minado detallado y la evaluación final de la viabilidad económica del depósito.

La evidencia geológica se deriva de exploración detallada y confiable, muestreo y pruebas recogidas a través de técnicas apropiadas de lugares tales como afloramientos, trincheras, pozos, labores y sondajes y es suficiente para confirmar la continuidad geológica y de ley entre los puntos de observación donde se recogen los datos y las muestras.

2.1.2 Reservas minerales

Una “Reserva de Mena” es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido y/o Indicado. Incluye dilución de materiales y tolerancias por pérdidas que se puedan producir cuando el material es minado o extraído y es definido por estudios apropiados a nivel de Factibilidad o Pre-Factibilidad que consideran la aplicación de Factores Modificadores y demuestran que, al momento de reportar, la extracción podría ser razonablemente justificada. Las Reservas de Mena se subdividen en orden creciente de confianza en Reservas Probables de Mena y Reservas Probadas de Mena (Australasian Joint Ore Reserves Committee, 2012).

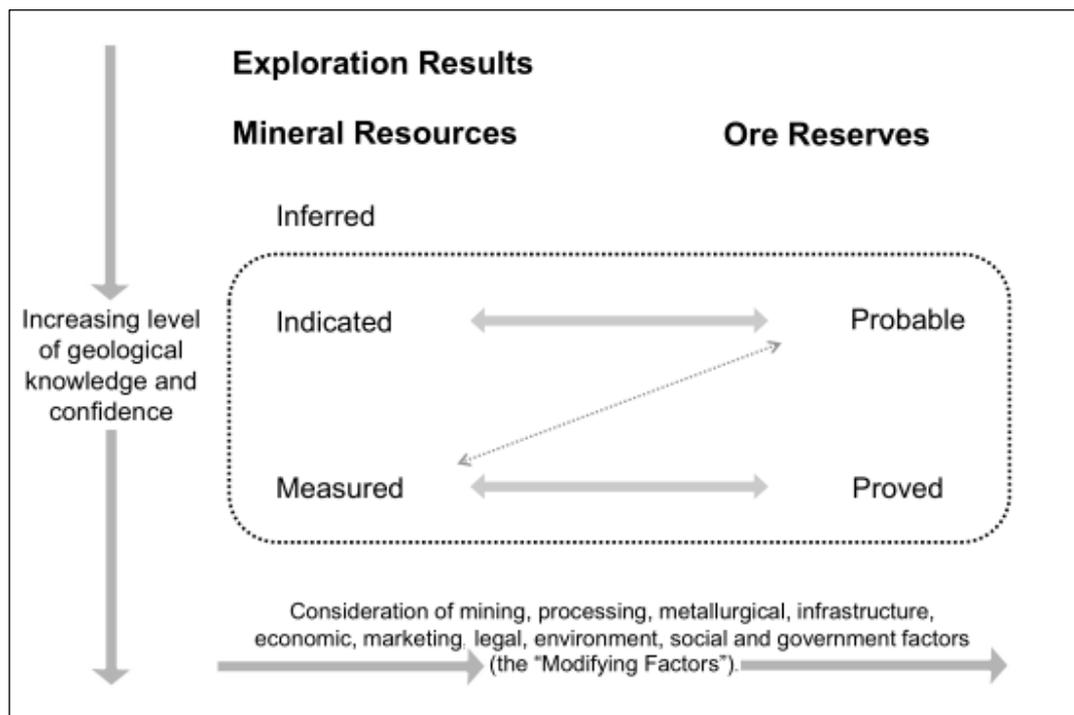


Figura 2: Relación entre Recursos y Reservas
Fuente: (Australasian Joint Ore Reserves Committee, 2012)

2.1.3 Estimación de recursos y reservas

2.1.3.1 Variable aleatoria

Una variable aleatoria es un valor numérico que corresponde a un resultado de un experimento aleatorio (Montoro Cazorla, 2008). Las variables aleatorias se pueden clasificar en dos grupos: (1) discretas, si pueden tomar un número finito de valores y (2) continuas, si dado un intervalo (a,b) ésta puede tomar todos los valores comprendidos entre a y b.

2.1.3.2 Función aleatoria

Si a cada punto \underline{x} que pertenece a un dominio Ω en el espacio le hacemos corresponder una variable aleatoria $z(\underline{x})$, entonces el conjunto de

variables aleatorias espacialmente distribuidas $\{z(\underline{x}), x \in \Omega\}$ será una función aleatoria $Z(x)$ (Diaz Viera, 2002).

2.1.3.3 Variable regionalizada

Es una función que representa la distribución en el espacio de un atributo asociado a un fenómeno natural. En general, una variable regionalizada 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 (Emery, Geoestadística, 2013).

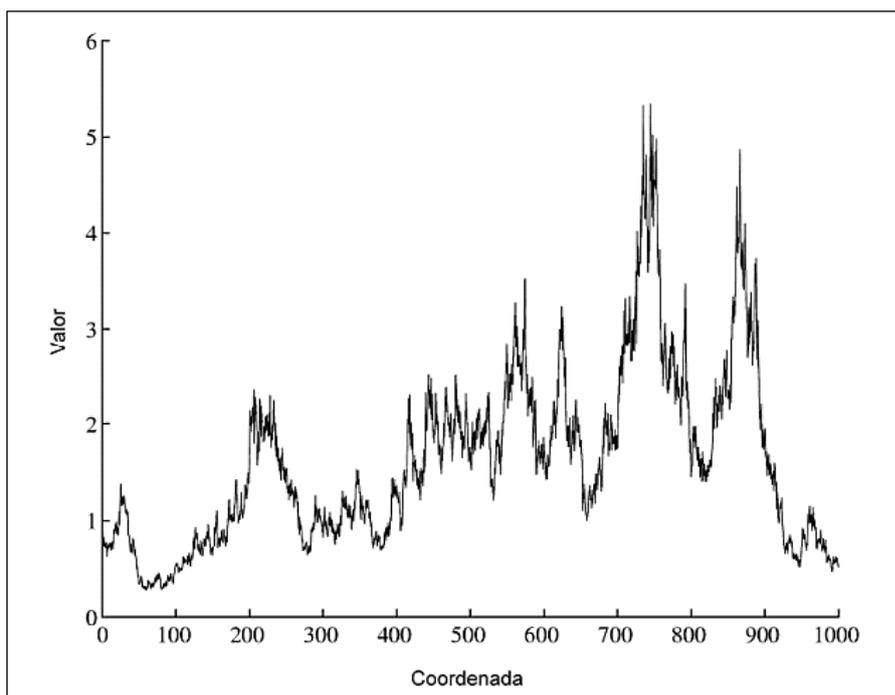


Figura 3: Variable regionalizada en un espacio unidimensional
*Fuente: (Emery, Geoestadística, 2013)

2.1.3.4 Análisis exploratorio y preparatorio de datos

Emery & Séguret (2020) – “Geoestadística de Yacimientos de Cobre Chilenos” indica que el Análisis Exploratorio de Datos corresponde a una de

las etapas iniciales para llevar a cabo un proceso geoestadístico, en esta etapa se evalúa la calidad y representatividad de la información disponible. En particular, el geoestadístico debe preguntarse a sí mismo sobre: (1) el plan de muestreo, (2) la exactitud (insesgo), la precisión y el soporte de las mediciones, (3) la eliminación o corrección de datos erróneos, (4) la identificación de las variables relevantes para el problema planteado, (5) la elección de los dominios en los cuales llevar a cabo el estudio y (6) la inferencia de las distribuciones de variables cuantitativas y categóricas y de las relaciones entre estas variables.

Se debe detectar y corregir posibles errores presentes en la base de datos ocasionados por una variedad de fuentes de error, como por ejemplo: (1) errores de medición o transcripción, (2) repetición de datos, (3) errores en la posición (collar) de las muestras, (4) inconsistencias entre diferentes fuentes de información (sondajes, canales, pozos de tronadura, etc.).

Se debe realizar un pre-procesamiento de los datos, partiendo de una regularización del soporte volumétrico (composición) y el truncamiento de valores extremos (*capping*).

Se debe evaluar la partición en dominios basados en consideraciones: (1) geológicas, enfocadas en entender el tipo de yacimiento estudiado y (2) estadísticas y espaciales, porque cada dominio definido debe exhibir una cierta homogeneidad de las variables cuantitativas de interés.

Finalmente, se debe realizar una inferencia de las distribuciones y estadísticas experimentales de cada población de datos en cada dominio, esta etapa es crítica si el estudio está orientado a la simulación o cosimulación, que requieren un modelo de

distribución de todas las variables. Para un adecuado análisis de los datos se suelen utilizar: (1) las medidas de tendencia central (media, mediana y moda), (2) medidas de dispersión (varianza, desviación estándar, coeficiente de variación y el rango intercuartil), (3) medidas de posición (percentiles, deciles y cuartiles), y (4) algunas gráficas estadísticas (histogramas, gráficos de probabilidad, diagramas de cajas).

2.1.3.5 Análisis variográfico

Alperin, Marta (2013) – “Introducción al Análisis Estadístico de Datos Geológicos” menciona que se utiliza la **semivarianza**, que es un índice para medir la discontinuidad espacial, que se denota de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{(v_i - v_j)^2}{2}$$

Donde v_i y v_j son los valores de la variable V que se encuentran a una distancia denotada por h .

Para dos valores idénticos de la variable, la semivarianza es cero y a medida que la diferencia entre los valores aumenta también la semivarianza aumenta. La semivarianza de todos los puntos que están separados por el vector h es entonces:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N (v_i - v_j)^2$$

Donde N es el número de pares de datos que se encuentran a la distancia h y v_i y v_j son los valores de V en el origen y extremo del vector h .

Para calcular estadísticos de correlación espacial significativos sobre pares de datos, los estadísticos de la variable (media y varianza) no deben cambiar dentro del área

estudiada. Esta hipótesis acerca de la variable se define como **estacionaridad**. La hipótesis de estacionaridad no se prueba, se asume que se cumple, sin embargo es un requisito crítico, de ahí que antes de empezar el análisis espacial se debe explorar y calcular los estadísticos para el conjunto de datos y definir cuantas poblaciones están presentes en el área.

El **variograma** es el gráfico de dispersión que muestra la relación entre h en las abscisas y la semivarianza de todos los puntos distantes h en las ordenadas. La semivarianza es muy sensible a los valores extremos es por ello que se deben remover o truncar cuando son identificados. Además si existen poblaciones dentro del área se deben separar en conjuntos homogéneos antes de contruir el variograma.

El variograma presenta una discontinuidad en el origen llamado **efecto pepita** (*nugget effect* en inglés) que representa la componente de varibilidad aleatoria que no está correlacionado espacialmente y que posiblemente fue originado por errores de laboratorio, de muestreo, de preparación o por fluctuaciones aleatorias en la variable.

Conforme aumenta la distancia entre los puntos el valor del variograma aumenta progresivamente hasta alcanzar la **meseta** (*sill* en inglés) que representa la variabilidad total y se relaciona con la varianza de los datos.

El **alcance** del variograma (*range* en inglés) indica el límite de la distancia en que los datos tienen correlación espacial, es decir que dos puntos separados una distancia menor que el alcance estarán correlacionados y si estan separados una distancia mayor que el alcance serán independientes.

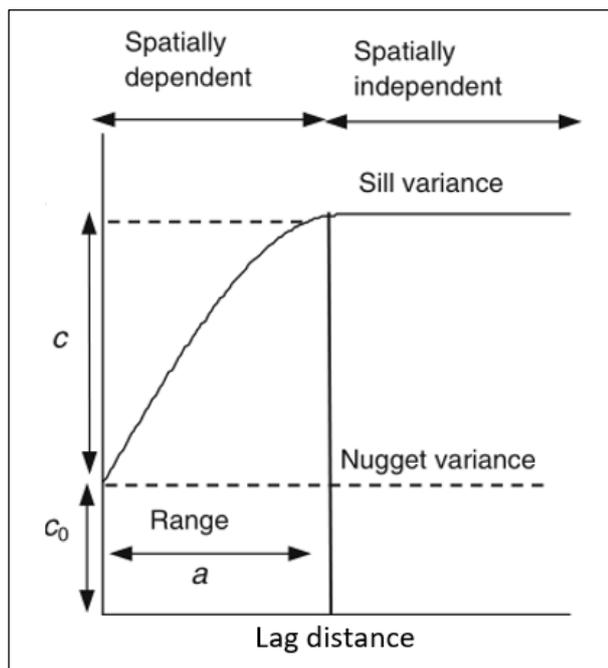


Figura 4: Partes del Variograma
*Fuente: (Oliver & Webster, 2015)

2.1.3.6 Kriging

El kriging es un método de interpolación utilizado para estimar variables regionalizadas cuyo objetivo es lograr el **mínimo error de estimación**. El kriging es una combinación lineal ponderada de los datos en la vecindad de la ubicación a estimar (Godoy, 2009).

El kriging utiliza el variograma para la obtención de los datos. Todos los tipos de kriging son variaciones de la expresión base (Goovaerts, 1997):

$$Z^*(u) - m(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha} * [Z(u_{\alpha}) - m(u_{\alpha})]$$

Donde:

- λ_α es el ponderador asignado al dato $Z(u_\alpha)$, interpretado como una realización de una variable aleatoria.
- $m(u)$ y $m(u_\alpha)$ son los valores esperados de las variables aleatorias $Z(u)$ y $Z(u_\alpha)$.

En el caso del kriging ordinario, se supone una media desconocida en la vecindad definida de estimación. Para el kriging simple, se asume la media como conocida y constante para todo el espacio (Letelier Maturana, 2012).

La estimación por kriging toma en consideración: (1) la continuidad espacial de la variable regionalizada definida por el variograma, (2) la proximidad de los datos con respecto al punto a estimar y (3) la redundancia entre ellos, es decir muestras agrupadas tendrán pesos reducidos.

La principal limitación del kriging es el efecto de suavizamiento, es decir, los valores estimados son menos dispersos (más cercanos a la media) que los valores verdaderos. Para evitar esto, se pueden utilizar técnicas de simulación geoestadística (Letelier Maturana, 2012).

2.1.3.7 Simulación geoestadística

Una simulación consiste en obtener nuevas realizaciones “artificiales” $Z_s(\underline{x})$ de una Función Aleatoria $Z(\underline{x})$, de manera tal que éstas posean las mismas propiedades estadísticas de la función aleatoria $Z(\underline{x})$. El inconveniente consiste en que no conocemos con precisión las propiedades estadísticas de la función aleatoria y cuando más lo que podemos hacer es inferirlas a través de una sola

realización o muestra de la misma, entonces lo que se hace es intentar obtener realizaciones simuladas $Z_s(\underline{x})$ que sean estadísticamente equivalentes a la muestra que se posee de la función aleatoria (Diaz Viera, 2002).

Una simulación puede ser: **(1) no condicional**, cuando busca construir realizaciones de la función aleatoria que representa la variable regionalizada, pero sin tomar en cuenta los valores de los datos, y **(2) condicional**, cuando se desea que restituya los valores medidos en los sitios con datos (Emery, Geoestadística, 2013).

En resumen, una simulación condicional: (1) reproduce la distribución de los datos (histograma similar); (2) reproduce la distribución espacial de los datos (variograma similar); (3) respeta la ubicación de las muestras (condicional); (4) cada realización es equiprobable y (5) es un modelo probabilístico.

2.1.3.8 Modelo de bloques

Es la representación de una estructura mineral formada por un conjunto de bloques de tamaño regular o de pequeñas dimensiones. Cada bloque tendrá un valor asociado a cada una de sus características, como por ejemplo: ley de mineral, densidad, potencia de estructura, litología, etc. A partir del modelo de bloques se determinará la cantidad y calidad del recurso dentro de la estructura mineral.

2.1.3.9 Software para modelamiento y estimación de recursos

Leapfrog Geo, es un software de modelamiento implícito 3D, cuya ventaja es que se pueden generar modelos geológicos con rapidez y precisión a partir de un gran conjunto de datos (geoquímica, perforaciones, mapeos, geofísica,

estructurales, etc.), además de que permite la actualización y modificación de los sólidos basado en la interpretación del geólogo modelador.

Isatis Neo, es un software geoestadístico propiedad de la empresa Geovariances, que permite un análisis y visualización exhaustiva de los datos, produce mapas y modelos de alta calidad y permite realizar análisis exhaustivos de incertidumbre y riesgo que optimizan el proceso de toma de decisiones.

2.2 Marco conceptual

- **Capping:** Técnica para el manejo de valores extremos (*outliers*) que consiste en determinar un valor umbral que definirá si un valor es considerado o no como un *outlier*. Todos los valores considerados como *outlier* serán reemplazados por el valor umbral. Se debe evaluar el comportamiento estadístico antes y después de realizar el *capping*, así como también evaluar la pérdida del contenido metálico.
- **Compositación:** Consiste en la regularización de la longitud de muestreo. Se debe realizar un análisis de compositos donde las muestras son compositadas a diferentes longitudes para determinar la longitud que presenta un comportamiento estadístico y cantidad de muestras similar a la data sin compositar.
- **Desagrupamiento:** Técnica que asigna un peso a cada uno de los datos, basado en la cercanía a los datos circundantes. Los pesos pueden ser proporcionales al área de influencia de cada muestra (método poligonal) o calculados a partir de una grilla de celdas regulares (método de celdas). Muestras muy agrupadas

presentaran pesos muy pequeños y muestras alejadas presentaran un mayor peso.

- **Variograma Experimental:** Es el cálculo de la semivarianza de todos los puntos que están separados por el vector h . Asumiendo que se cumple la hipótesis de estacionaridad, la función variograma se define de la siguiente manera:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N (v_i - v_j)^2$$

Donde N es el número de pares de datos que se encuentran a la distancia h y v_i y v_j son los valores de V en el origen y extremo del vector h .

- **Variograma Modelado:** A partir del variograma experimental, se ajusta un modelo teórico de variograma que representa una aproximación matemática del variograma experimental. En esta etapa es donde se “interpreta” la continuidad espacial de la variable en estudio.
- **Realización Geoestadística:** Es el valor simulado de la variable aleatoria $Z(x)$ en un punto x de la grilla tridimensional (o centroide del bloque). Bajo ese enfoque, en una simulación geoestadística se obtienen nuevas realizaciones “artificiales” de una variable geológica, por ejemplo, la ley de Zn. Dichas realizaciones deben cumplir con el requisito de poseer las mismas propiedades estadísticas de la variable geológica.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.1 Hipótesis

- La separación estándar entre sondajes de 50 metros utilizada en la mina Animon permite categorizar consistentemente los recursos minerales.

3.2 Operacionalización de variables

- **Variable Dependiente (VD):** Nivel de incertidumbre por categoría de recurso.
- **Variables Independientes (VI):** Separación de los sondajes, volumen de producción (mensual, trimestral, anual).

En la Tabla 2 se muestra la operacionalización de las variables consideradas en el trabajo de investigación:

Tabla 2: Operacionalización de variables

Variabes	Definición Conceptual	Indicadores
Nivel de incertidumbre por categoría de recurso	Es la probabilidad de que el metal contenido se encuentre dentro de un rango de variación para una unidad de producción definida (Tabla 1).	Probabilidad de que la ley del bloque se encuentre dentro de un rango de +/- 15% del valor esperado.
Separación de los sondajes	Es la separación entre cada uno de los sondajes dentro de una malla de perforación.	Separación en metros y número de sondajes.
Volumen de producción	Es el tonelaje total (mineral + desmonte) programado para su extracción en una determinada escala de tiempo.	Toneladas programadas para una producción mensual, trimestral y anual.

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y diseño de la investigación

4.1.1 Enfoque

Desde el punto de vista del enfoque, el tipo de investigación es cuantitativa puesto que el presente trabajo está orientado a la evaluación de la incertidumbre asociada a mallas de perforación con distintas separaciones a partir del cálculo de la probabilidad de que la ley verdadera del bloque se encuentre dentro de un intervalo de $\pm 15\%$ de la media de las leyes simuladas, es decir, a partir de los valores simulados, se puede contabilizar cuantas realizaciones están dentro del umbral del 15% y expresar un valor de probabilidad con respecto al número total de realizaciones.

4.1.2 Alcance

Desde el punto de vista del alcance, el tipo de investigación es correlacional dado que se analizará la relación que existe entre la separación y número de sondajes y el nivel de incertidumbre asociado. Además, se establecerá una separación óptima entre sondajes que permita categorizar consistentemente los recursos.

4.1.3 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es experimental puesto que se va a evaluar el efecto de la separación y número de sondajes sobre la incertidumbre. Se trabajarán con dos variables independientes, las cuales son: (1) la separación entre los sondajes para diferentes mallas de perforación y (2) los diferentes volúmenes programados de producción, de esa forma se podrán realizar simulaciones geoestadísticas para cuantificar la incertidumbre asociada a cualquier periodo o volumen de producción predefinido y determinar la separación óptima para categorizar los recursos.

4.1.4 Unidad de análisis

La mina Animón es un yacimiento polimetálico de Zinc, Plomo, Cobre y Plata, propiedad de la Empresa Administradora Chungar S.A.C., está ubicada en los Andes Centrales del Perú en el departamento de Pasco, Provincia de Pasco, distrito de Huayllay a una altitud de 4,600 m.s.n.m. a 46 Km. al sureste desde la ciudad de Cerro de Pasco; que produce concentrados de Zinc, Plomo, Cobre y Plata.

Distritalmente tiene las mismas características metalogenéticas que la mina Huarón relacionadas a una actividad Tectónica – Magmática. Los depósitos minerales están constituidos por sistemas de vetas poli-direccionales ricas en Ag en niveles superiores

y polimetálicas con alto contenido de Zn en niveles inferiores, las cuales se presentan con direcciones NW-SE. E-W, NE-SW y N-S, y contienen el mayor volumen de mineral, además de cuerpos mineralizados en niveles estratigráficos favorables de la Formación Casapalca, reconocidos desde la cota 4,540 hasta la cota 4,000 y abierto en profundidad.

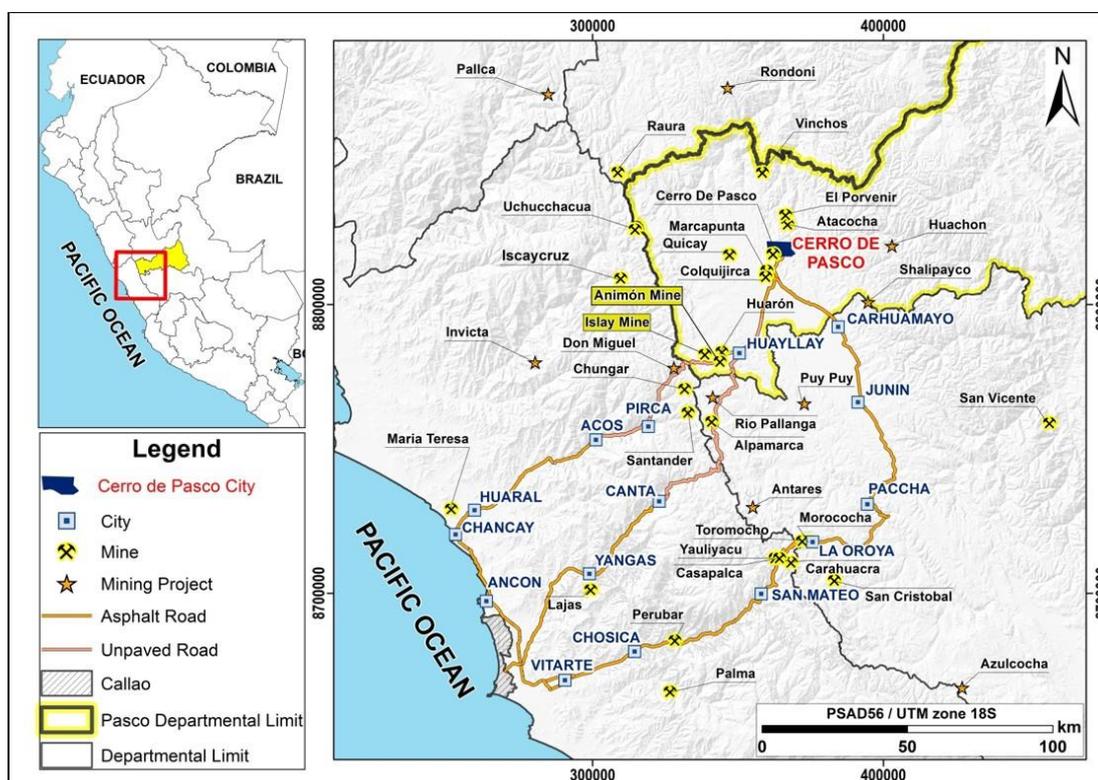


Figura 5: Ubicación de la mina Animón
*Fuente: Área de Geología – Cía. Minera Volcan

La investigación se enfoca en la evaluación de Veta Ramal Piso 3 Principal, que es una de las principales estructuras mineralizadas de mina Animón, donde se aplicó una nueva metodología para definir el “frente de mena” y los estadios de mineralización, basado en un entendimiento geológico más detallado que abarco los siguientes puntos:

- Identificación de dominios a partir del análisis de cocientes metálicos (Zn/Pb, Zn/Cu, Ag/Zn) para definir la zona de Zn, zona de Zn-Pb y zona de Zn-Pb(Ag).

- Vectorización general de fluidos hidrotermales para la identificación de los sectores dentro y fuera del “frente de mena” (zona proximal y distal) a partir de la evaluación de la potencia de veta y el nivel de alteración (Arg-Clo).
- Revisión de los impactos ausentes, mineralogía, logueo existente, registros fotográficos, filtros y tablas estadísticas, box-plots, etc.

A continuación, se presenta un flujograma que detalla el paso a paso utilizado para el modelamiento de los dominios geológicos.

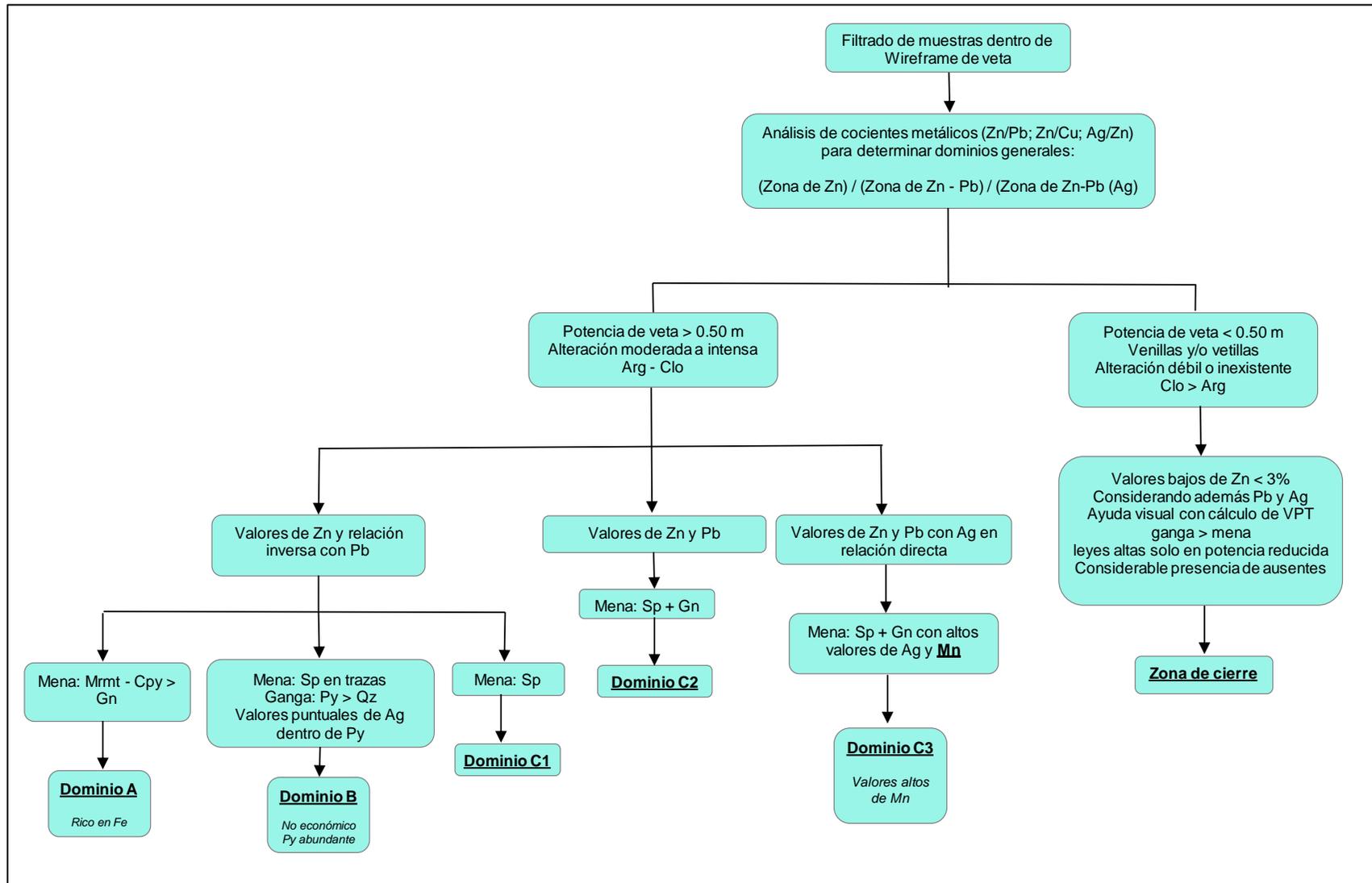


Figura 6: Flujoograma utilizado para la generación de los dominios geológicos
 Fuente: Área de Geología – Cía. Minera Volcan

El estudio geológico permitió la definición de los siguientes sectores en la veta analizada:

- **Zona Proximal:** Zona interna, cercana al canal alimentador, caracterizado por evidenciar una precipitación de mineral con alto contenido de Zn (Marmatita) en condiciones de alta temperatura y energía.
- **Zona Distal:** Zona periférica, caracterizada por evidenciar una precipitación de mineral en condiciones de baja temperatura y energía.

A continuación, se presenta una sección longitudinal de la estructura mineral donde se muestra la ubicación de las zonas proximal y distal, además del cambio en la temperatura.

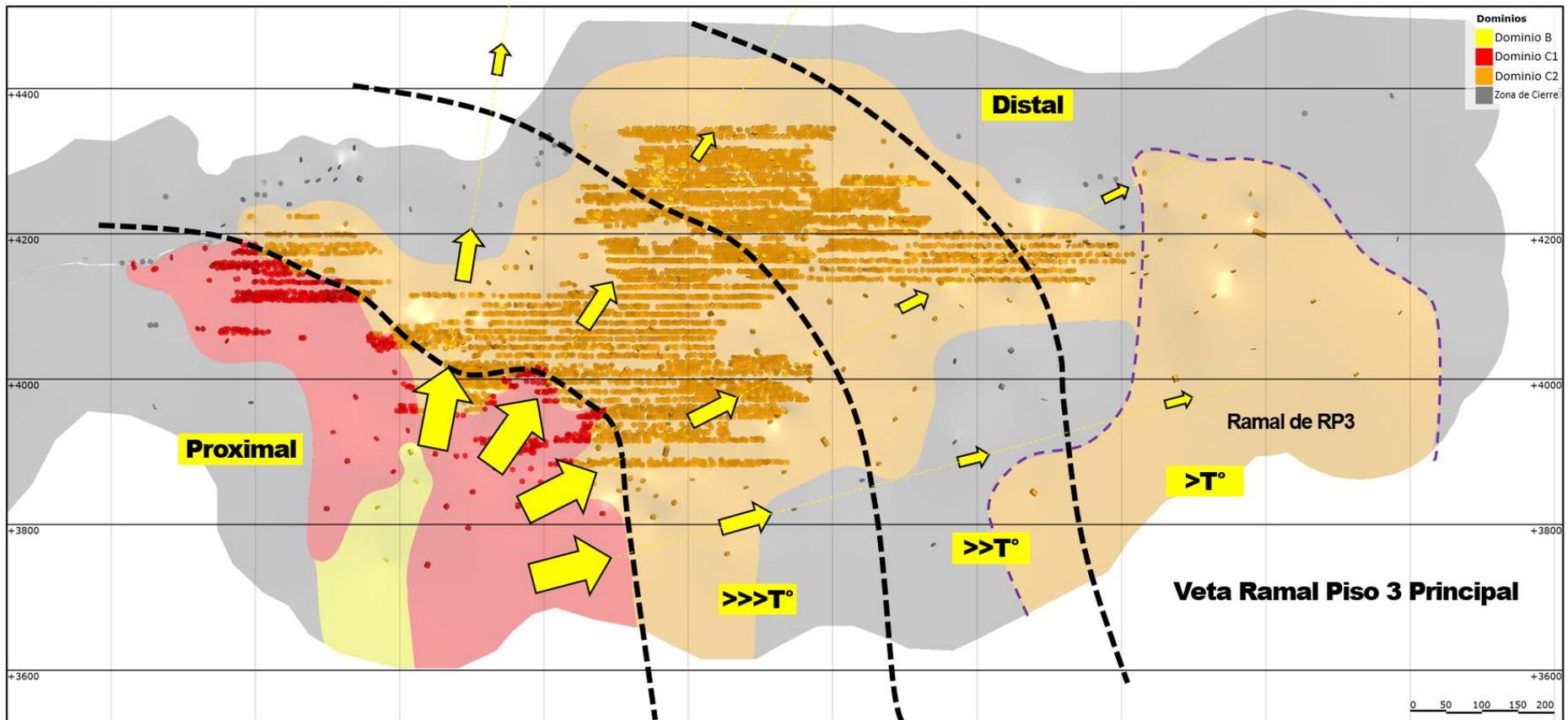


Figura 7: Zona proximal y distal en la veta Ramal Piso 3 Principal
 Fuente: Área de Geología – Cía. Minera Volcan

4.2 Matriz de consistencia

Tabla 3: Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables		Indicadores
			Dependiente	Independiente	
¿Cuál es la separación óptima entre los sondajes que logré reducir la incertidumbre de la variable geológica a un nivel considerado como “aceptable” dentro de un determinado periodo de producción y cuya ejecución no incurra en una elevada inversión para la empresa?	<p>1.- Analizar la incertidumbre asociada a mallas de perforación con distintas separaciones dentro de sectores con alta y baja incertidumbre geológica (zonas dentro y fuera del frente de mena en la estructura mineral).</p> <p>2.- Determinar la separación óptima de sondajes para categorizar consistentemente los recursos minerales cumpliendo con los requisitos detallados en la tabla 1 y cuya ejecución represente una inversión viable para la empresa.</p>	Una adecuada separación entre los sondajes permitirá categorizar consistentemente los recursos y reducirá la incertidumbre asociada a la variable geológica permitiendo una adecuada estimación de la ley.	Nivel de incertidumbre por categoría de recurso.	<p>1.- Separación de los sondajes</p> <p>2.- Volumen de producción (mensual, trimestral, anual).</p>	Probabilidad de que la ley del bloque se encuentre dentro de un rango de +/- 15% del valor esperado.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

5.1 Recolección de la información

Para el desarrollo de la investigación se recolectó la siguiente información:

- Archivos de muestras de la base de datos (Collar, Survey y Assay), conteniendo el registro de los levantamientos topográficos, la medición de las desviaciones y los resultados de análisis geoquímicos de las muestras.
- El sólido 3D en formato mesh (*.msh) de la estructura que se evaluará y su respectivo sólido de frente de mena.
- La producción en toneladas programada para los años 2022 al 2027.

5.2 Validación de la información

El primer paso es validar que las muestras pertenecientes a la estructura mineral han sido correctamente asignadas al sólido durante la etapa de modelamiento

geológico. Para lo cual debemos de realizar una selección de las muestras utilizando el sólido de la veta.

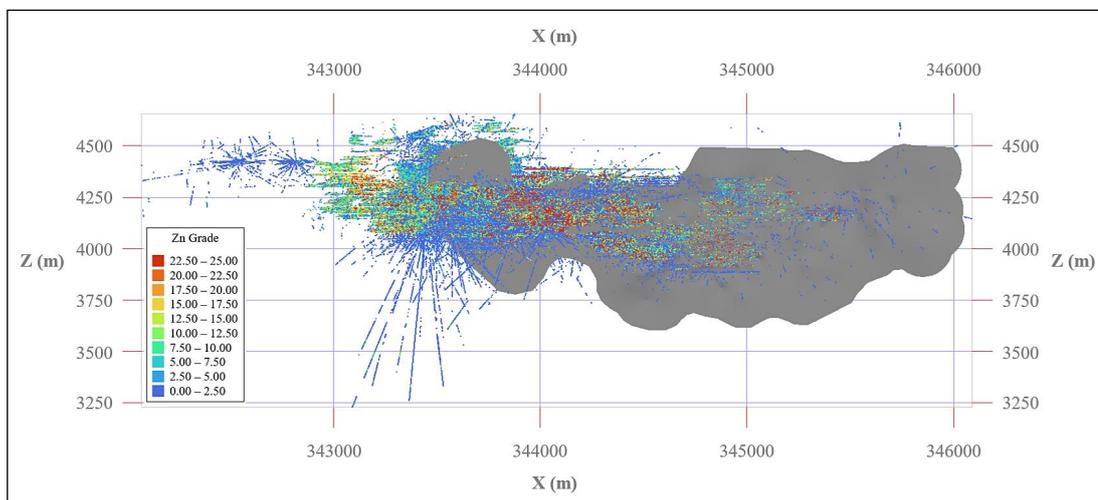


Figura 8: Vista longitudinal mostrando el total de muestras del yacimiento y el sólido de la veta.
Fuente: Elaboración propia

Se cuenta con un total de 74,198 registros de collar que contienen 243,254 muestras de canales y sondajes. En la Figura 8 se observa el total de muestras dentro de la base de datos del yacimiento. Además, se aprecia que la veta analizada tiene una extensión de 2.5 km en la dirección EW y en profundidad se extiende desde la cota 4500 a la cota 3600.

Luego de realizar la selección de las muestras dentro del sólido, solamente 11,314 muestras pertenecen a la estructura analizada. Esta cantidad representa el 4,7% del total de las muestras. De las cuales 622 son muestras de sondajes diamantinos y 10,692 son muestras de canales del interior de la mina.

La base de datos tiene el campo DESCRIPTION que contiene el nombre de la estructura de la cual se extrajo la muestra. Este campo fue utilizado para validar la correcta asignación de las muestras dentro del sólido. Se espera que las muestras de

canales presenten una mayor coincidencia entre el campo DESCRIPTION y la selección a partir del sólido, debido a que se toman del interior de la mina cada 3 metros.

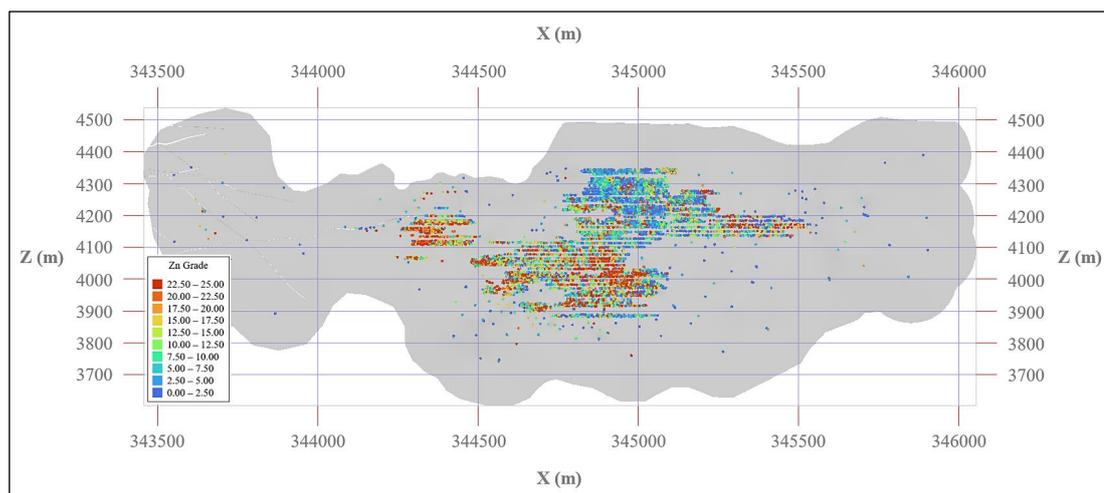


Figura 9: Vista longitudinal mostrando la selección de muestras dentro de la estructura.
Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4 presenta el número de muestras dentro del sólido de la veta, seleccionadas a partir del campo DESCRIPTION, y el número de muestras a partir de la selección realizada con el sólido; en ambos casos clasificados por el tipo de muestra.

Tabla 4: Comparación entre el número de muestras en la base de datos y la selección a partir del sólido

Tipo de Muestra	Campo DESCRIPTION	Selección con el sólido	% de coincidencia
Sondajes	416	622	66.9
Canales	10,664	10,692	99.7
Total	11,080	11,314	97.9

En la Tabla 4 se observa que la coincidencia entre las muestras de canales es de 99.7 % y para las muestras de sondajes diamantinos es de 66.9 %. En ambos casos con respecto a la cantidad de muestras seleccionadas dentro del sólido.

El alto porcentaje de coincidencia en las muestras de canales indica que se realizó una correcta asignación de las muestras en el sólido durante el modelamiento geológico. Para el caso de las muestras de sondajes, se debe considerar que son propensas a un cambio o actualización en el tramo asignado en el sólido debido a un cambio en la interpretación geológica, por lo que un porcentaje de coincidencia de 66.9% indica que no se realizó la actualización del campo DESCRIPTION en la base de datos luego del cambio en la asignación del tramo de muestreo, por lo que será necesario establecer un plan de acción a mediano plazo para la actualización de dicha información.

El segundo paso consistió en la detección de valores negativos y valores muy altos de las leyes dentro de la estructura mineral, para lo cual se utilizó un histograma. El cual permite evaluar gráficamente la distribución de los datos y facilita la detección de datos erróneos.

En la Figura 10 se visualiza el histograma de la ley de Zn para los datos seleccionados dentro de la estructura. El mínimo valor en el conjunto de datos es 0.00, lo que indica un posible error en las leyes, si consideramos que el mínimo valor de ley en el rango de detección del laboratorio es 0.03% de Zn y dicho valor debería corresponderse con el mínimo valor en el conjunto de datos. Por el contrario, el máximo valor registrado es de 60.85% de Zn, el cual es un valor alto de Zn, pero se encuentra por debajo del 100% y puede corresponder a un alto errático (*outlier*) que será tratado más adelante

en el desarrollo de esta investigación. Tomando en cuenta los valores mínimo y máximo del conjunto de datos, se descarta la presencia de valores negativos.

El total de los datos es 11,314 y coincide con el total de datos seleccionados dentro del sólido (ver Tabla 4) por lo que se descarta la presencia de valores ausentes.

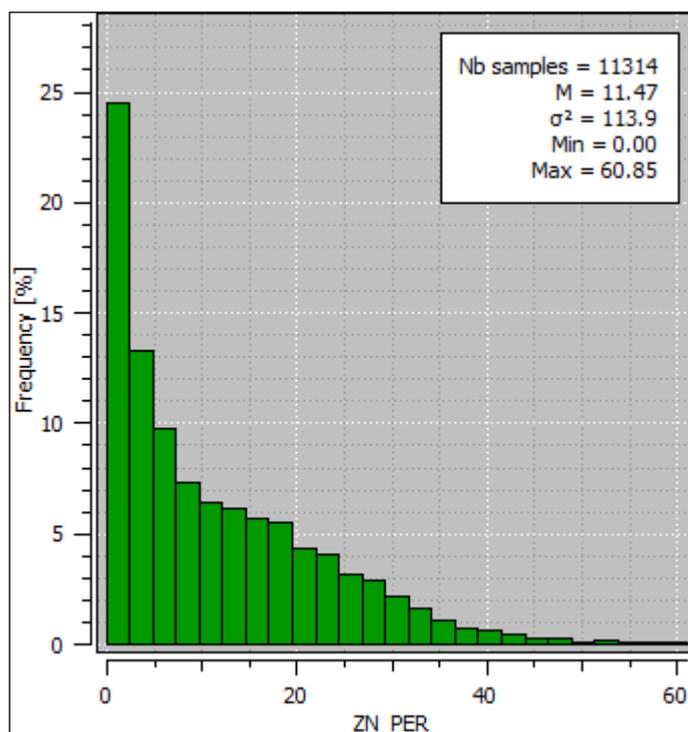


Figura 10: Histograma de Zn para los datos dentro del sólido de la veta

*Fuente: Elaboración propia

Con respecto a las muestras por debajo del límite de detección, una validación visual de la ubicación permitió determinar si es necesario una revisión más detallada de las leyes en dichas muestras (ver Figura 11).

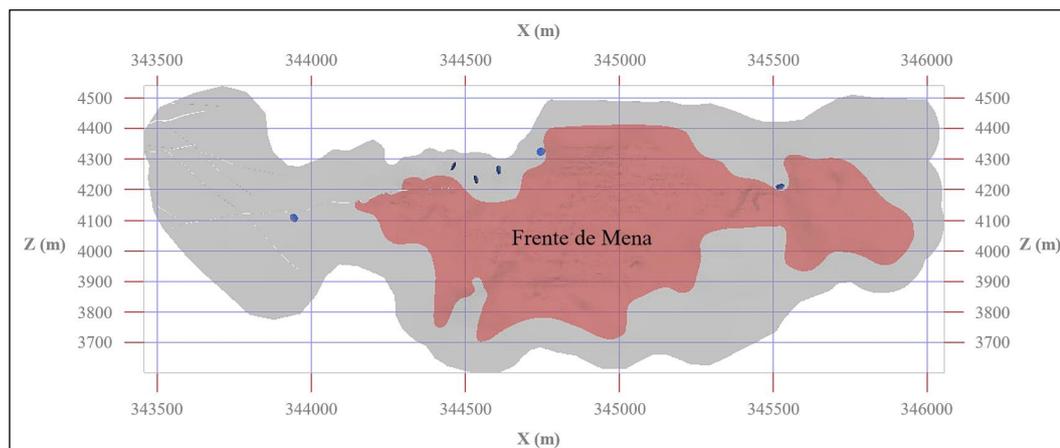


Figura 11: Ubicación de las leyes por debajo del límite de detección
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11 se observa un total de 6 muestras por debajo del límite de detección. Dichas muestras se ubican fuera del sólido de frente de mena, en los bordes o sectores alejados de la operación minera. No hace falta revisar si presentan leyes erróneas porque representan un porcentaje mínimo con respecto al total de muestras y no son consideradas en el análisis que se enfoca en el sector dentro del frente de mena.

La siguiente etapa en la validación de la información es la evaluación del sólido de la estructura. Se utilizó un comparativo volumétrico para determinar la variación de volumen entre el sólido actual y el anterior. Una variación volumétrica mayor al 5% indica un cambio considerable en la forma o extensión del sólido. Lo cual debe ser revisado y sustentado.

Tabla 5: Variación volumétrica en el sólido de la veta

Atributo	Sólido Anterior	Sólido Actual	Diferencia	Diferencia (%)
Volumen (m ³)	1,969,900	1,931,200	-38,700	-1.96%

En la Tabla 5 se observa que la variación volumétrica se encuentra dentro del rango de tolerancia de $\pm 5\%$. Lo cual indica que no existe un cambio considerable en la forma del sólido por el ingreso e interpretación de la nueva información geológica.

El siguiente paso en la validación del sólido, consistió en una revisión más detallada de los tramos asignados en cada muestra. Lo cual se realizó con secciones transversales a la estructura utilizando el software Leapfrog Geo.

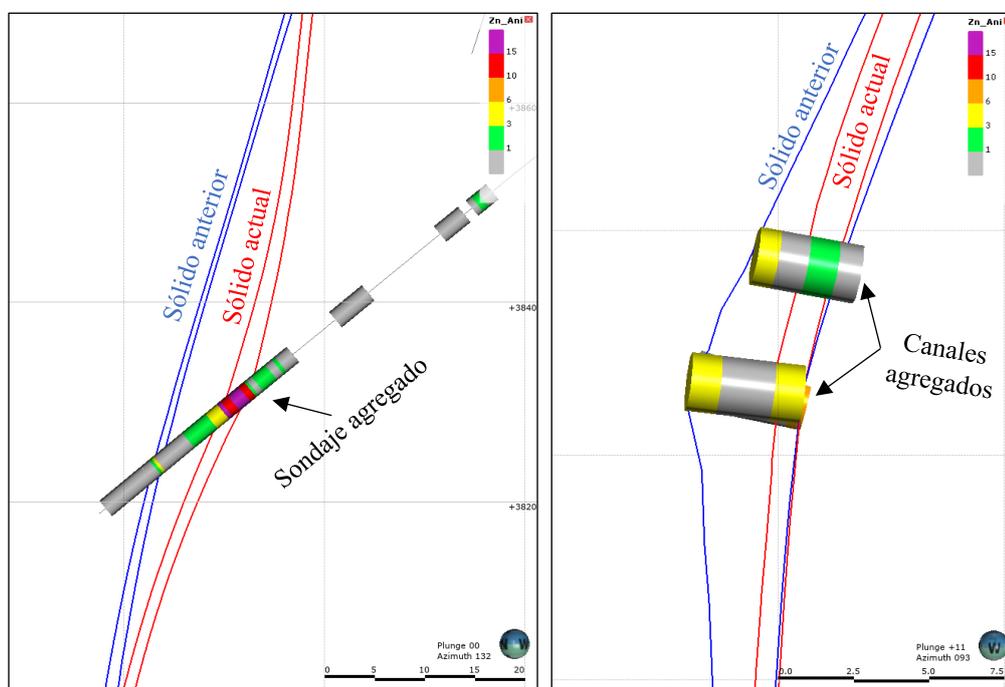


Figura 12: Secciones utilizadas para la revisión de los tramos asignados al sólido.
Fuente: Elaboración propia

Se comparo el sólido anterior y el actualizado utilizando secciones transversales para verificar la correcta interpretación y asignación de los tramos de muestreo en las muestras más recientes de la estructura. Dicho método permitió descartar la presencia de fuertes inflexiones, deformaciones, cambios bruscos en la potencia de la estructura y la presencia de agujeros en el sólido modelado. Dichos inconvenientes hubieran

afectado la creación del modelo de bloques. Dos ejemplos de las secciones utilizadas se muestran en la Figura 12.

Finalmente, luego de evaluar los resultados obtenidos se llegó a la conclusión de que la base de datos y el sólido de la estructura mineral cumplen satisfactoriamente con los requisitos de aceptación y pueden ser utilizados en las siguientes etapas del presente trabajo de investigación.

5.3 Análisis exploratorio de datos

El primer paso consistió en calcular las medidas estadísticas mostradas en la Tabla 6 para todas las leyes de Zn. Luego se evaluó gráficamente su distribución utilizando un histograma, como se muestra en la Figura 10. El cual mostró que las leyes presentan una distribución asimétrica positiva. La cual es una característica de la ley de Zn.

Tabla 6: Medidas estadísticas considerando el total de los datos

Medidas Estadísticas	Ley de Zn
N° de muestras	11,314
Mínimo	0.00
Máximo	60.85
Media	11.47
Desviación Estándar	10.67
Varianza	113.9
C. V.	0.93
Q (25%)	2.53
Q (50%)	8.14
Q (75%)	18.06

Luego se evaluó la consistencia y distribución de la información utilizando histogramas y considerando dos dominios diferentes. El primer dominio contenía las muestras dentro del frente de mena (ver Figura 14). El segundo dominio contenía las muestras dentro del sector comprendido entre el límite del frente de mena y el borde de la estructura completa (ver Figura 13).

Se separó la información en dos dominios para determinar la representatividad de los sectores dentro y fuera del frente de mena. Con el objetivo de proponer la reducción de la extensión del sólido de la veta considerando únicamente el frente de mena.

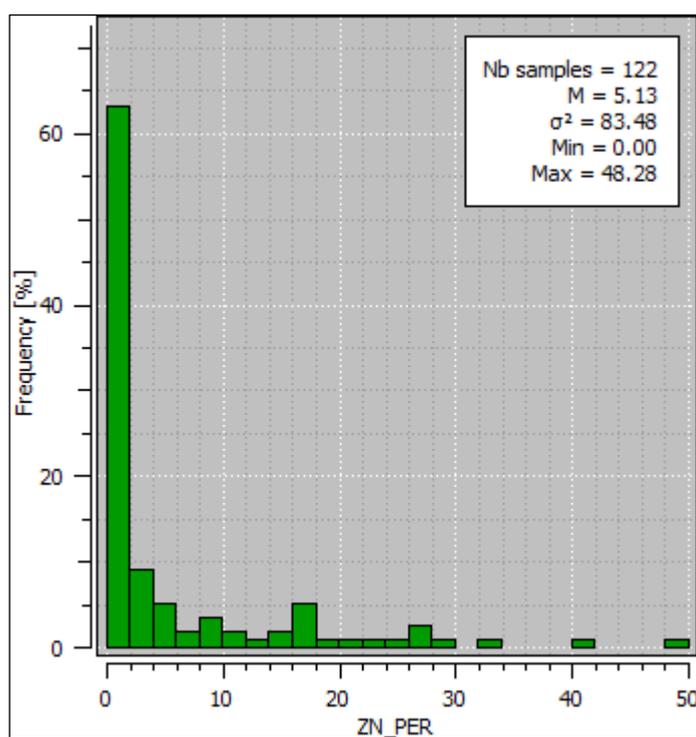


Figura 13: Histograma de Zn para los datos fuera del frente de mena.

Fuente: Elaboración propia

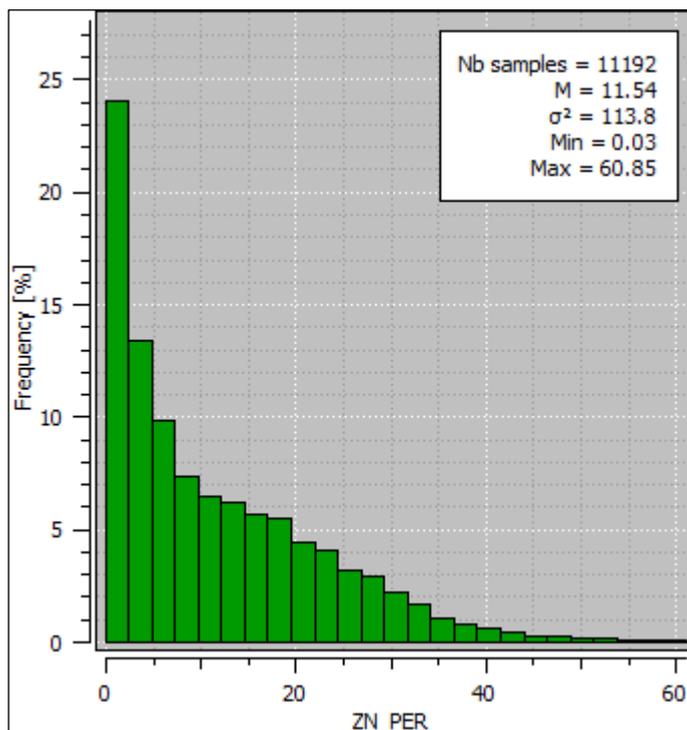


Figura 14: Histograma de Zn para los datos dentro del frente de mena.

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la Figura 13 que la información fuera del frente de mena representa el 1.1% del total. Siendo la ley media de Zn de 5.13%. Además, presenta pocos valores altos, los cuales pueden ser considerados valores *outlier*.

Finalmente, para el desarrollo de la investigación se consideró el sector y las muestras dentro del frente de mena por los siguientes motivos:

- La escasa información con la que contaba el sector fuera del frente de mena, como se mencionó en el párrafo anterior. Lo cual pudo causar una extrapolación de la ley de Zn durante las simulaciones geoestadísticas.
- La reducción en el número de nodos de la grilla necesarios para las simulaciones geoestadísticas, debido a la menor área del frente de mena. Lo cual reduce el tiempo y almacenamiento necesarios para las simulaciones.

Respecto al tipo de información que se utilizó, debido a la gran proporción de muestras de canales con respecto a las muestras de sondajes (ver Tabla 4) la investigación se realizó considerando el total de muestras.

5.4 Control de valores altos

Para controlar la influencia de los valores altos en la base de datos se aplicó el método de *capping*. El cual consiste en establecer un valor máximo de ley de Zn a partir de la distribución de las leyes en una gráfica de probabilidad acumulada. Luego los valores por encima del valor de *capping* establecido serán reemplazados por dicho valor.

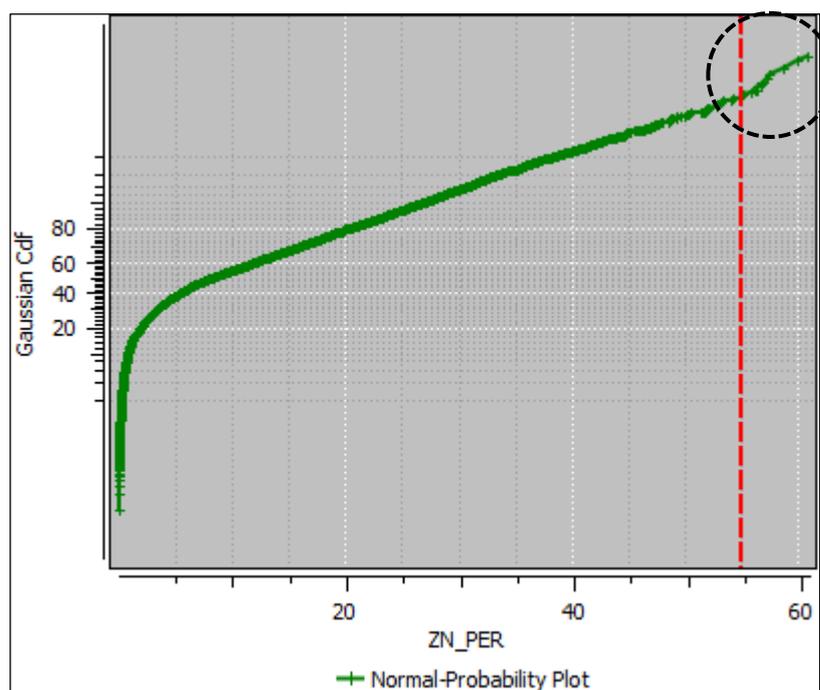


Figura 15: Curva de probabilidad acumulada de las leyes de Zn.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 15 se observa la curva de probabilidad acumulada de las leyes de Zn y una línea punteada roja que indica el valor de *capping* seleccionado correspondiente a

55% de Zn. Además, la Tabla 7 muestra que el 99.88% de los datos se encuentran por debajo de dicho valor, por lo cual el número de datos afectados no es significativo.

La Figura 16 muestra el histograma de los datos luego de reemplazar los valores altos por el valor de *capping*. El cual es similar al histograma original de los datos (ver Figura 14).

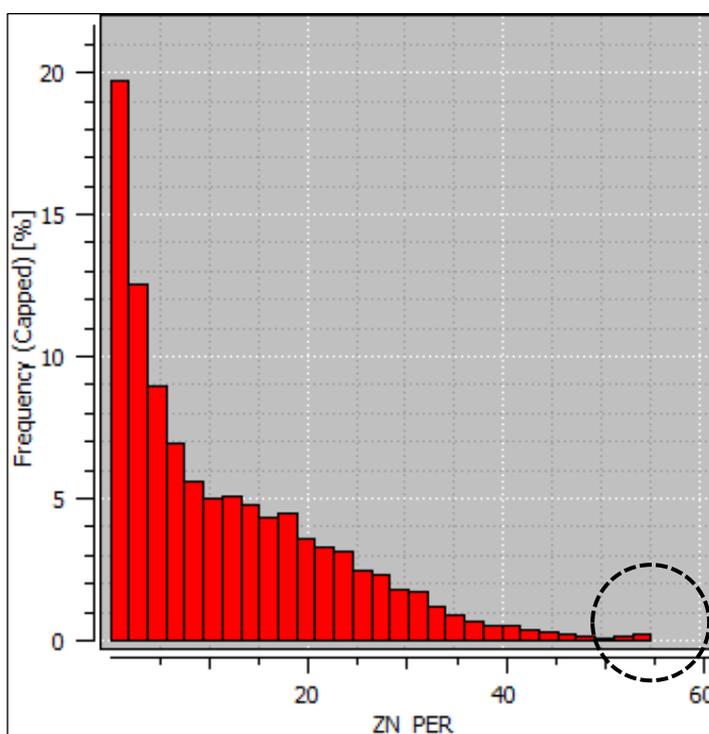


Figura 16: Histograma de leyes de Zn luego de aplicar el método de capping.

Fuente: Elaboración propia

También se evaluó el impacto en el contenido metálico que se pierde luego de aplicar la restricción a los valores altos. La Tabla 7 muestra el porcentaje de metal perdido a diferentes valores de *capping*, resaltando el valor utilizado.

Aplicando un valor de *capping* de 55% de Zn el porcentaje de metal perdido es 0.02 %, lo cual no es una cantidad significativa.

Tabla 7: Medidas estadísticas a diferentes valores de capping de ley de Zn, señalando el valor de capping utilizado para la investigación

	Valor de Capping	Percentil (%)	Media	Desviación Estándar	C. V.	Metal Perdido (%)
C1	8.25	50.00	5.68	3.05	0.537	50.78
C2	10.06	55.00	6.54	3.81	0.582	43.34
C3	11.99	60.00	7.36	4.60	0.625	36.25
C4	13.80	65.00	8.04	5.31	0.660	30.37
C5	15.95	70.00	8.74	6.10	0.698	24.31
C6	18.12	75.00	9.33	6.83	0.732	19.14
C7	20.54	80.00	9.87	7.56	0.766	14.45
C8	23.47	85.00	10.39	8.33	0.802	10.00
C9	27.15	90.00	10.84	9.09	0.838	6.06
C10	32.17	95.00	11.21	9.80	0.874	2.88
C11	55.00	99.88	11.54	10.66	0.924	0.02
C12	60.85	100.00	11.54	10.67	0.924	0.00

En conclusión, el valor de *capping* seleccionado puede ser utilizado para controlar la influencia de los valores altos, sin afectar significativamente la distribución y comportamiento estadístico de los datos, además del contenido metálico de la estructura mineral.

5.5 Composición de las muestras

Se realizó una composición de los datos para regularizar su longitud de muestreo. La Figura 17 muestra el histograma del campo “length”, el cual contiene las longitudes de muestreo de cada una de las muestras en la base de datos. El histograma muestra que los valores se encuentran entre un mínimo de 0.05 m y un máximo de 2.9 m. por lo cual deben ser regularizados.

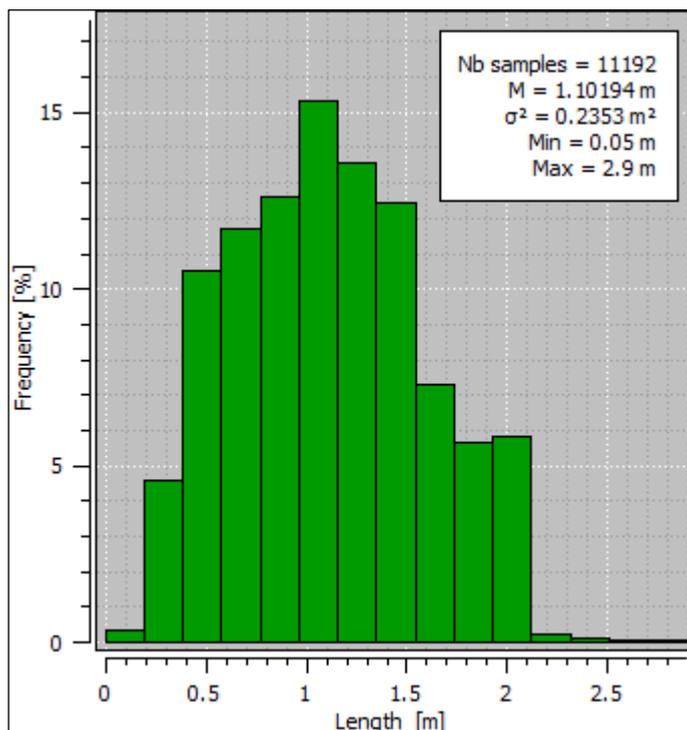


Figura 17: Histograma de las longitudes de muestreo en los datos.

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó la media y la moda del histograma para determinar el valor de composición. La media y la moda tienen valores cercanos a 1 metro, por lo cual el valor de composición utilizado fue de 1 metro. La Tabla 8 muestra las medidas estadísticas antes y después de realizar la composición de los datos.

Tabla 8: Comparativo estadístico entre datos compositados y no compositados (pesados por el campo "length")

Medidas Estadísticas	Ley de Zn (No compositada)	Ley de Zn (Compositada)	Longitud (No compositada)	Longitud (Compositada)
N° de muestras	11,192	12,970	11,192	12,970
Mínimo	0.03	0.03	0.05	0.1
Máximo	55.00	55.00	2.9	1.5
Media	11.16	11.15	1.10	0.96
Desviación Estándar	10.35	9.35	0.49	0.20

A partir de los datos mostrados en la Tabla 8 se puede concluir que utilizar una longitud de composición de 1 metro no afecta el comportamiento estadístico de la ley de Zn de manera significativa. La Figura 18 muestra el histograma de la ley compositada de Zn.

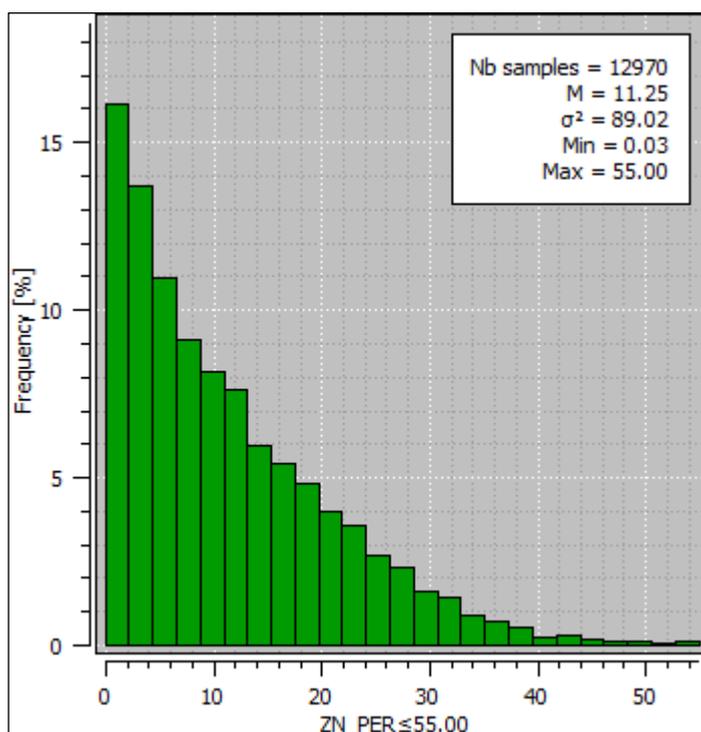


Figura 18: Histograma de la ley compositada de Zn.

Fuente: Elaboración propia

5.6 Desagrupamiento de las muestras

La distancia de muestreo en los canales tiende a ser pequeña debido a que existe un sesgo en el muestreo, el cual otorga preferencia a los sectores económicos donde se ha realizado la extracción de mineral. En contraste, el muestreo de los sondajes diamantinos se realiza siguiendo una malla de perforación previamente definida. Por lo cual se asigna un peso diferencial a cada uno de los datos en función de su

proximidad a los otros datos a su alrededor, para lo cual se utilizó la técnica del **desagrupamiento por celdas**.

Se calculó la media de los datos desagrupados en 10 escenarios con distintos tamaños de celda, partiendo de un tamaño de 10x10x10 metros hasta llegar a un tamaño de 100x100x100 metros, con un incremento de 10 metros entre cada escenario.

Se graficó la media de los datos desagrupados de cada escenario versus su índice de prueba correspondiente. Como se observa en la Figura 19.

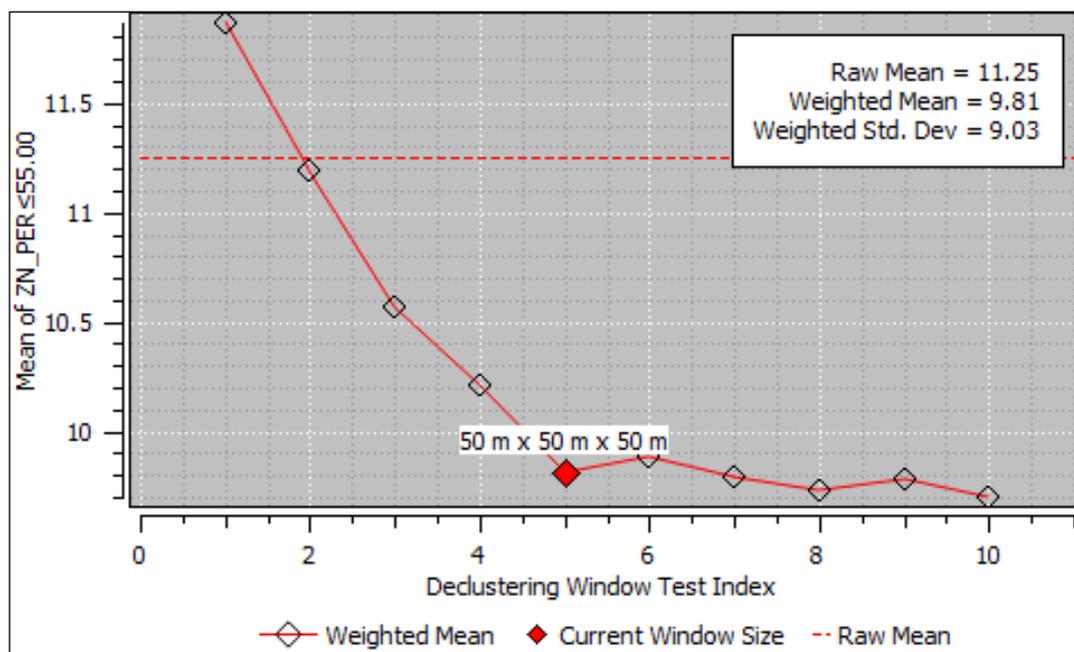


Figura 19: Media de los datos desagrupados aplicando el método de celdas.
Fuente: Elaboración propia

Se seleccionó un tamaño de celda de 50x50x50 metros que corresponde al escenario en el cual la media de los datos desagrupados comienza a estabilizarse. Luego se comparó la media y la varianza de los datos antes y después de aplicar el método de desagrupamiento, para medir su impacto en los datos.

Tabla 9: Media y varianza de los datos antes y después de aplicar el método de desagrupamiento por celdas

Medidas Estadísticas	Zn (Agrupado)	Zn (Desagrupado)
N° de muestras	12,970	12,970
Media	11.25	9.81
Varianza	89.02	81.47

Utilizando un histograma se evaluó la distribución de los datos desagrupados, y se comparó con el histograma de los datos agrupados (ver Figura 18). Se observa un mayor incremento en la frecuencia de los datos con ley de Zn menor a 2%, además de una asimetría positiva.

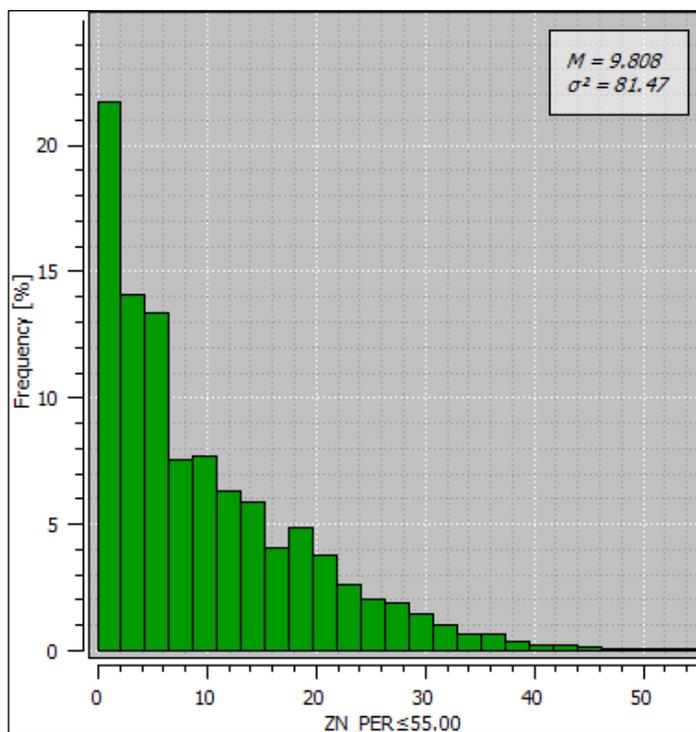


Figura 20: Histograma de la ley desagrupada de Zn.
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se visualizaron los pesos asignados a cada muestra en una vista 3D para evaluar la distribución de los pesos en el espacio. En la Figura 21 se observa que los

pesos más altos están asignados a las muestras más alejadas y los pesos más bajos a las muestras más cercanas entre si (o agrupadas).

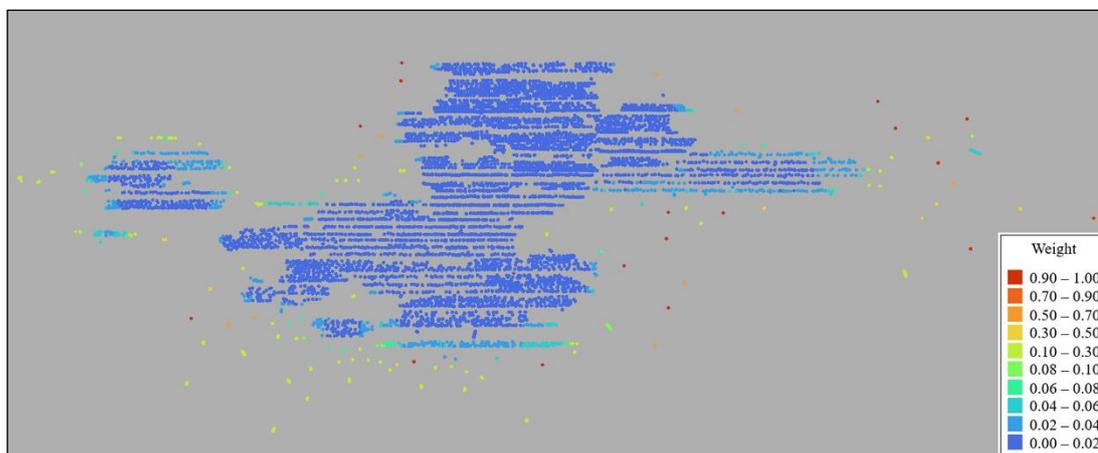


Figura 21: Distribución espacial de los pesos asignados a cada muestra obtenidos a partir del desagrupamiento por el método de celdas.

Fuente: Elaboración propia

5.7 Transformación gaussiana de los datos

Para realizar una simulación geoestadística se debe cumplir la hipótesis que supone una distribución Gaussiana de la ley de Zn en el espacio, lo que no se cumple en la realidad. Por lo tanto, es necesario realizar una transformación Gaussiana de la ley de Zn.

Específicamente, se calcula una anamorfosis experimental a partir de la distribución desagrupada de los datos. Luego, se ajusta un modelo consistente en una función lineal por partes, extrapolada con funciones exponenciales (Cortez, 2015).

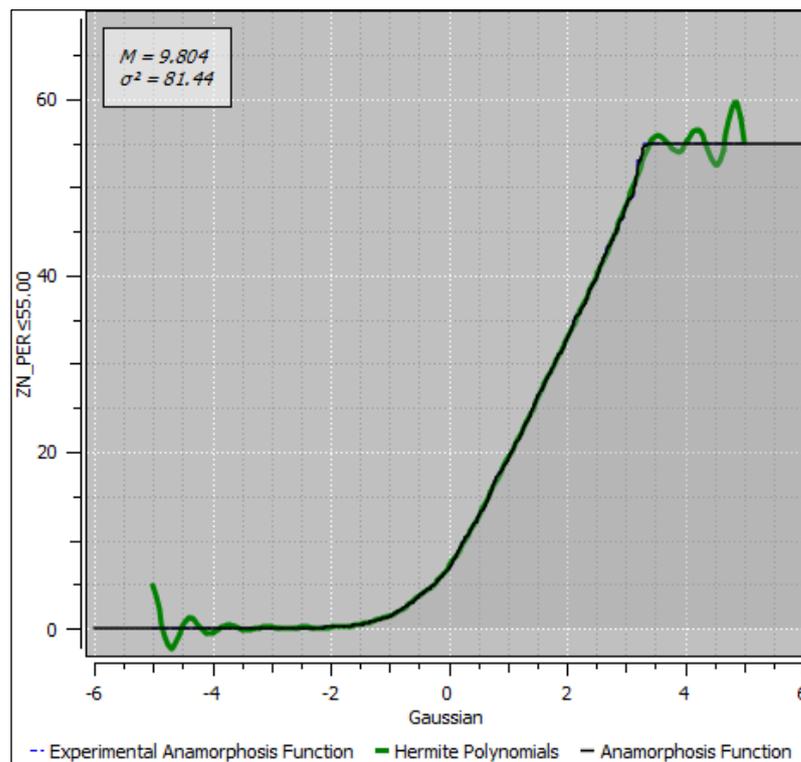


Figura 22: Modelamiento de la anamorfosis Gaussiana para la ley de Zn.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 10 se observa una comparación entre las medidas estadísticas de la ley de Zn antes y después de la transformación Gaussiana. En la Figura 23 se observa la distribución Gaussiana de la ley transformada de Zn.

Tabla 10: Comparativo estadístico de la ley de Zn antes y después de la transformación Gaussiana

Medidas Estadísticas	Ley de Zn	Ley de Zn transformada
N° de muestras	12,970	12,970
Mínimo	0.03	-4.18
Máximo	55.00	3.98
Media	9.81	0.00
Desviación Estándar	9.03	0.99
Q (25%)	2.68	-0.67
Q (50%)	6.71	0.00
Q (75%)	14.71	0.67

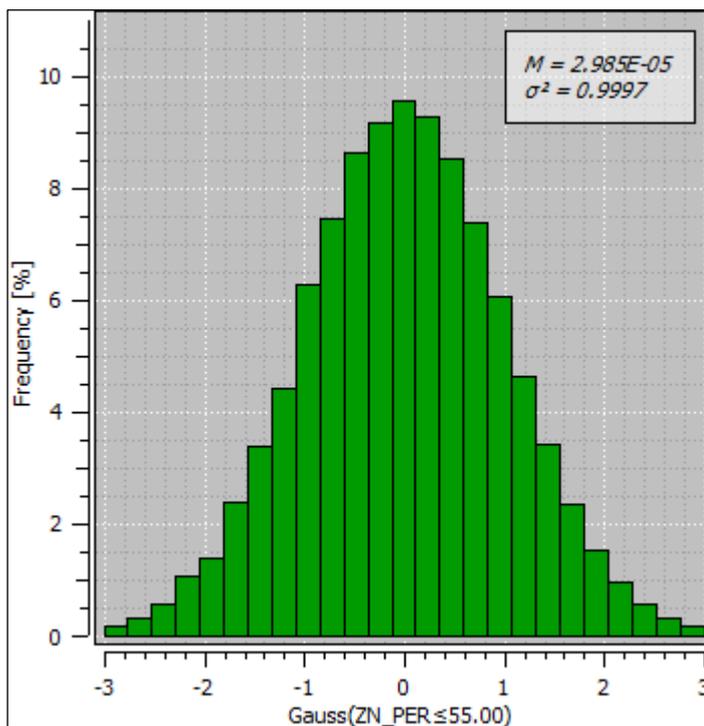


Figura 23: Histograma de la ley de Zn transformada.
Fuente: Elaboración propia

5.8 Análisis variográfico

Se generaron mapas variográficos sobre un plano de referencia considerando el total de los datos originales compositados y desagrupados, y el total de los datos transformados para analizar su continuidad espacial.

Al tratarse de una veta (estructura tabular) el plano de referencia más adecuado es el plano que coincide con el azimuth y dip de la estructura mineral. Es evidente que sobre dicho plano se encuentra la mayor densidad de muestras y por consiguiente se puede realizar un adecuado análisis.

Tabla 11: Parámetros utilizados para el cálculo del mapa variográfico

Parámetros	Valor
Azimut	270°
Dip	80°
Lag	20 m
Distancia Máxima	400 m

En la Figura 24 se presentan los mapas variográficos obtenidos considerando un alcance de 400 metros sobre el plano de referencia. Se observan dos posibles direcciones de anisotropía con cierto grado de perpendicularidad entre ellas. Sin embargo, a una escala menor que 100 metros no es posible definir una adecuada dirección de anisotropía, lo que nos puede indicar un comportamiento distinto de las leyes a menor escala.

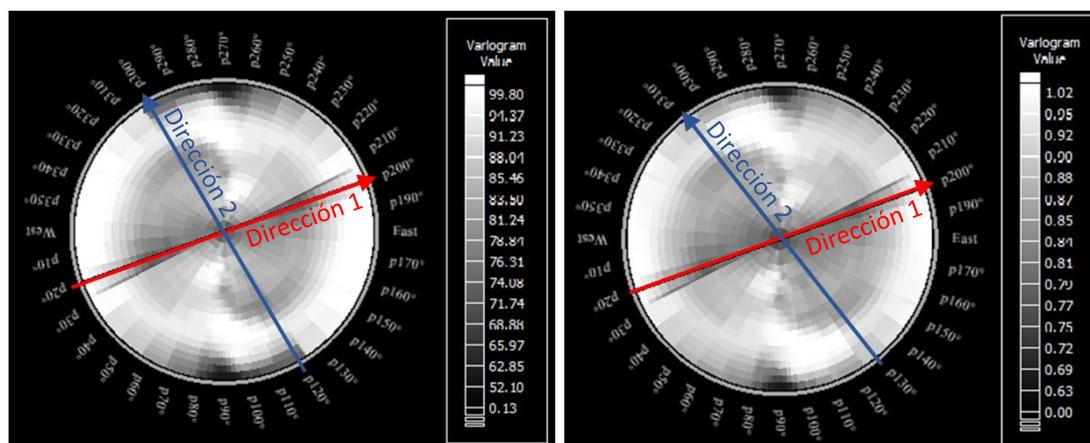


Figura 24: Mapas variográficos de la ley de Zn indicando las posibles direcciones de anisotropía (Izquierda: Ley de Zn sin transformar. Derecha: Ley de Zn transformada).

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 25 se presentan las direcciones de anisotropía sobre los valores de ley de Zn transformados a una escala de veta completa. A corta escala el comportamiento puede ser distinto, observándose sectores de alta y baja ley de manera alternada.

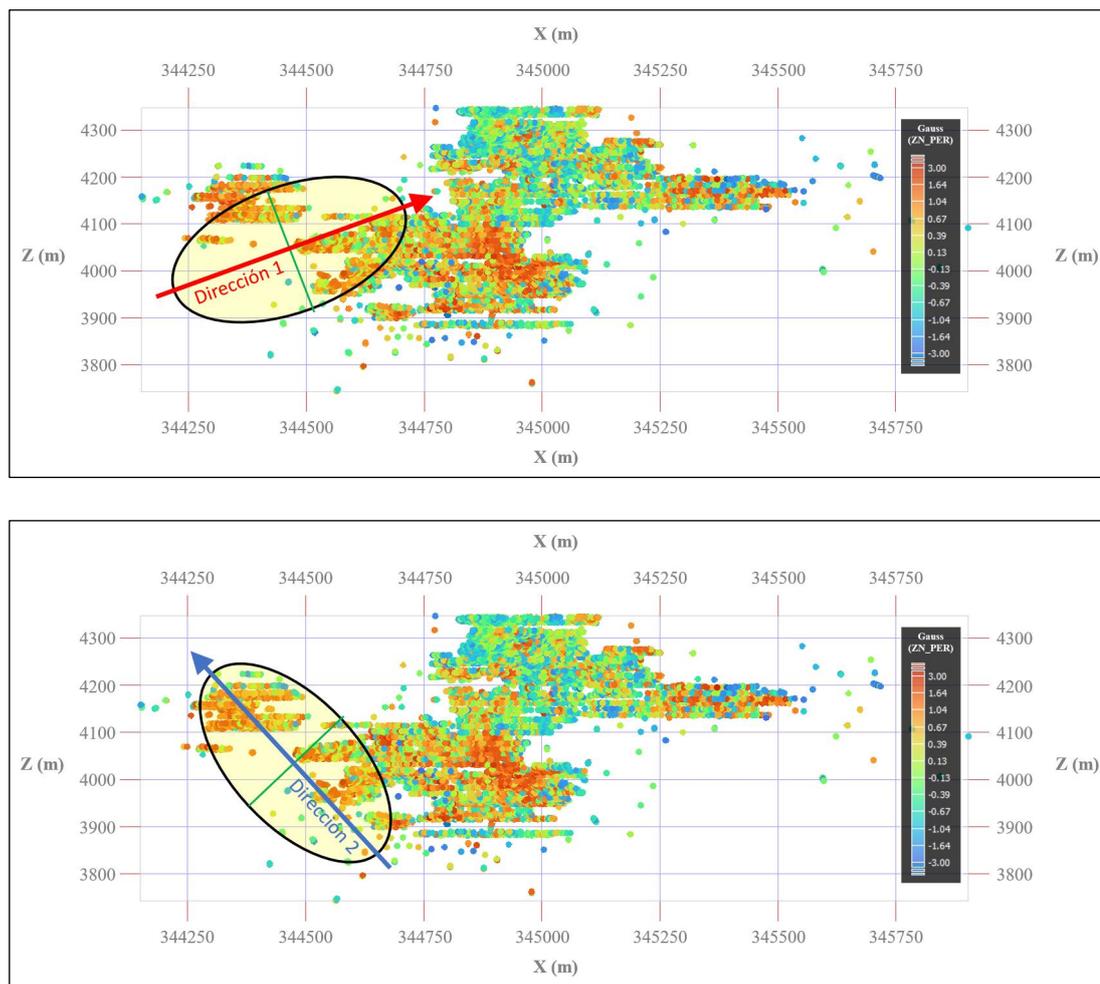


Figura 25: Direcciones de anisotropía para los valores de ley de Zn transformados (Arriba: Dirección 1. Abajo: Dirección 2)

Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de entender mejor la distribución de las leyes de Zn en la estructura mineral, se graficaron las leyes sobre una vista longitudinal de la veta utilizando diferentes valores de corte. En la Figura 26.a se observa que las leyes de Zn superiores a 15% están distribuidas en toda la estructura, también se observa que al reducir el valor de corte las leyes medias y bajas, es decir, inferiores al 15% (Figura 26b, 26c y 26d) rodean a las leyes altas o superiores a 15%

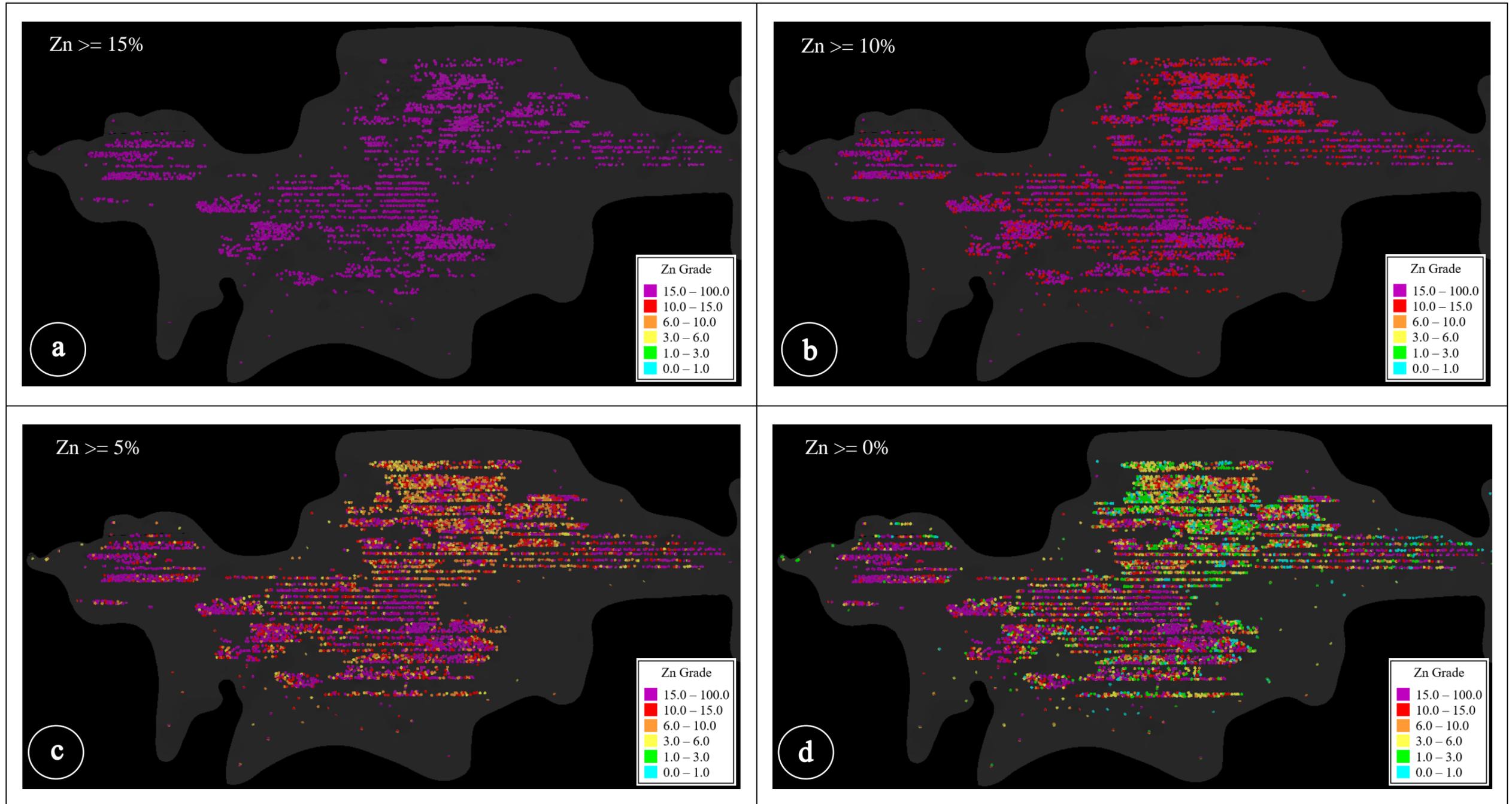


Figura 26: Distribución de leyes de Zn sobre la veta a diferentes valores de corte.
Fuente: Elaboración propia

Utilizando la distribución de las leyes no se pudo determinar una dirección de anisotropía preferente en una escala menor a 100 metros. Por lo cual se calculó el variograma omnidireccional experimental de los datos de Zn transformados, utilizando los siguientes parámetros:

Tabla 12: Parámetros utilizados para el cálculo del variograma omnidireccional

Parámetros	Valor
Lag	18 m
Distancia Máxima	400 m
Nº de lags refinados	1
Lag refinado	6 m
Tolerancia del lag	50%

En la Figura 27 se observa el variograma omnidireccional resultante.

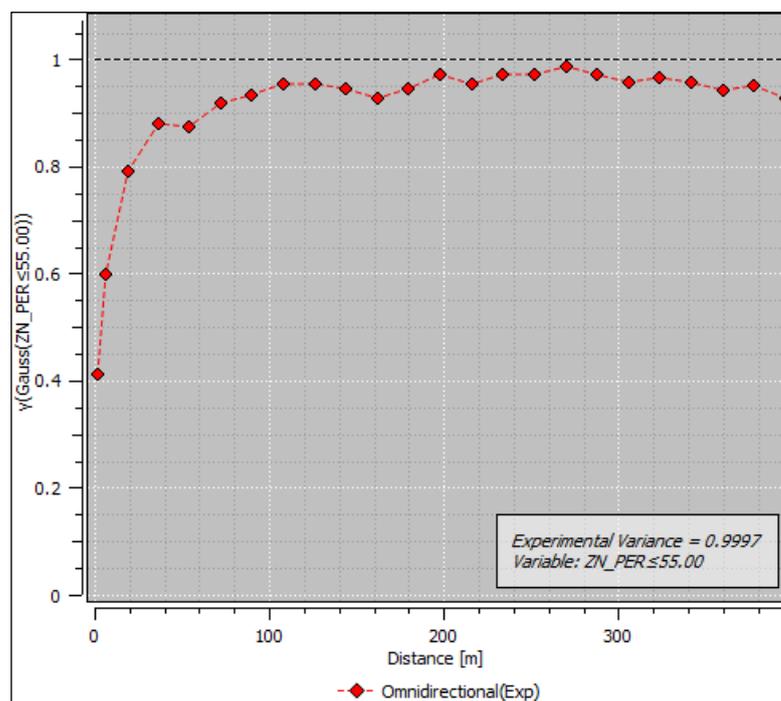


Figura 27: Variograma omnidireccional experimental de la ley de Zn transformada

Fuente: Elaboración propia

A partir del variograma resultante se determinó que la ley de Zn presenta una buena continuidad en el espacio, con un efecto pepita de aproximadamente 0.4 y que la meseta se aproxima a 1. El alcance se puede establecer entre los 260 y 280 metros.

5.8.1 Modelamiento del variograma

Para el modelamiento del variograma experimental se utilizaron los siguientes parámetros.

Tabla 13: Parámetros utilizados para el modelamiento del variograma experimental

Estructura	Parámetros	Valor
<i>Nugget</i>		0.31
Estructura N° 1	Tipo	Exponencial
	Meseta	0.50
	Rango	23.95 m
Estructura N° 2	Tipo	Esférico
	Meseta	0.15
	Rango	137.16 m

A partir de los parámetros utilizados se obtuvo el siguiente variograma teórico ajustado al variograma experimental.

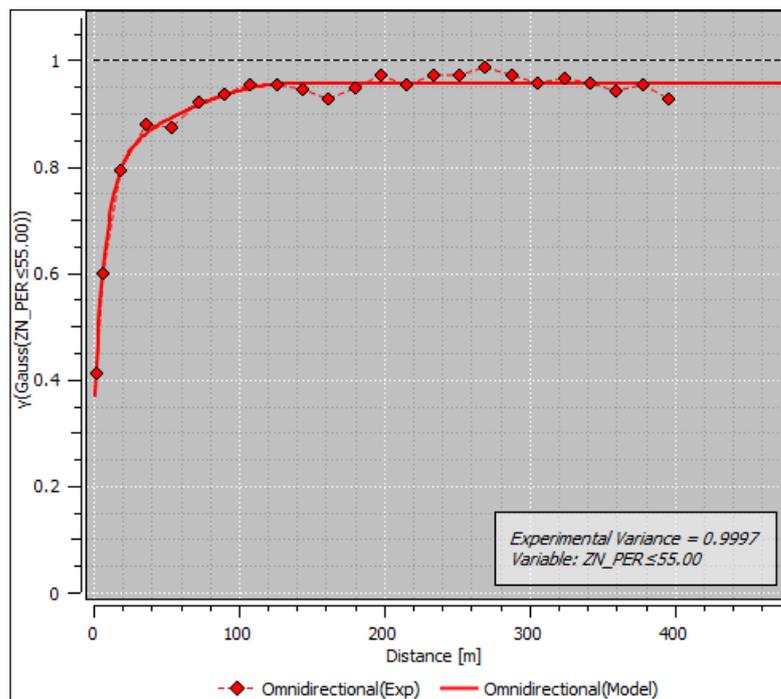


Figura 28: Variograma teórico ajustado al variograma experimental
Fuente: Elaboración propia

5.9 Configuración de la simulación geoestadística

5.9.1 Parámetros de la grilla

El primer paso consistió en determinar el tamaño y la resolución de la grilla. La cual debe cubrir toda la estructura mineral y tener una resolución adecuada para las realizaciones.

Tabla 14: Parámetros de la grilla utilizada

Parámetros	X	Y	Z
Número de nodos	1820	260	875
Tamaño de celda	1 m	1 m	1 m
Origen de la grilla	344,141 m	8,780,556 m	3,602 m

En la Tabla 14 se observa que la grilla elegida tenía una resolución de 1x1x1 metros y un total de 414,050,000 nodos. Pero solo se utilizaron los nodos dentro de la estructura mineral, con el objetivo de reducir el tiempo de procesamiento de las realizaciones. La cantidad de nodos utilizados fue de 1,649,508.

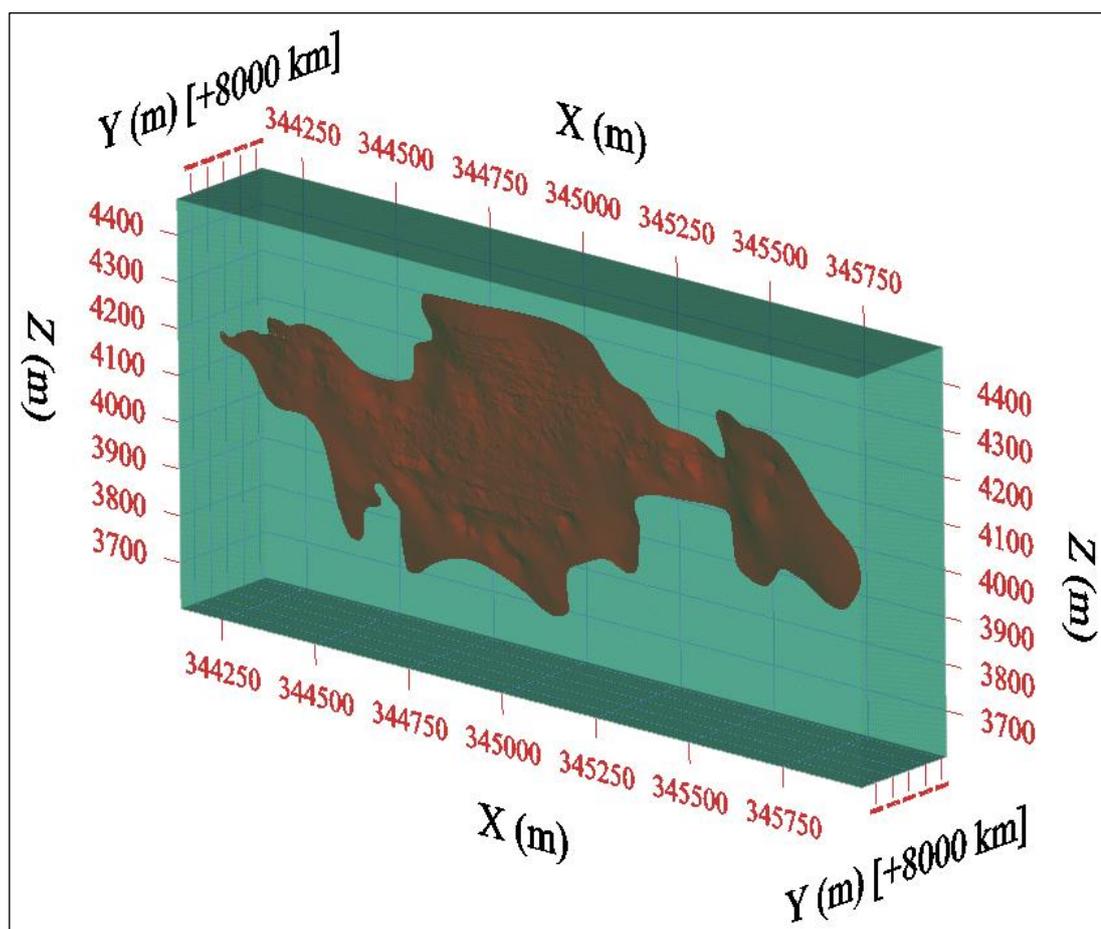


Figura 29: Vista de la grilla conteniendo a la estructura mineral
*Fuente: Elaboración propia

5.9.2 Parámetros de la simulación

Se utilizó el algoritmo de bandas rotantes para correr las realizaciones de la simulación sobre los nodos de la grilla (centroides). Se emplearon 500 bandas y una semilla cuyo valor fue 165,427.

El elipsoide de búsqueda fue dividido en dos partes de manera horizontal y los parámetros utilizados fueron los siguientes:

Tabla 15: Parámetros de la vecindad de búsqueda para las realizaciones

Parámetros	Valores	
Radios	U	80 m
	V	80 m
	W	80 m
Nº de sectores angulares	4	
Nº óptimo de muestras por sector	5	
Nº mínimo de muestras	3	

5.10 Visualización de las realizaciones

Se construyeron un total de 50 realizaciones condicionadas con las muestras.

A continuación, se presentan las realizaciones Nº 01, 05, 25, 45 y 50 a modo de ejemplo.

Realización N° 01

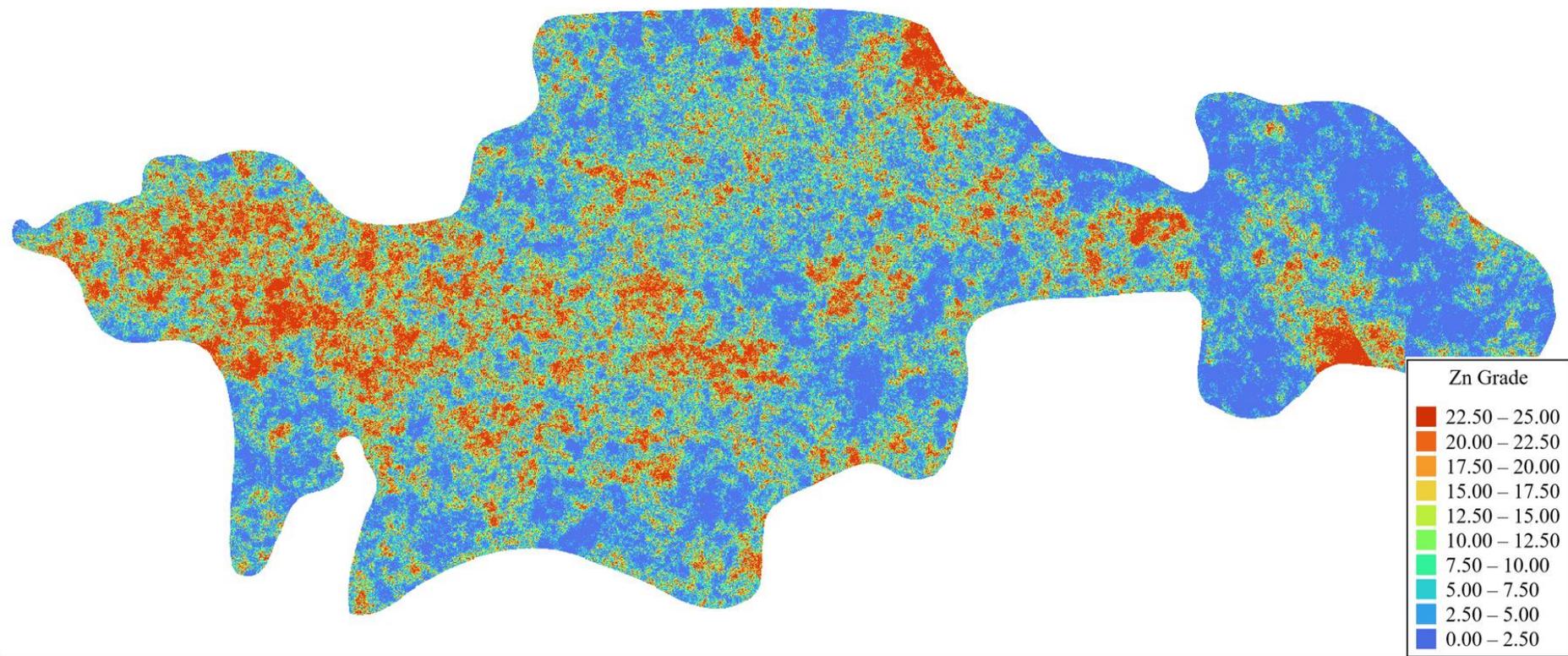


Figura 30: Vista longitudinal de la realización N° 01
Fuente: Elaboración propia

Realización N° 05

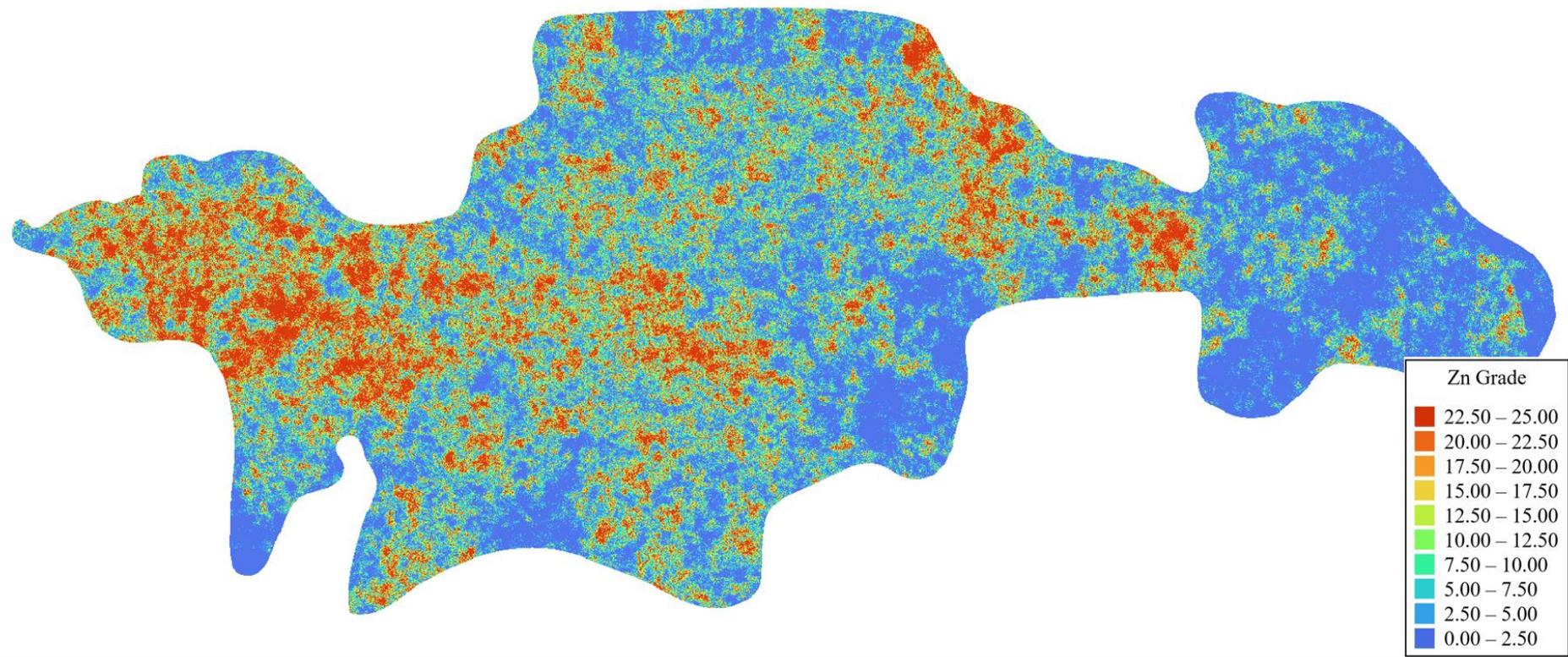


Figura 31: Vista longitudinal de la realización N° 05
Fuente: Elaboración propia

Realización N° 25

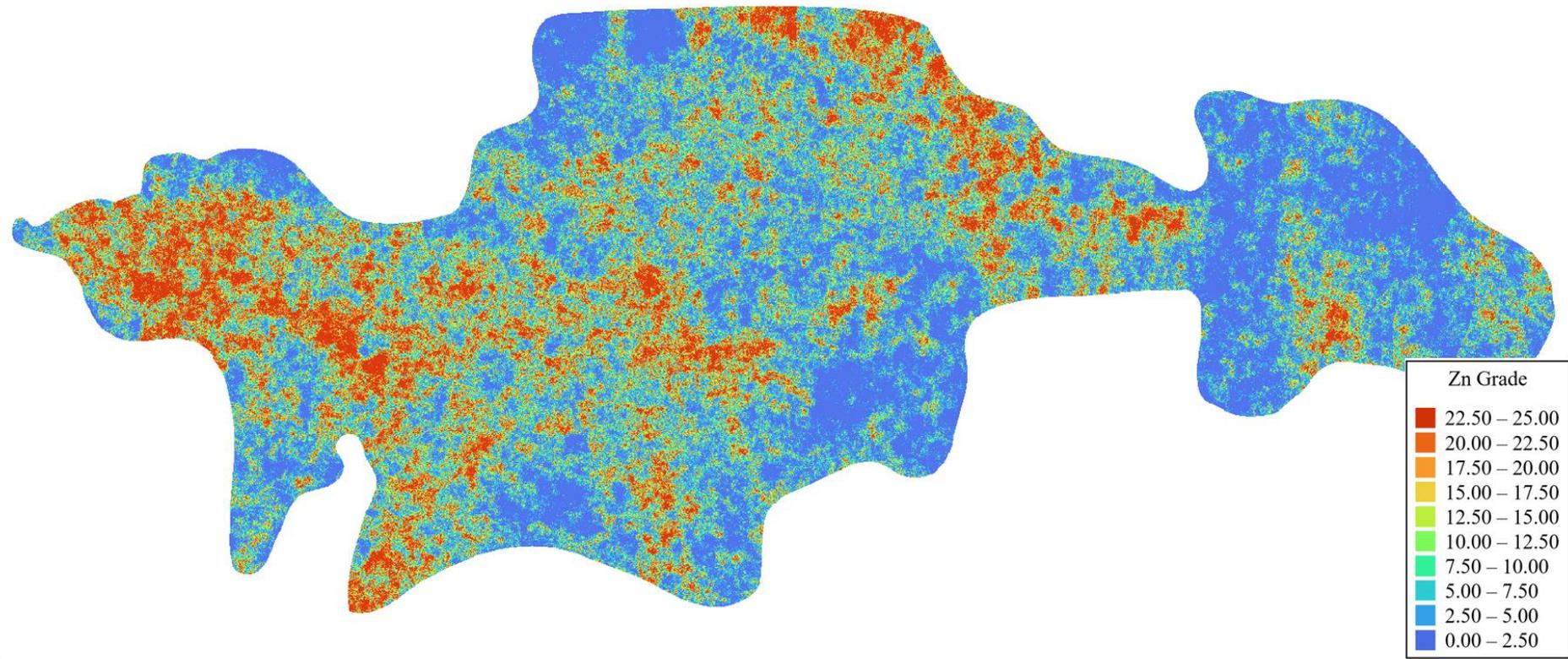


Figura 32: Vista longitudinal de la realización N° 25
Fuente: Elaboración propia

Realización N° 45

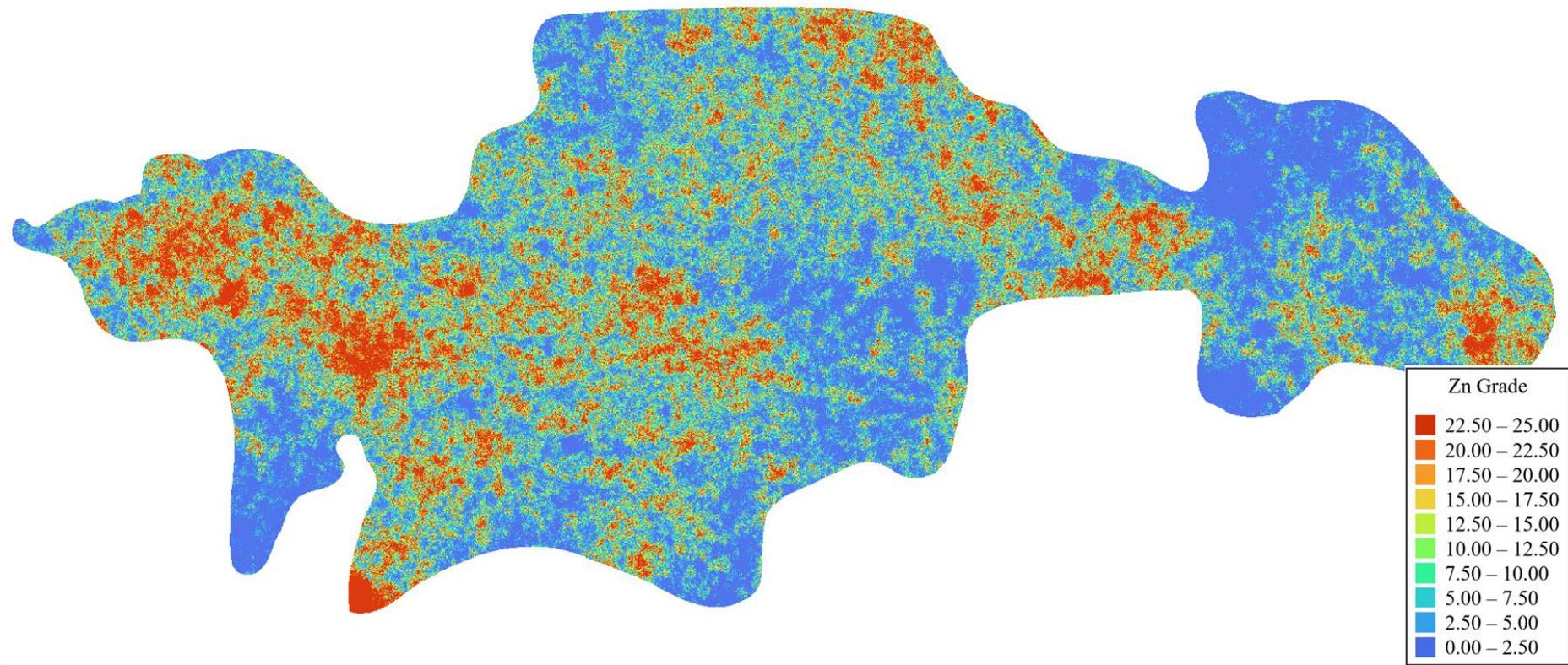


Figura 33: Vista longitudinal de la realización N° 45
Fuente: Elaboración propia

Realización N° 50

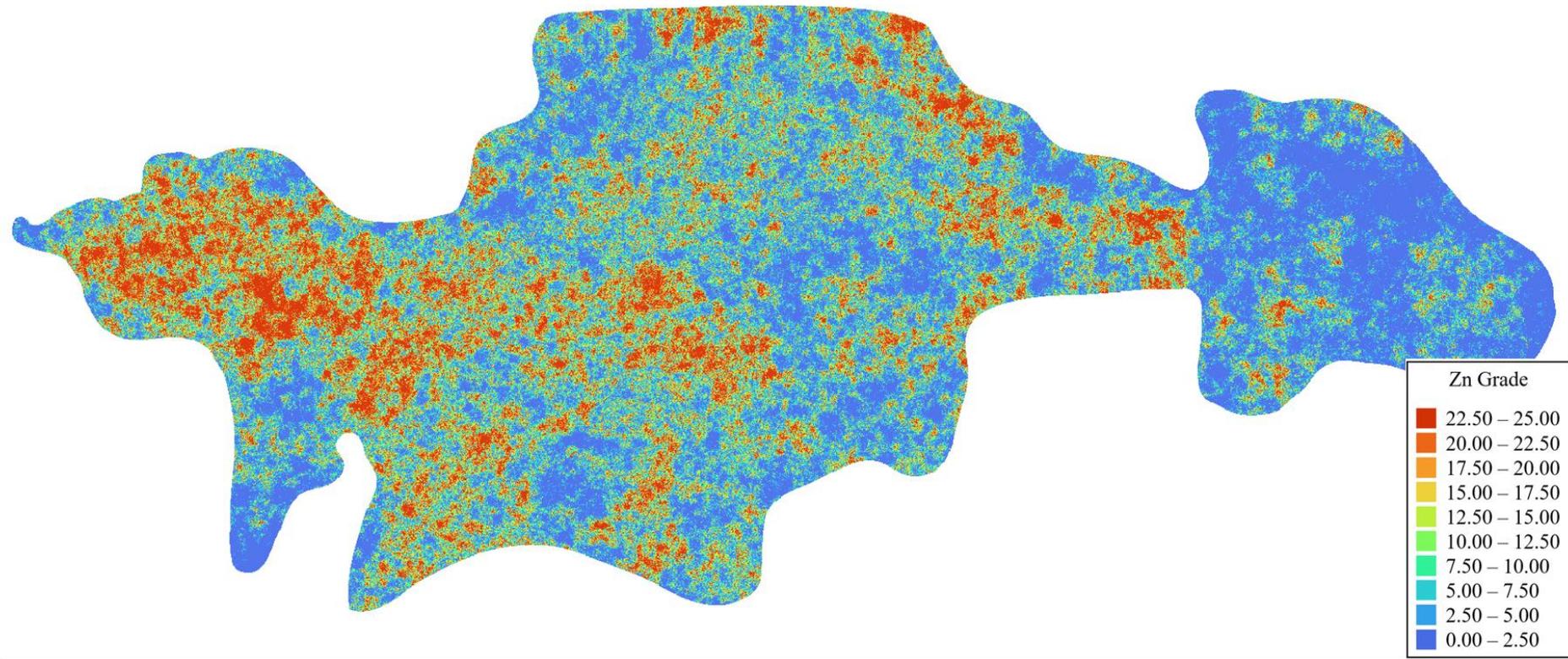


Figura 34: Vista longitudinal de la realización N° 50
Fuente: Elaboración propia

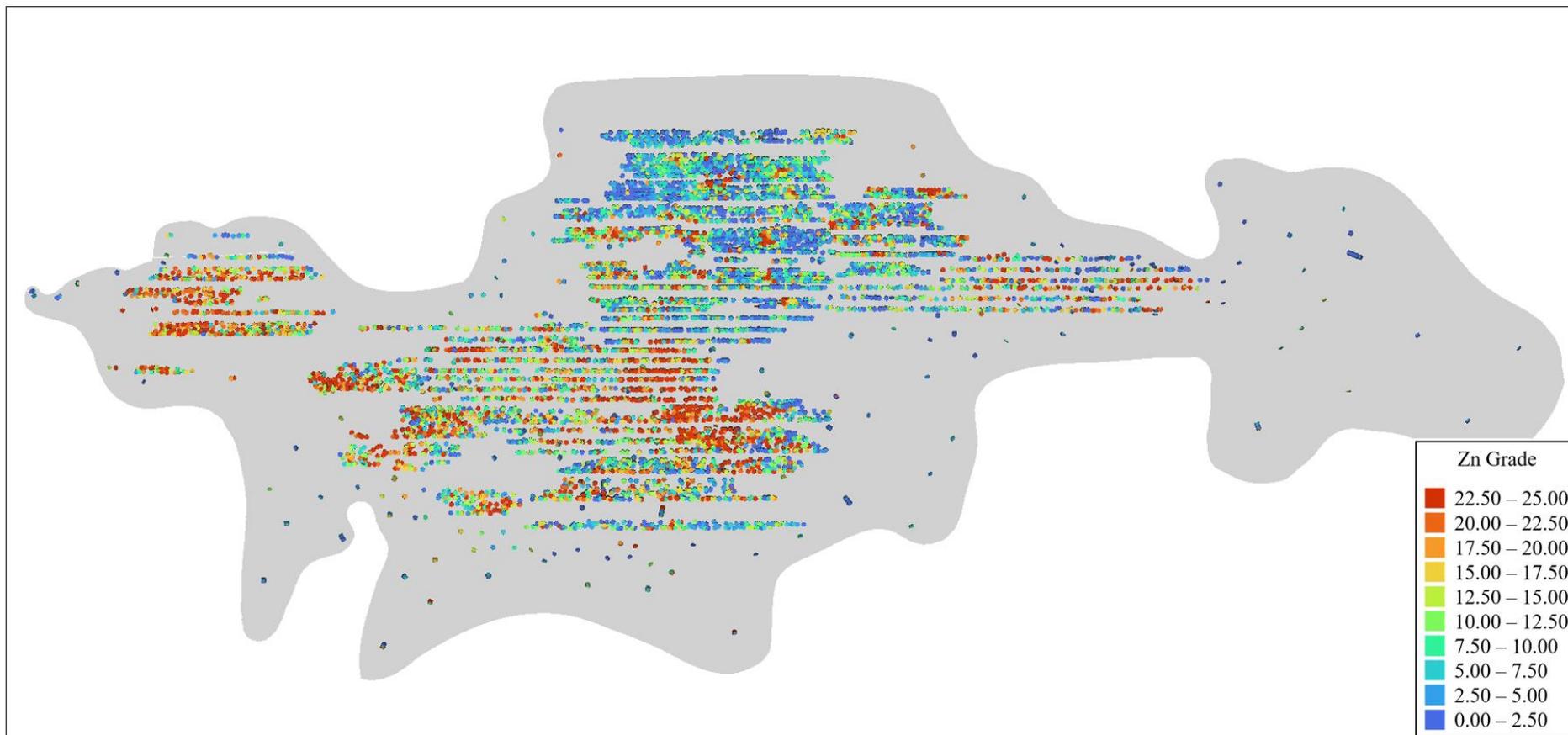


Figura 35: Vista de las muestras condicionantes para las realizaciones
Fuente: Elaboración propia

Se observa que la distribución de la ley de Zn en las realizaciones coincide con la distribución de la ley en las muestras. Es decir, los sectores con mayor ley simulada se corresponden con los sectores donde las muestras presentan mayor ley de Zn y los sectores con menor ley simulada se corresponden con los sectores donde las muestras presentan menor ley de Zn.

5.11 Validación de las realizaciones

5.11.1 Reproducción de la variabilidad espacial de las muestras

Se calculó el variograma de cada realización y se comparó con el variograma de los datos reales sin transformar.

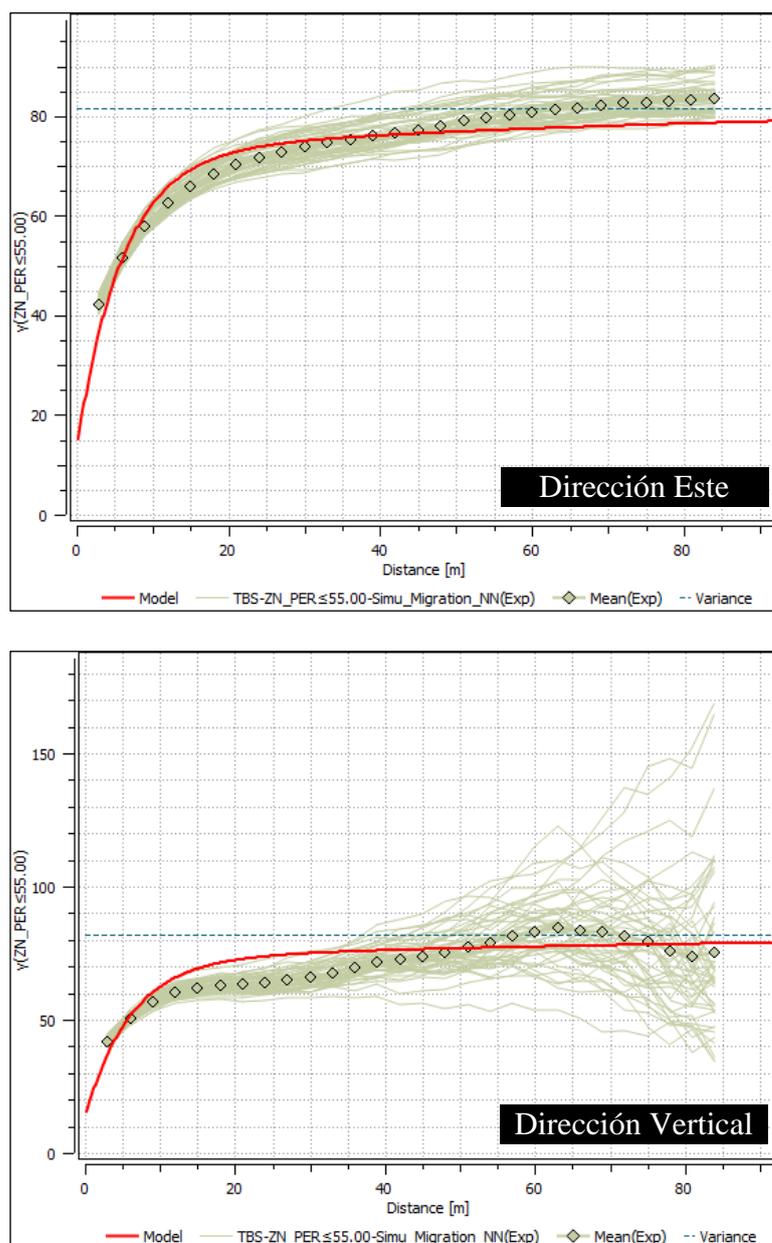


Figura 36: Comparación entre los variogramas de las realizaciones y los datos reales en la dirección este y vertical

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 36 se observa que las realizaciones reproducen adecuadamente la variabilidad espacial de los datos reales (línea roja), con una mayor semejanza en la dirección este - oeste que se corresponde con el azimut de la estructura mineral (N270°).

5.11.2 Reproducción de la distribución de las muestras

Se utilizó un histograma para evaluar la correspondencia entre la distribución de las realizaciones y la distribución de las muestras sin transformar, las cuales se usaron para condicionar las realizaciones.

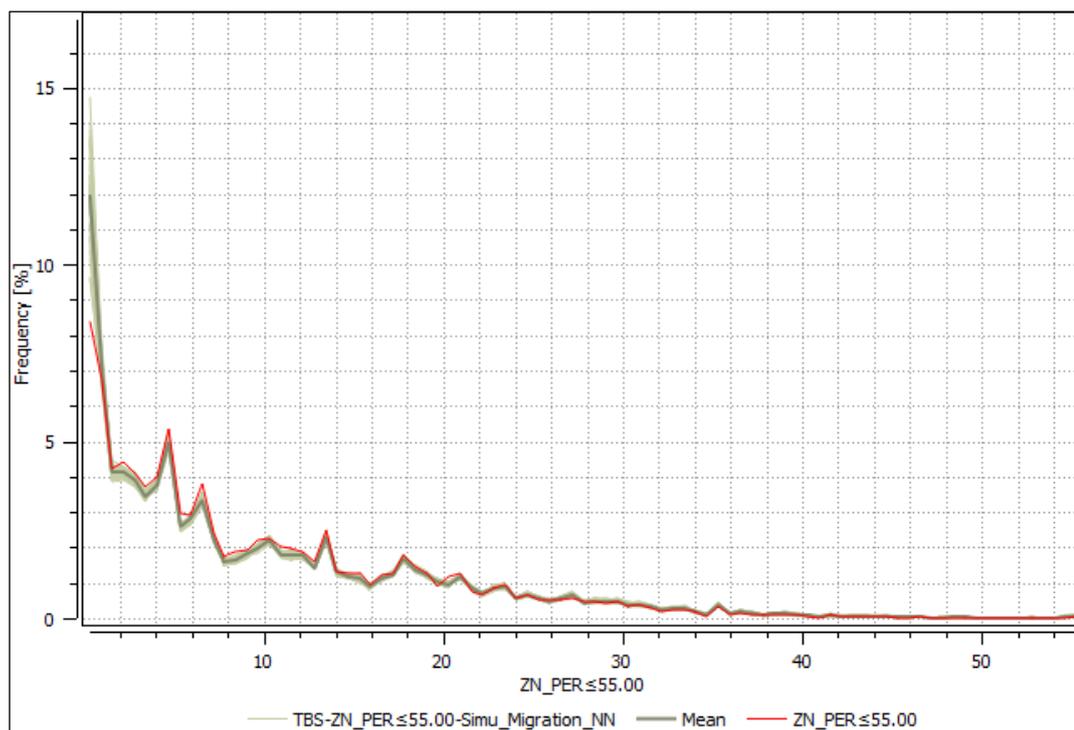


Figura 37: Histograma entre las realizaciones y los datos reales
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 37 se observa que las realizaciones reproducen con gran exactitud la distribución de las leyes en las muestras (línea roja).

5.11.3 Procesamiento de las realizaciones

En la Figura 38 se observa el modelo E-Type que corresponde al promedio de los resultados de las 50 realizaciones para cada uno de los bloques en la grilla. El modelo mostró la misma variabilidad presente en las muestras, diferenciando los sectores de alta y baja ley. Además, se observa la presencia de artefactos cercanos al borde de la estructura, ocasionados por la ausencia de muestras y la extensión del sólido utilizado.

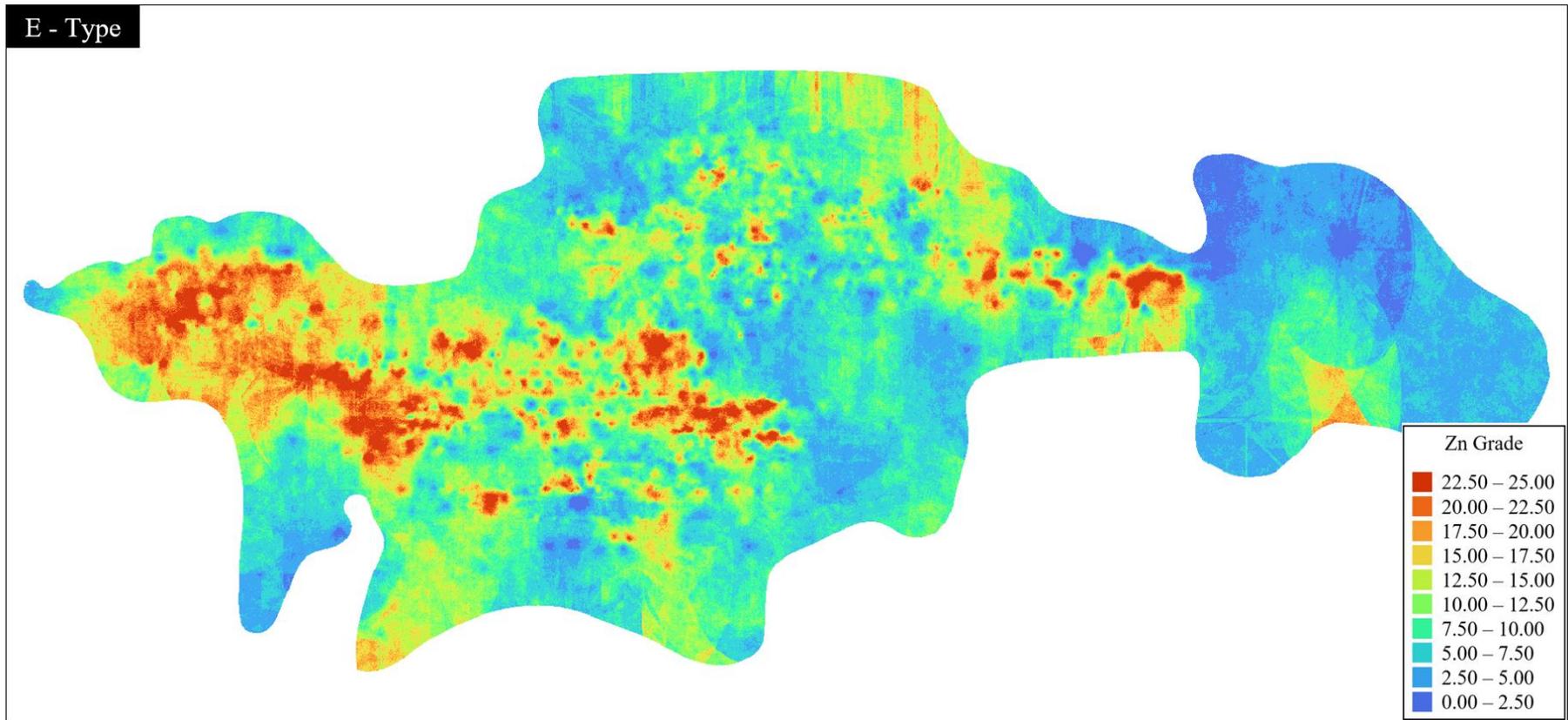


Figura 38: Modelo E-Type de las 50 realizaciones
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 39 se observa el modelo de desviación estándar condicional. Los sectores más oscuros señalan una menor desviación estándar y por lo tanto una menor incertidumbre, y se corresponden con los sectores de mayor densidad de muestras y menores leyes. Los sectores más claros señalan una mayor desviación estándar y se corresponden con los sectores de leyes altas. Este comportamiento era el esperado ya que aquellos sectores con leyes más altas o con baja densidad de muestras tienden a presentar una mayor varianza y por lo tanto una mayor desviación estándar.

Desviación Estándar Condicional

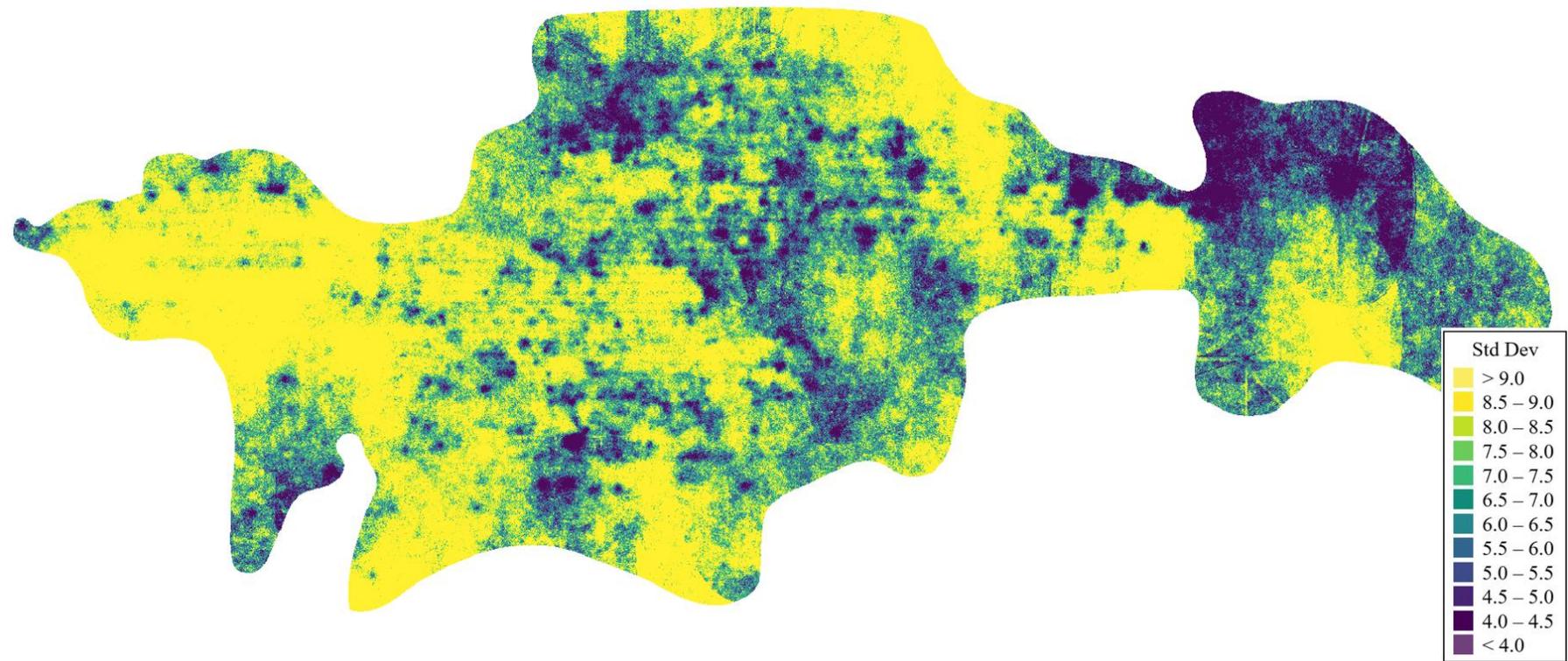


Figura 39: Modelo de desviación estándar condicional de las 50 realizaciones
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 40 se observa la probabilidad de que la ley de cada bloque individual sea superior al 6% de Zn. Este valor de *cutoff* seleccionado corresponde a una aproximación del *cutoff* operativo que utiliza el área de Planeamiento en la unidad minera, sin considerar la dilución o recuperación. Los sectores con una probabilidad mayor que 60% se corresponden con los sectores que presentan altas leyes en las muestras de canales y que pueden encontrarse cercanos a la operación minera, de ahí la importancia de considerar un modelo de probabilidad.

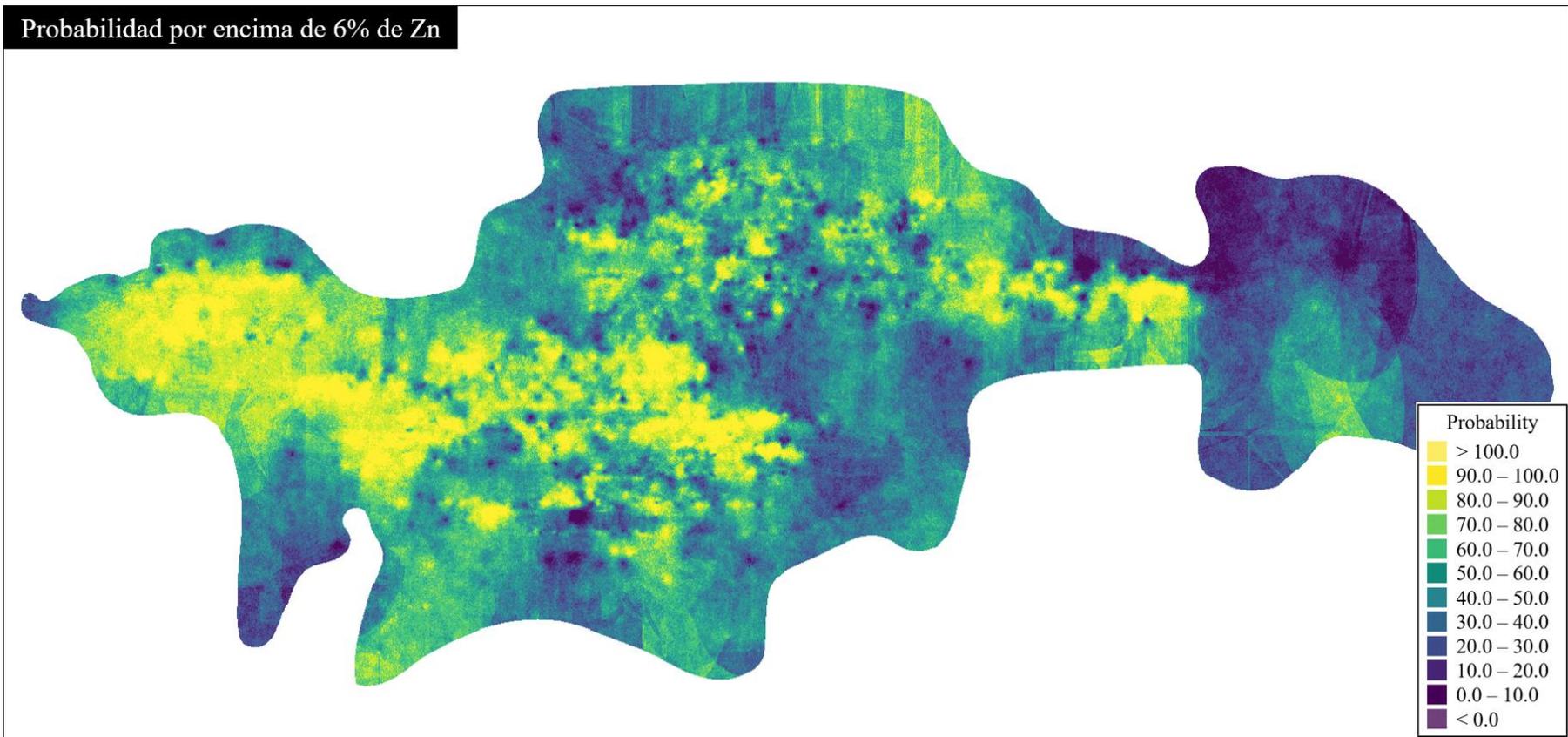


Figura 40: Probabilidad de que la ley del bloque este por encima de 6% de Zn
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 41 se observa el modelo de intervalo de confianza al 90%. A cada bloque de la grilla se le asignó el ancho del intervalo que contiene el valor real en un nivel de confianza establecido de 90%. Es decir, los valores simulados en cada nodo de la grilla se ordenaron de forma creciente para calcular los cuantiles correspondientes, de esa forma el intervalo de confianza se basa en la diferencia de dos cuantiles simétricos.

Un color más rojizo indica un intervalo más ancho y por consiguiente una mayor varianza de los valores obtenidos en cada bloque, lo que refuerza lo observado en la Figura 39 donde aquellos sectores con leyes más altas o con baja densidad de muestras tienden a presentar una mayor varianza y por lo tanto un intervalo de confianza más ancho.

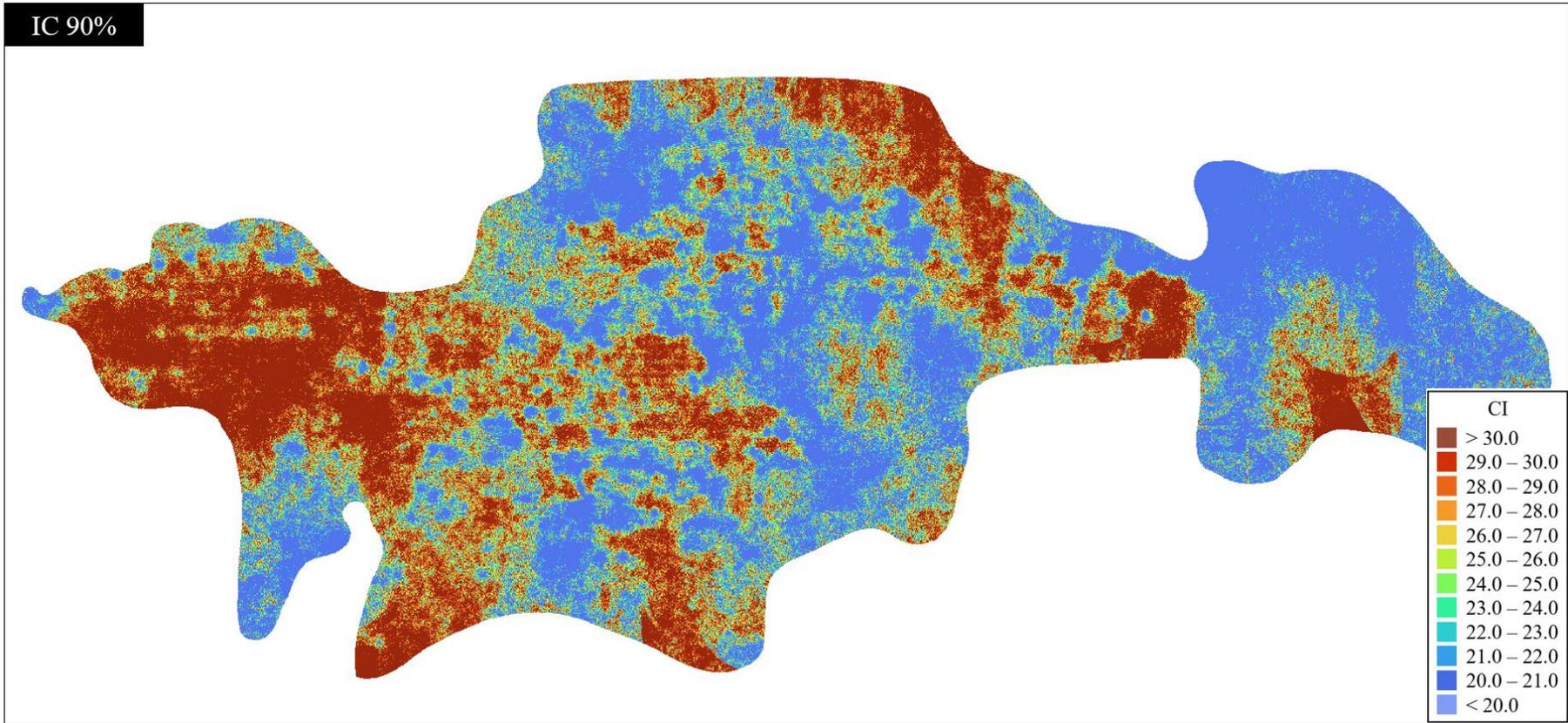


Figura 41: Modelo de intervalo de confianza al 90%
Fuente: Elaboración propia

5.12 Creación de mallas de perforación y asignación de leyes

Utilizando una rutina en el software Datamine, se generaron cinco grillas de puntos equidistantes con separaciones de 10, 20, 40, 60 y 80 metros sobre el sólido de la estructura mineral siguiendo una distribución triangular.

Estos puntos simulan los impactos de sondajes sintéticos a los cuales se les debe asignar un valor de ley a partir de una realización seleccionada de las cincuenta que se generaron con la data real. En la Figura 42 se observa la grilla de puntos equidistantes a 40 metros.

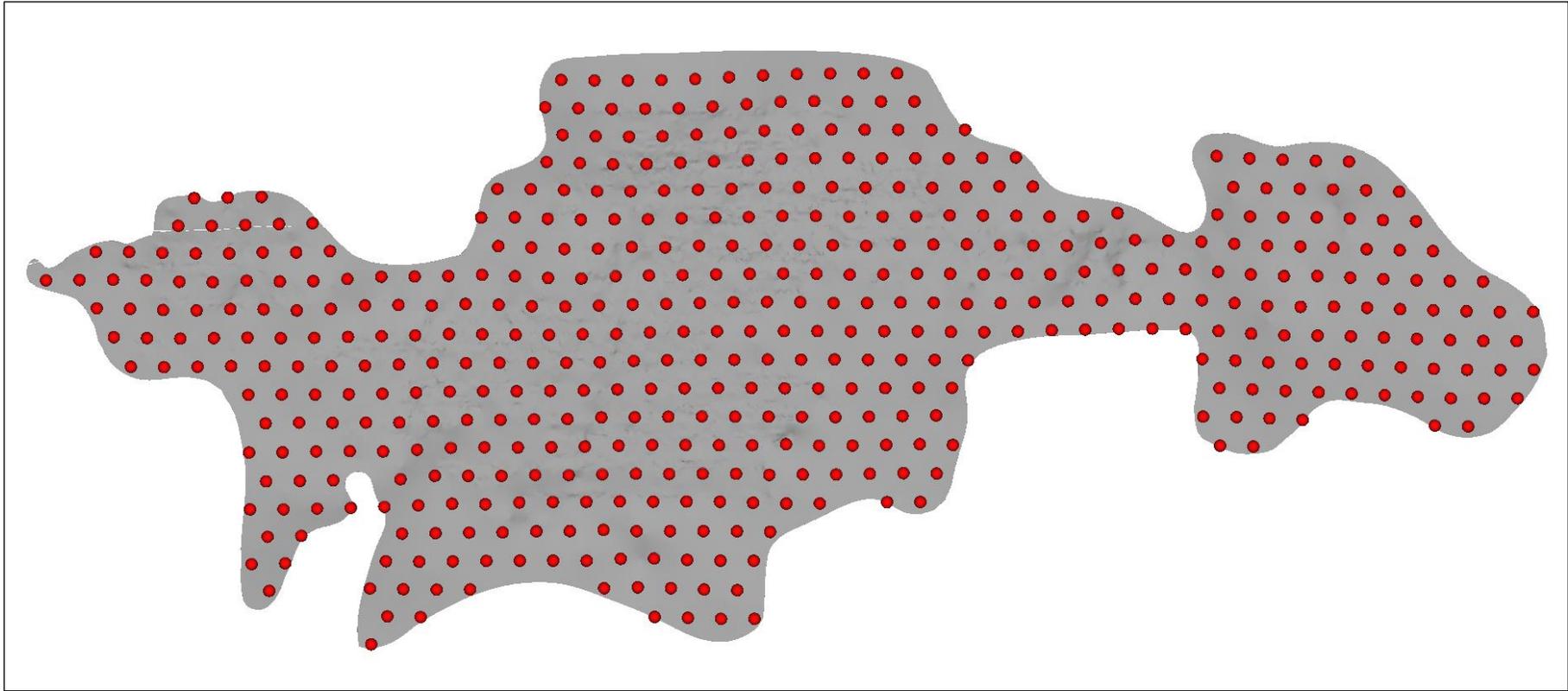


Figura 42: Grilla de puntos equidistantes a 40 metros sobre la estructura mineral
Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso consistió en seleccionar una de las realizaciones como referencia para luego asignar a cada punto de las grillas un valor de ley de Zn. Se utilizó el algoritmo de Isatis Neo denominado *Simulation Reduction* que trata de encontrar las realizaciones más representativas de una simulación, mediante el cálculo de la “disimilitud” entre cada par de realizaciones, un número que representa cuan “diferentes” son. Luego para un subconjunto determinado se calcula una puntuación. Una puntuación más baja implica un subconjunto más representativo.

En el Anexo N° 1 se visualiza una tabla que contiene las 50 primeras posiciones entregadas por el algoritmo *Simulation Reduction*. En base a los resultados, el subconjunto formado por las realizaciones 02, 14 y 46 obtuvo la puntuación más baja y por la tanto es el subconjunto más representativo de las 50 realizaciones.

Además, en la tabla se observa la probabilidad de que cuando se selecciona una realización al azar del total de realizaciones, esta sea muy similar a la realización con la mayor probabilidad dentro del subconjunto. En ese sentido, la realización que fue seleccionada para asignar las leyes a los puntos de las grillas fue la realización N° 46.

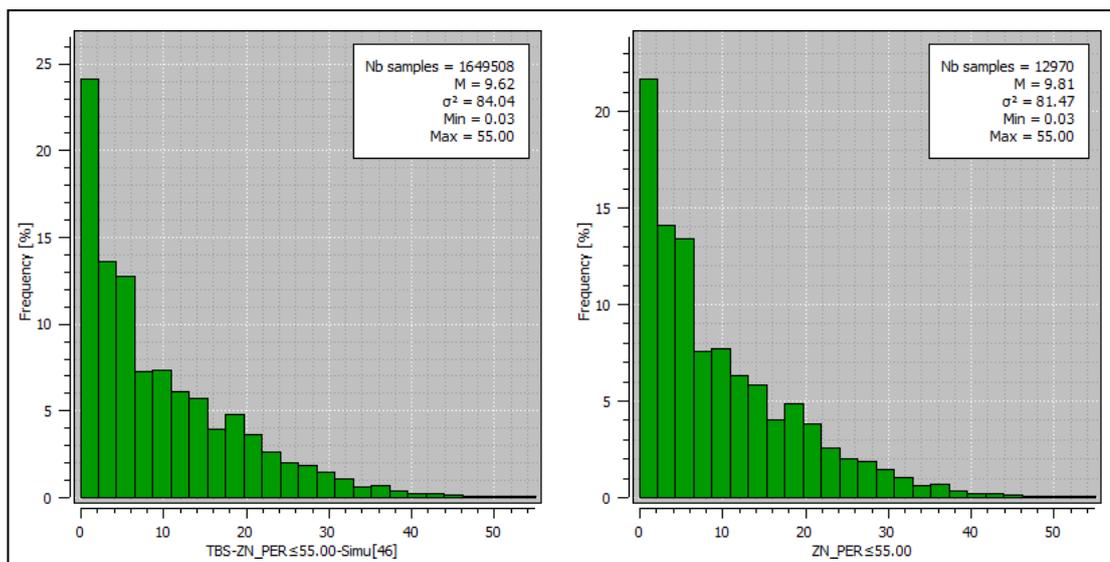


Figura 43: Comparación de la distribución de leyes entre la realización 46 (izquierda) y la data real (derecha)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 43 se observa que la realización seleccionada reproduce adecuadamente la distribución de las leyes de las muestras. Además de presentar un valor de media y varianza muy próxima y respetar el mínimo y máximo de los datos reales.

Finalmente, se asignaron las leyes a cada punto de las grillas a partir de la realización 46, como se observa en la Figura 44.

5.13 Simulación geoestadística utilizando las mallas de perforación

Se realizaron 50 realizaciones con cada una de las grillas utilizando el variograma de los datos reales. En total se obtuvieron 250 realizaciones. En la Figura 45 se observan algunos ejemplos de las realizaciones obtenidas.

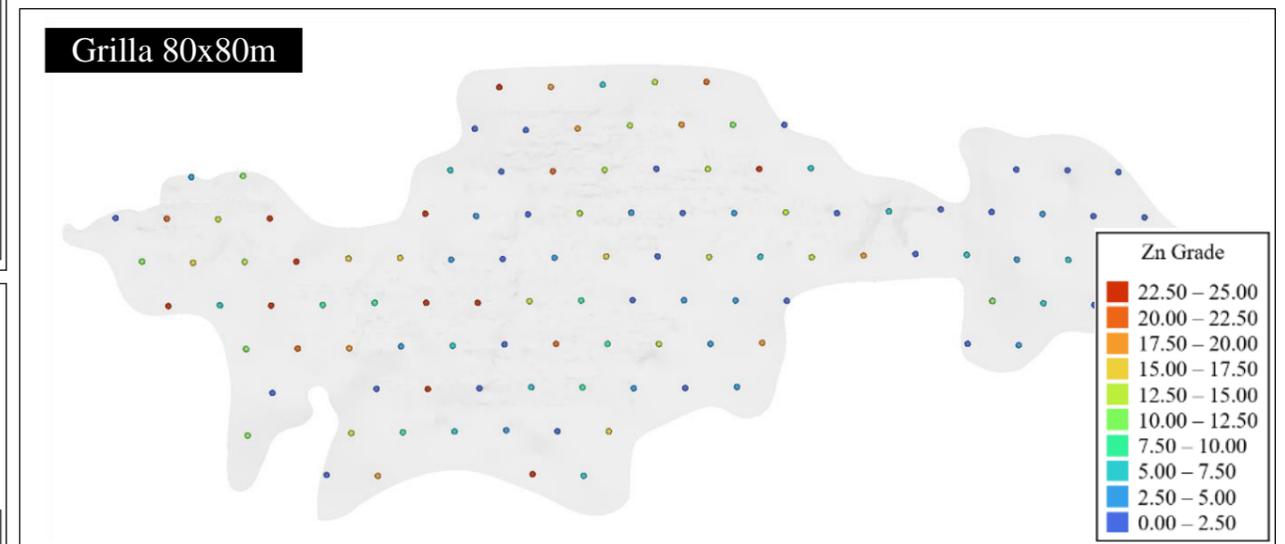
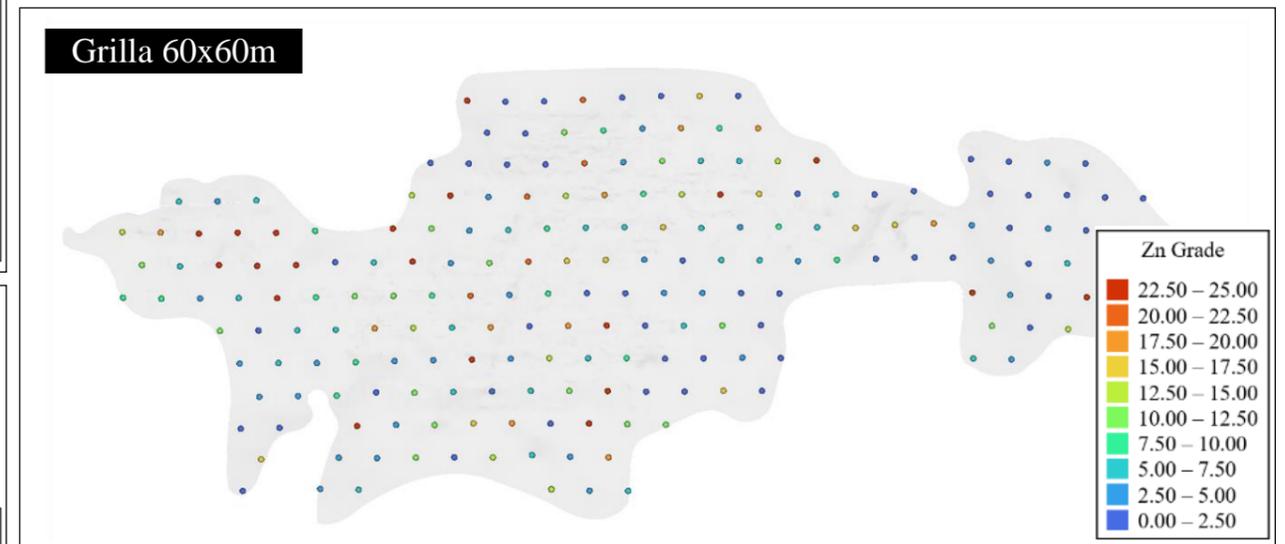
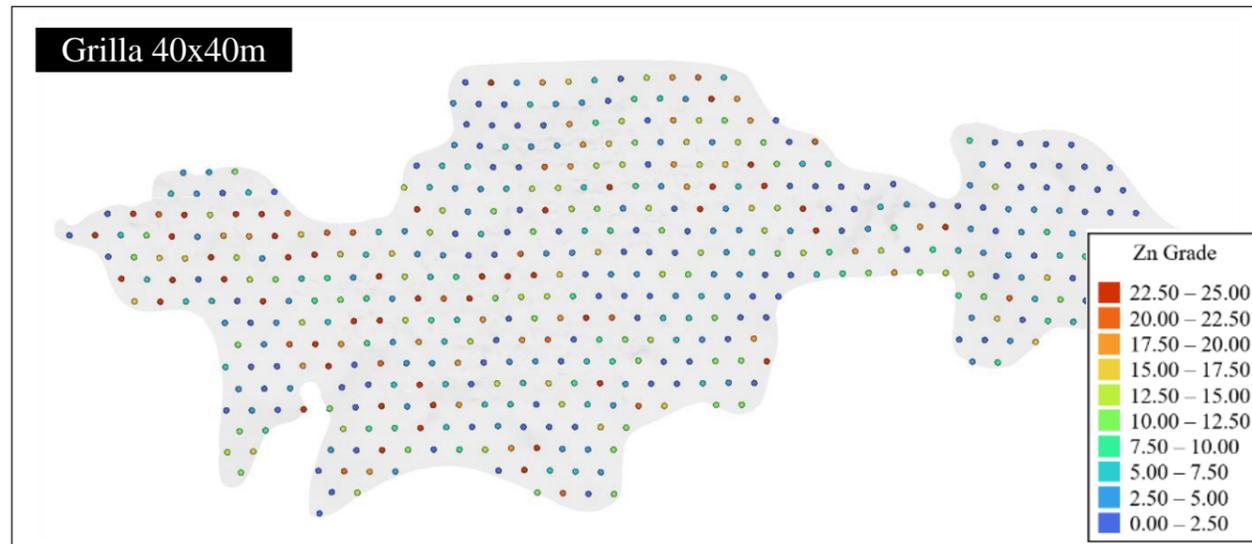
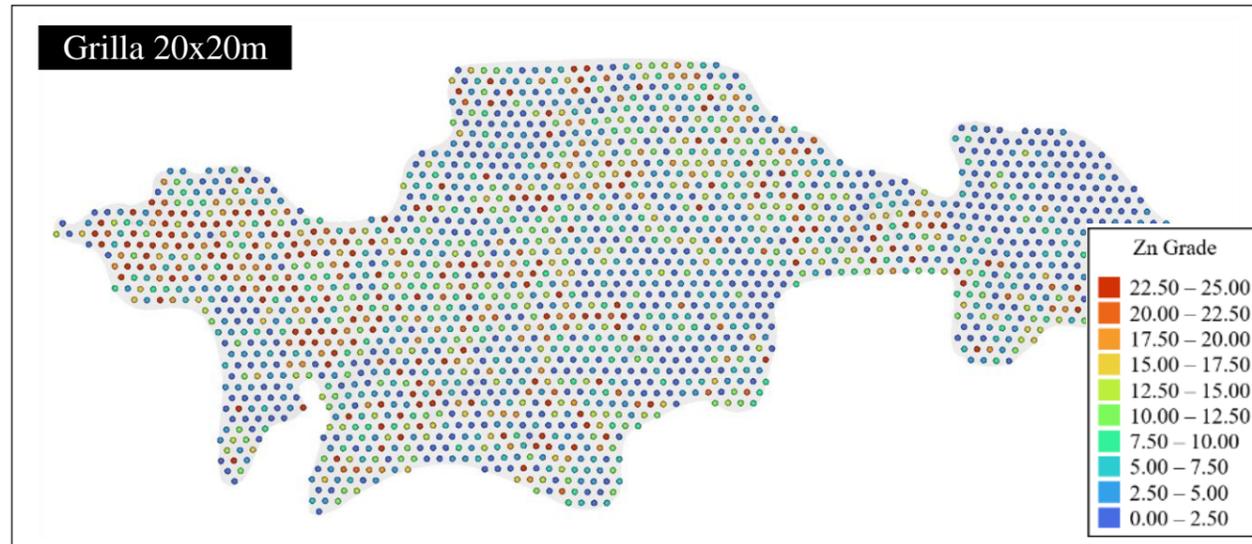
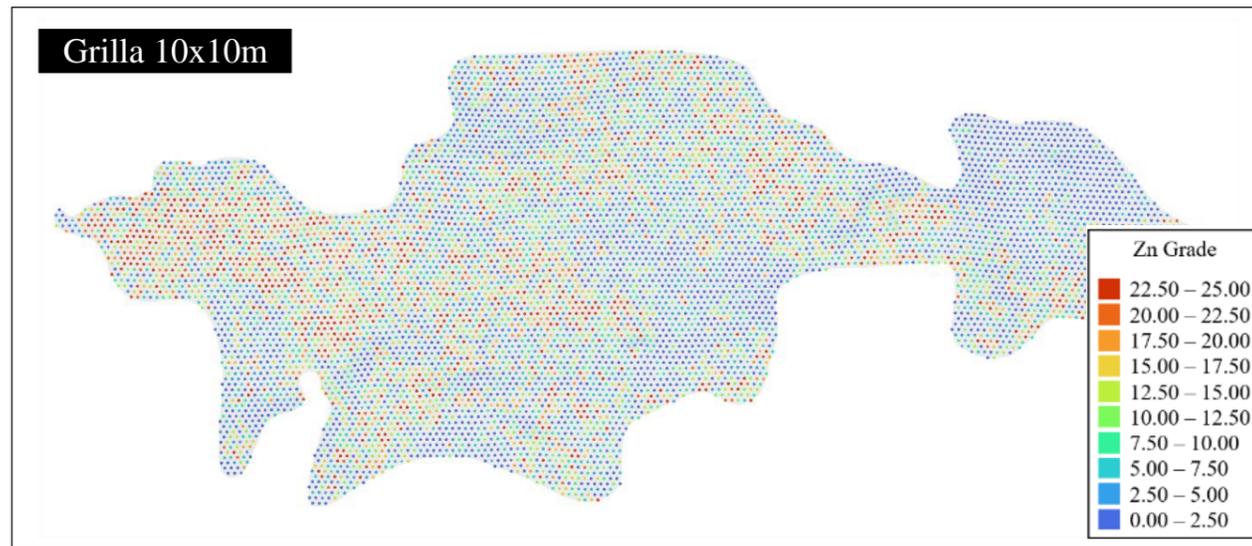


Figura 44: Grillas de puntos con leyes asignadas
Fuente: Elaboración propia

ESPACIAMIENTO ENTRE SONDAJES

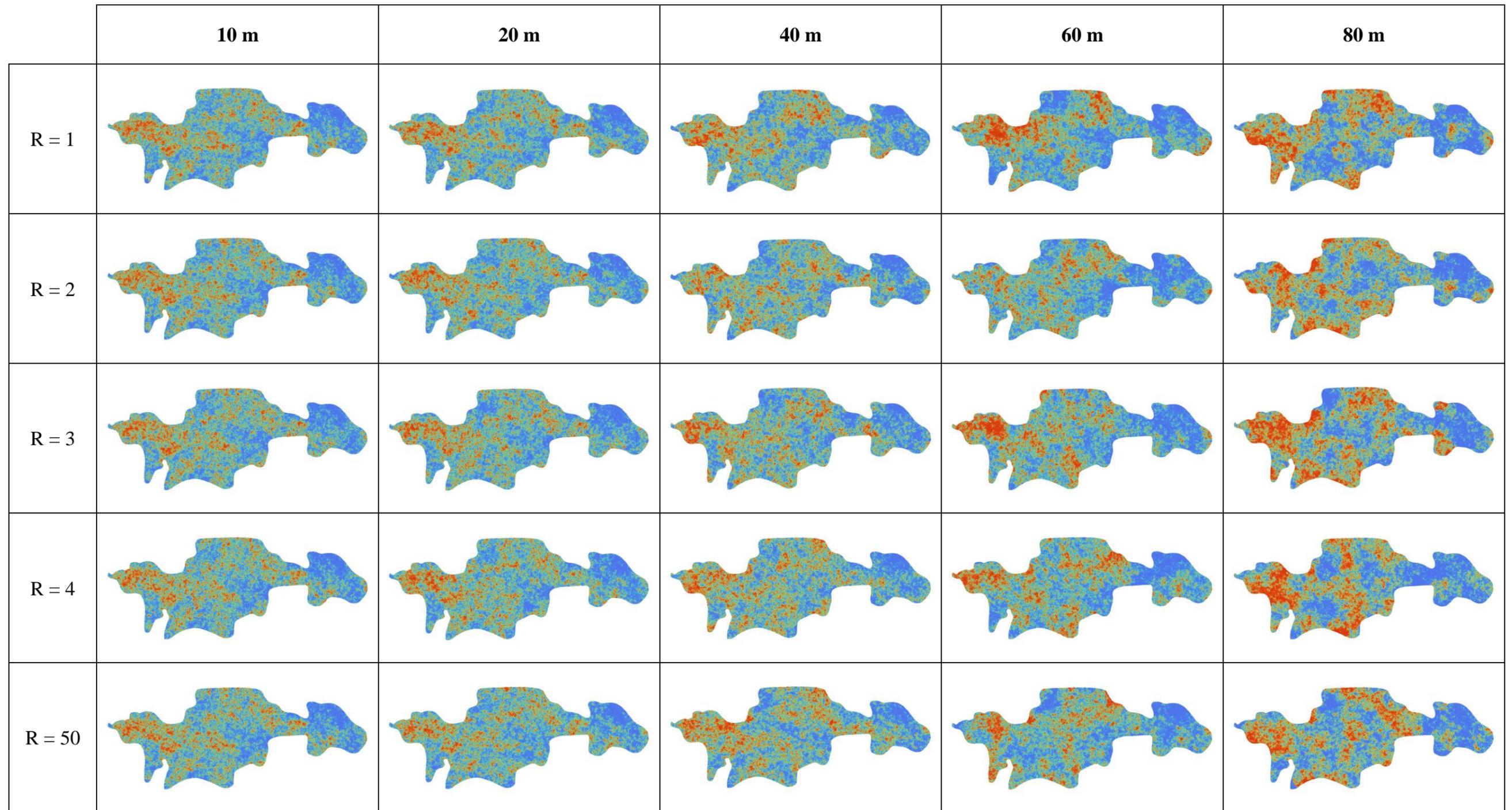


Figura 45: Ejemplos de realizaciones a partir de las grillas de sondajes sintéticos
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VI

ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

6.1 Definición de la unidad de volumen de producción

Se tomó como referencia la evaluación del LoA (Life of Asset) para la veta Ramal Piso 3 Principal, que comprende una producción anual planificada desde el año 2022 al 2027.

Tabla 16: Producción anual planificada desde el año 2022 al 2027

Años	Toneladas
2022	147,436
2023	231,869
2024	315,874
2025	587,218
2026	814,940
2027	293,235
Total	2,390,572

Como se observa en la Tabla 16, la producción anual es variable y tiene un promedio anual aproximado de 400,000 toneladas. Lo cual equivale a una producción mensual de aproximadamente 33,000 toneladas y una producción trimestral de 100,000 toneladas.

Si consideramos un espesor promedio de 2 metros y una densidad promedio de 3.15 g/cm³ para la estructura mineral, se pueden definir las dimensiones de los bloques utilizados en cada volumen de producción, como se muestra a continuación:

- Producción mensual en bloques de 75x75 metros.
- Producción trimestral en bloques de 125x125 metros.
- Producción anual en bloques de 250x250 metros.

Se omitieron los factores de dilución o pérdida para conseguir simplificar el análisis.

6.2 Mapas de probabilidad al 15% de incertidumbre

Los resultados dentro de los modelos con tamaño de celda de 1m x 1m de cada realización fueron migrados a modelos con tamaños de celdas correspondientes a los volúmenes de producción, calculados anteriormente. Luego se realizó el conteo de cuantas realizaciones estaban dentro del intervalo de +/- 15% respecto al valor de la media simulada y se expresó un valor de probabilidad con respecto al total de realizaciones.

Ese valor de probabilidad asociado a cada bloque fue graficado en mapas de probabilidad como se observa en la Figura 46, donde se muestran un total de 15 escenarios. El color con tonalidad verde azulada indica una probabilidad menor al 50% y el color con tonalidad naranja rojiza indica una probabilidad mayor al 50%. Dicha

probabilidad cuantifica la posibilidad de que la ley del bloque se encuentre dentro del intervalo de +/- 15% respecto al valor de la media de las realizaciones.

El resultado que se obtuvo fue el esperado. Un ejemplo representativo es el escenario 15, el cual tiene alta densidad de información debido a que se utilizó una malla de 10m x 10m y un volumen de producción anual. Dicho escenario presentó sectores con una probabilidad superior al 80%. Lo que indica sectores con una baja incertidumbre y que además se corresponden con los sectores de mayor densidad de muestras reales.

Otro escenario importante es el 1, el cual tiene una baja densidad de información debido a que se utilizó una malla de 80m x 80m y un volumen de producción mensual. Dicho escenario mostró una probabilidad menor al 30%. Además, se observó que los sectores ubicados en el borde de la estructura, los cuales no tienen muestras reales, presentaron la probabilidad más baja de los 15 escenarios evaluados.

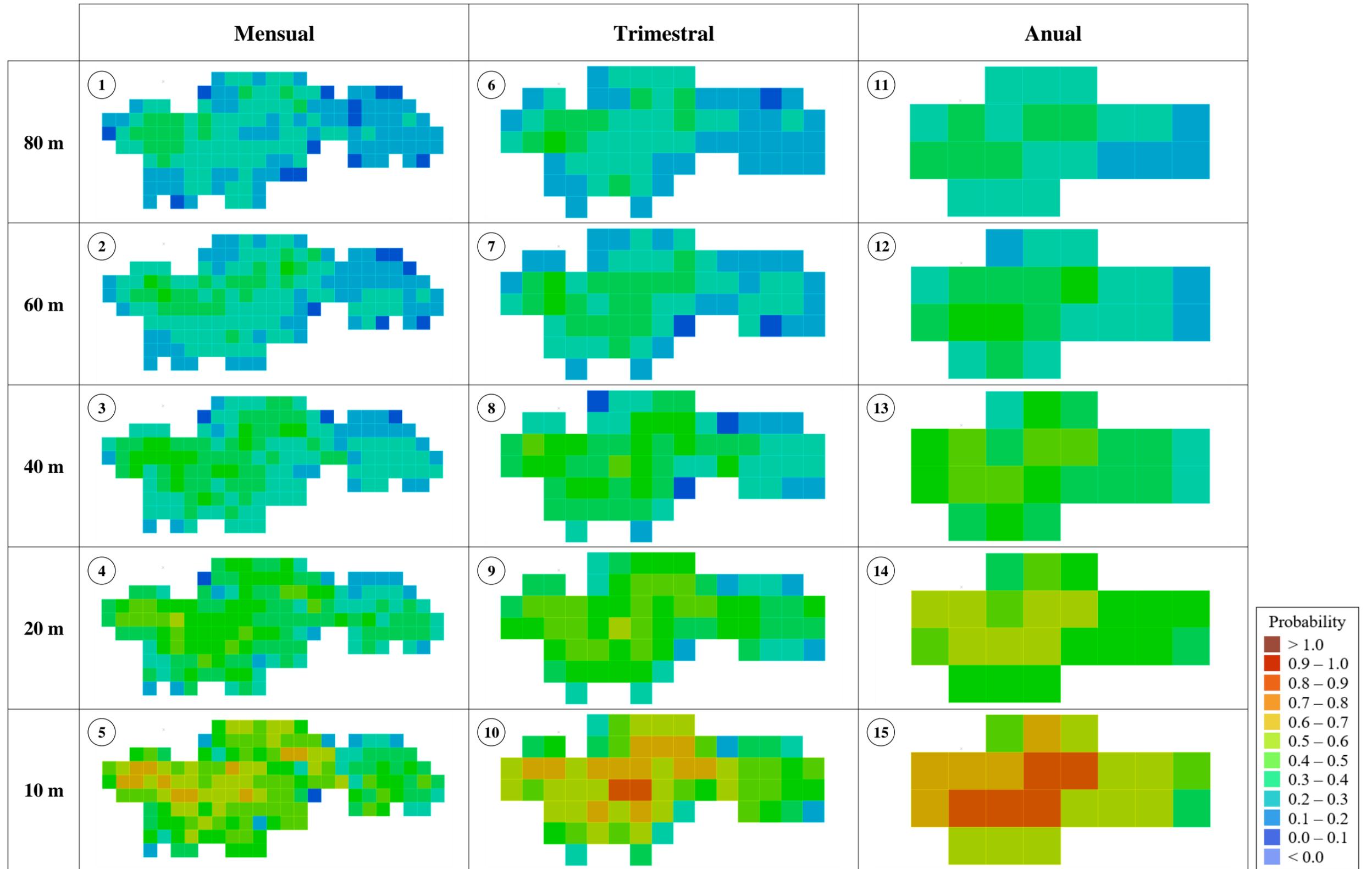


Figura 46: Mapas de probabilidad al 15% de incertidumbre

6.3 Análisis del espaciamiento entre sondajes

Considerando una producción aproximada de 400,000 toneladas por año se calculó el tonelaje para una producción trimestral, mensual y semanal.

Luego, se utilizó un script en Python para calcular la incertidumbre asociada a cada una de las mallas de perforación a partir de las realizaciones en las grillas de 1m x 1m x 1m que se generaron previamente.

Como resultado se obtuvo una gráfica que relaciona las distintas mallas de perforación analizadas, en el eje de las abscisas, con la incertidumbre presente a diferentes volúmenes de producción, en el eje de las ordenadas. Como se observa en la Figura 47.

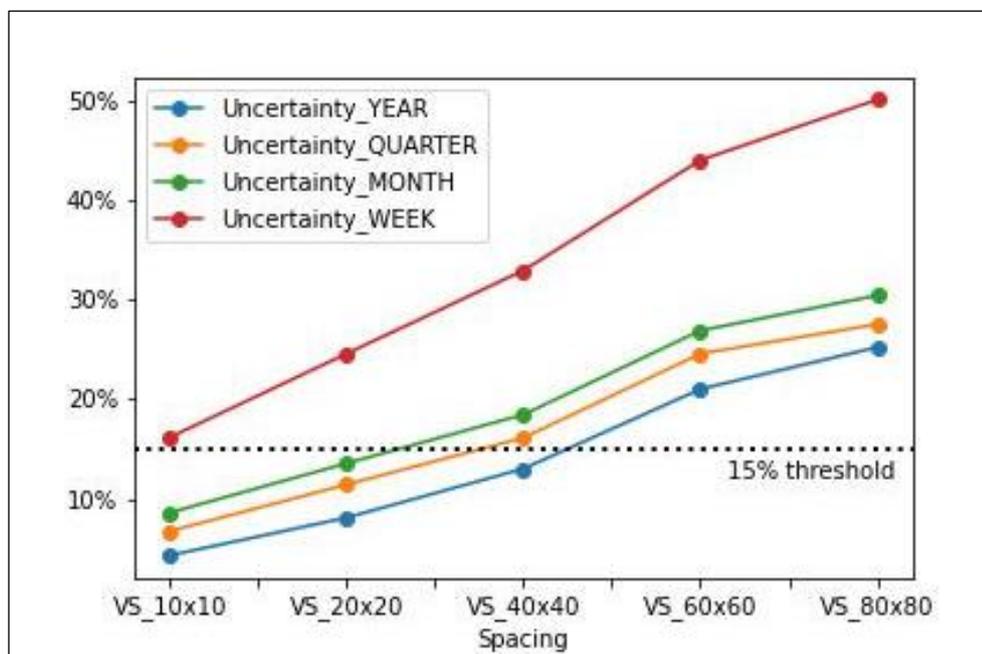


Figura 47: Incertidumbre asociada a las mallas de perforación a diferentes volúmenes de producción

*Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 1 se detallan las condiciones que se deben cumplir para categorizar consistentemente los recursos minerales. Bajo ese enfoque un recurso se categoriza como medido si presenta una incertidumbre menor al 15% para un volumen de producción mensual o trimestral; y un recurso se categoriza como indicado si presenta una incertidumbre menor al 15% para un volumen de producción anual. Debido a eso, en la gráfica obtenida se ha señalado con una línea discontinua negra el valor de 15% de incertidumbre como valor de *threshold*.

Teniendo en cuenta el valor de *threshold*, para categorizar un recurso como medido se debe utilizar una malla de perforación con una separación de entre 20 y 25 metros considerando un volumen de producción mensual, o hasta una separación de 30 metros si se considerada un volumen de producción trimestral.

En el caso del recurso categorizado como indicado, se debe considerar una separación de entre 40 y 45 metros considerando un volumen de producción anual.

En el caso del recurso categorizado como inferido, este puede categorizarse bajo el supuesto de que el mineral se encuentra dentro del sólido de frente de mena y por consiguiente presenta un cierto grado de certeza, no cuantificable, sustentado bajo un conocimiento geológico de la estructura mineral.

En la mina Animon, el recurso mineral se categoriza ejecutando una malla triangular de perforación con una separación de 25 metros (medido), 50 metros (indicado) y 100 metros (inferido).

CONCLUSIONES

1. La distancia óptima entre sondajes es menor a 50 metros, por lo tanto, la hipótesis se rechaza.
2. A partir de los resultados obtenidos, se recomienda una separación entre sondajes de 20 a 25 metros para categorizar recursos medidos, y de 40 metros para categorizar recursos indicados en la veta Ramal Piso 3 Principal.
3. Se debe considerar la alta incertidumbre que se presentó a una escala de producción semanal. Dicha incertidumbre continuó superando el valor de *threshold* a pesar de que se consideró una separación de 10 metros en la malla de sondajes.
4. Una malla de perforación con una separación mayor o igual a 50 metros presentó una incertidumbre superior al límite de aceptación sin importar el volumen de producción considerado.
5. Una malla de perforación con una separación menor o igual a 20 metros presentó una incertidumbre inferior al límite de aceptación para los volúmenes de producción mensual, trimestral y anual.
6. Las distancias utilizadas para categorizar recursos en la mina Animon son muy próximas a las distancias obtenidas del análisis de espaciamiento entre sondajes, por lo cual se espera un buen resultado durante el cálculo de las reconciliaciones.
7. La evaluación de la distribución de la probabilidad en las secciones longitudinales permitió determinar cuáles sectores presentan una alta y baja incertidumbre.

8. Los sectores con baja densidad de información presentaron una alta variabilidad durante las realizaciones debido a que la información fue insuficiente para realizar un correcto proceso de condicionamiento.
9. En los sectores con una adecuada densidad de información pero que presentaron leyes de Zn muy altas, se obtuvo un intervalo de confianza grande.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar estudios de espaciamiento entre sondajes para diferentes estructuras representativas, con el objetivo de comprender la incertidumbre de las leyes en todo el yacimiento y de esa forma mejorar las estrategias de perforación.
2. Se recomienda utilizar entre 500 y 700 bandas durante el proceso de simulación condicional con el algoritmo de bandas rotantes. El cual demostró ser más eficiente al momento de generar las realizaciones en comparación con la simulación condicional Gaussiana.
3. En futuros trabajos, se recomienda evaluar la correlación entre diferentes variables geológicas haciendo uso de técnicas de modelamiento multivariado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alperin, M. (2013). *Introducción al análisis estadístico de datos geológicos*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- Artica, C., & Fowler, A. (02 de Diciembre de 2021). *Mining Plus*. Obtenido de <https://www.mining-plus.com/post/drillhole-spacing-studies>
- Australasian Joint Ore Reserves Committee. (2012). *The JORC Code* (2012 ed.). Australia.
- Cortez, L. A. (2015). *Modelo de Sustitución para la Simulación Condicional de Leyes*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Diaz Viera, M. (2002). *Geoestadística Aplicada*. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Emery, X. (2013). *Geoestadística*. Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas, Univ. de Chile.
- Emery, X., & Séguret, S. (2020). *Geoestadística de Yacimientos de Cobre Chilenos*. España: Penguin Random House.
- Godoy, M. (2009). Estimación de Recursos. *Seminario "Competencias en Recursos y Reservas Mineras"* (pág. 43). Golder Associates.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford University Press.
- Letelier Maturana, I. B. (2012). *Impacto de la Incertidumbre del Modelo Geológico en un Proyecto Minero*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Machuca Mory, D., & Deutsch, C. (2006). A Program for Robust Calculation of Drillhole Spacing in Three Dimensions. *Centre for Computational Geostatistic (CCG)*, 18.

Montoro Cazorla, D. (2008). Variable Aleatoria. En *Métodos Estadísticos en la Ingeniería* (pág. 13).

Nowak, M., & Leuangthong, O. (2019). Optimal drill hole spacing for resource classification. En C. Mueller, W. Assibey-Bonsu, E. Baafi, C. Dauber, C. Doran, M. Jerzy Jaszczuk, & O. Nagovitsyn, *Mining Goes Digital* (pág. 780). Londres: Taylor & Francis Group.

Oliver, M., & Webster, R. (2015). *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. Springer.

ANEXOS

Anexo N° 1: Puntuaciones obtenidas para cada subconjunto de realizaciones utilizando el algoritmo "Simulation Reduction" en Isatis Neo.

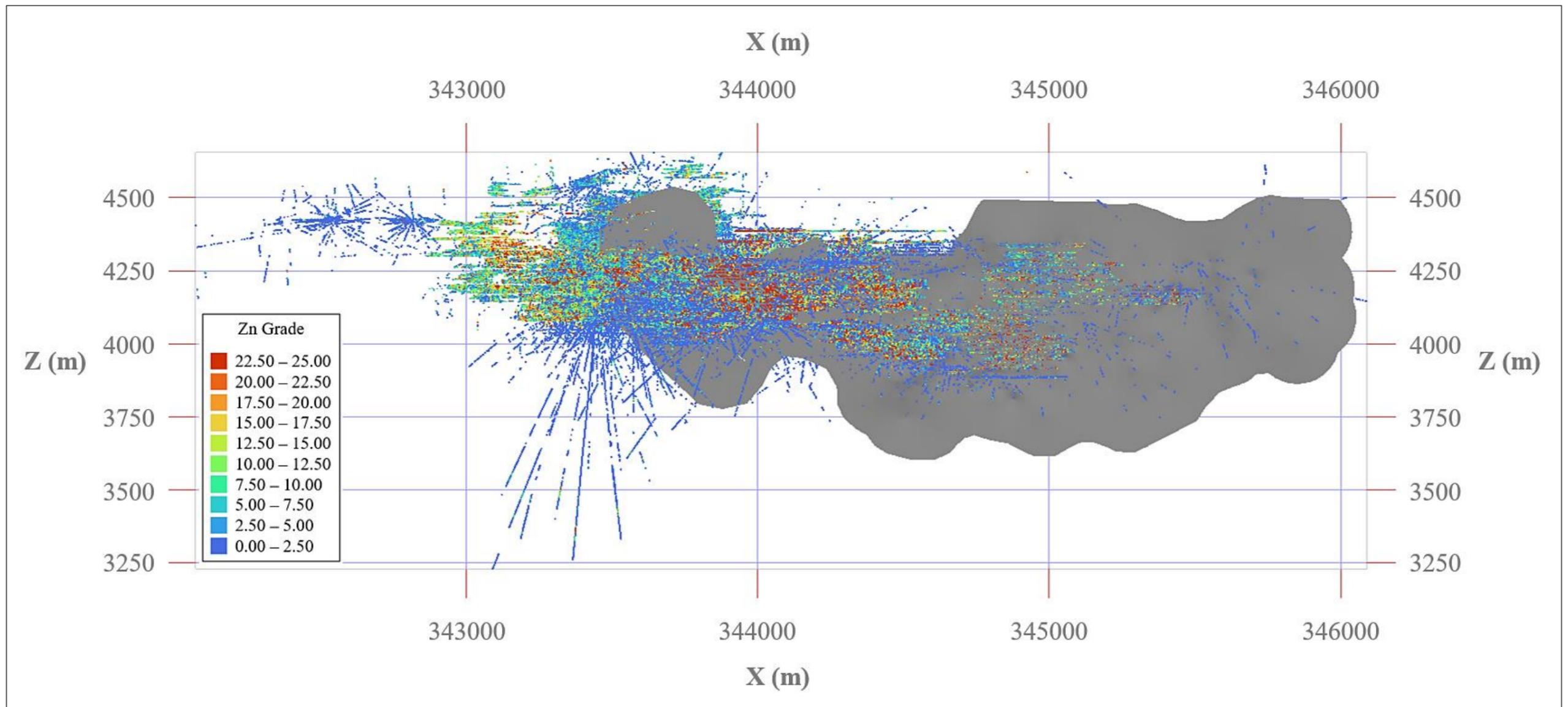
Posición	Puntuación	Realizaciones	Probabilidades
1	0.7510	2, 14, 46	22.00 %, 30.00 %, 48.00 %
2	0.7511	14, 19, 46	22.00 %, 38.00 %, 40.00 %
3	0.7512	10, 19, 46	32.00 %, 30.00 %, 38.00 %
4	0.7513	19, 27, 46	40.00 %, 18.00 %, 42.00 %
5	0.7517	19, 24, 46	36.00 %, 22.00 %, 42.00 %
6	0.7518	6, 19, 46	8.00 %, 40.00 %, 52.00 %
7	0.7519	19, 41, 46	38.00 %, 14.00 %, 48.00 %
8	0.7519	11, 19, 46	26.00 %, 32.00 %, 42.00 %
9	0.7521	2, 19, 46	16.00 %, 32.00 %, 52.00 %
10	0.7522	15, 19, 46	24.00 %, 34.00 %, 42.00 %
11	0.7522	19, 40, 46	32.00 %, 22.00 %, 46.00 %
12	0.7523	2, 10, 46	20.00 %, 38.00 %, 42.00 %
13	0.7523	10, 19, 41	42.00 %, 42.00 %, 16.00 %
14	0.7524	11, 14, 46	26.00 %, 30.00 %, 44.00 %
15	0.7524	3, 10, 19	22.00 %, 42.00 %, 36.00 %
16	0.7525	19, 37, 46	42.00 %, 6.00 %, 52.00 %
17	0.7525	10, 19, 40	36.00 %, 38.00 %, 26.00 %
18	0.7525	17, 19, 46	4.00 %, 42.00 %, 54.00 %
19	0.7526	14, 19, 41	32.00 %, 50.00 %, 18.00 %
20	0.7526	10, 11, 46	40.00 %, 26.00 %, 34.00 %
21	0.7526	3, 14, 19	26.00 %, 32.00 %, 42.00 %
22	0.7526	10, 41, 46	44.00 %, 16.00 %, 40.00 %
23	0.7527	7, 19, 46	6.00 %, 42.00 %, 52.00 %
24	0.7527	10, 40, 46	38.00 %, 24.00 %, 38.00 %
25	0.7528	19, 34, 46	40.00 %, 8.00 %, 52.00 %
26	0.7528	6, 10, 46	8.00 %, 46.00 %, 46.00 %
27	0.7528	14, 22, 46	30.00 %, 18.00 %, 52.00 %
28	0.7528	3, 19, 46	16.00 %, 38.00 %, 46.00 %

29	0.7528	8, 19, 46	20.00 %, 36.00 %, 44.00 %
30	0.7528	10, 22, 46	34.00 %, 18.00 %, 48.00 %
31	0.7528	2, 10, 19	18.00 %, 42.00 %, 40.00 %
32	0.7528	2, 27, 46	24.00 %, 22.00 %, 54.00 %
33	0.7530	12, 19, 46	16.00 %, 34.00 %, 50.00 %
34	0.7530	3, 14, 46	24.00 %, 34.00 %, 42.00 %
35	0.7530	10, 11, 40	44.00 %, 24.00 %, 32.00 %
36	0.7530	19, 36, 46	34.00 %, 30.00 %, 36.00 %
37	0.7531	16, 19, 46	4.00 %, 42.00 %, 54.00 %
38	0.7531	19, 46, 48	42.00 %, 52.00 %, 6.00 %
39	0.7531	2, 15, 46	22.00 %, 32.00 %, 46.00 %
40	0.7531	12, 14, 46	26.00 %, 28.00 %, 46.00 %
41	0.7532	15, 40, 46	32.00 %, 30.00 %, 38.00 %
42	0.7532	19, 33, 46	42.00 %, 4.00 %, 54.00 %
43	0.7532	19, 35, 46	30.00 %, 22.00 %, 48.00 %
44	0.7532	19, 28, 46	42.00 %, 8.00 %, 50.00 %
45	0.7532	10, 40, 41	50.00 %, 32.00 %, 18.00 %
46	0.7532	3, 10, 46	18.00 %, 44.00 %, 38.00 %
47	0.7532	10, 27, 46	44.00 %, 12.00 %, 44.00 %
48	0.7533	10, 14, 46	30.00 %, 28.00 %, 42.00 %
49	0.7533	2, 14, 19	22.00 %, 32.00 %, 46.00 %
50	0.7533	19, 20, 46	42.00 %, 6.00 %, 52.00 %

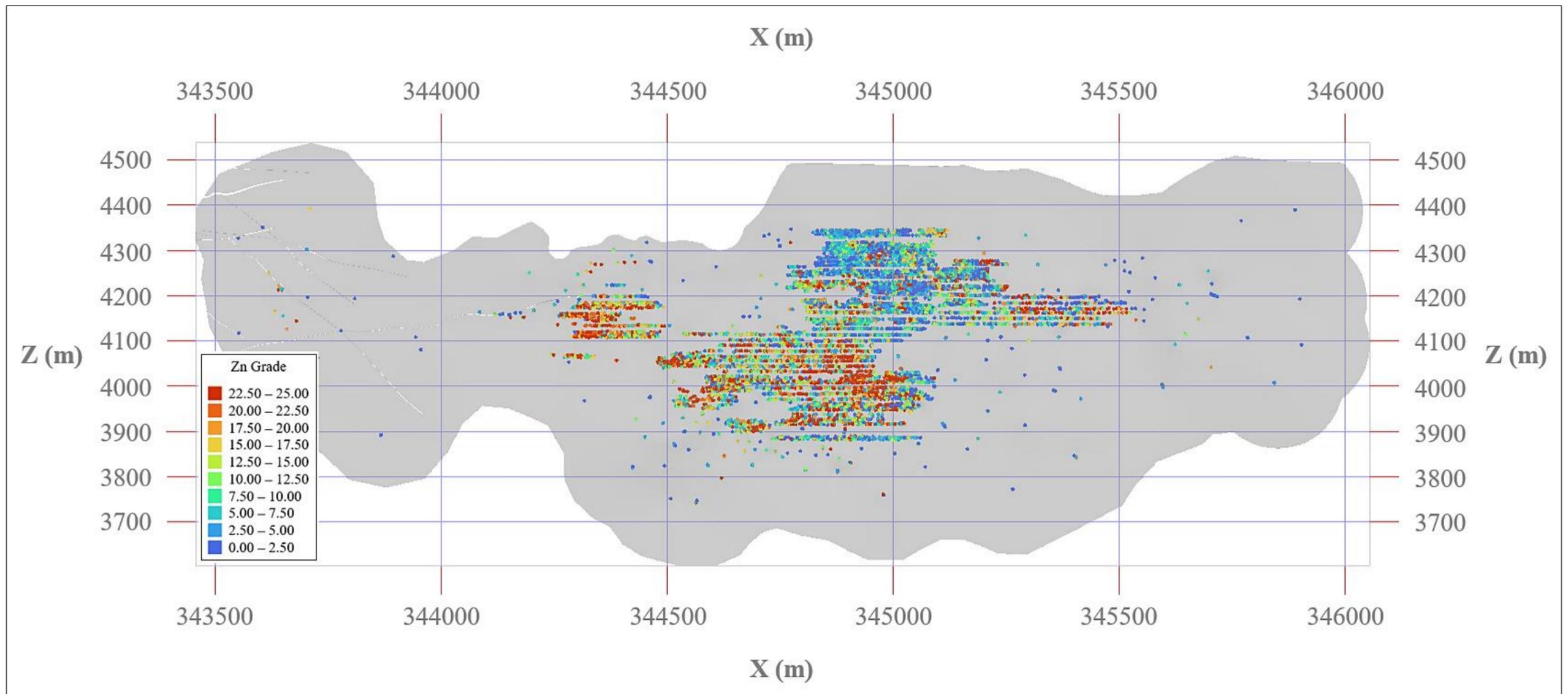
Anexo N° 2: Medidas estadísticas de las 50 realizaciones generadas a partir de los datos reales.

Realización	Media	Varianza	Desviación Estándar	Coef. de Variación	Mínimo	Máximo
1	9.75	89.97	9.49	0.9733	0.03	55
2	9.48	87.40	9.35	0.9867	0.03	55
3	9.29	85.56	9.25	0.9954	0.03	55
4	9.49	88.81	9.42	0.9933	0.03	55
5	9.47	88.62	9.41	0.9944	0.03	55
6	10.03	93.13	9.65	0.9625	0.03	55
7	10.10	97.44	9.87	0.9771	0.03	55
8	9.55	86.05	9.28	0.9708	0.03	55
9	10.24	89.66	9.47	0.9246	0.03	55
10	9.52	86.46	9.30	0.9766	0.03	55
11	9.53	86.29	9.29	0.9742	0.03	55
12	9.76	89.95	9.48	0.9715	0.03	55
13	9.90	88.71	9.42	0.9512	0.03	55
14	9.50	85.38	9.24	0.9725	0.03	55
15	9.82	88.47	9.41	0.9576	0.03	55
16	9.99	92.37	9.61	0.9625	0.03	55
17	10.01	94.99	9.75	0.9735	0.03	55
18	9.43	85.30	9.24	0.9796	0.03	55
19	9.45	86.37	9.29	0.9830	0.03	55
20	9.82	88.62	9.41	0.9591	0.03	55
21	10.24	90.21	9.50	0.9277	0.03	55
22	9.79	89.09	9.44	0.9644	0.03	55
23	9.60	88.80	9.42	0.9812	0.03	55
24	9.78	87.95	9.38	0.9589	0.03	55
25	9.83	93.58	9.67	0.9845	0.03	55
26	9.74	87.92	9.38	0.9623	0.03	55
27	9.55	87.68	9.36	0.9808	0.03	55
28	10.26	95.65	9.78	0.9532	0.03	55

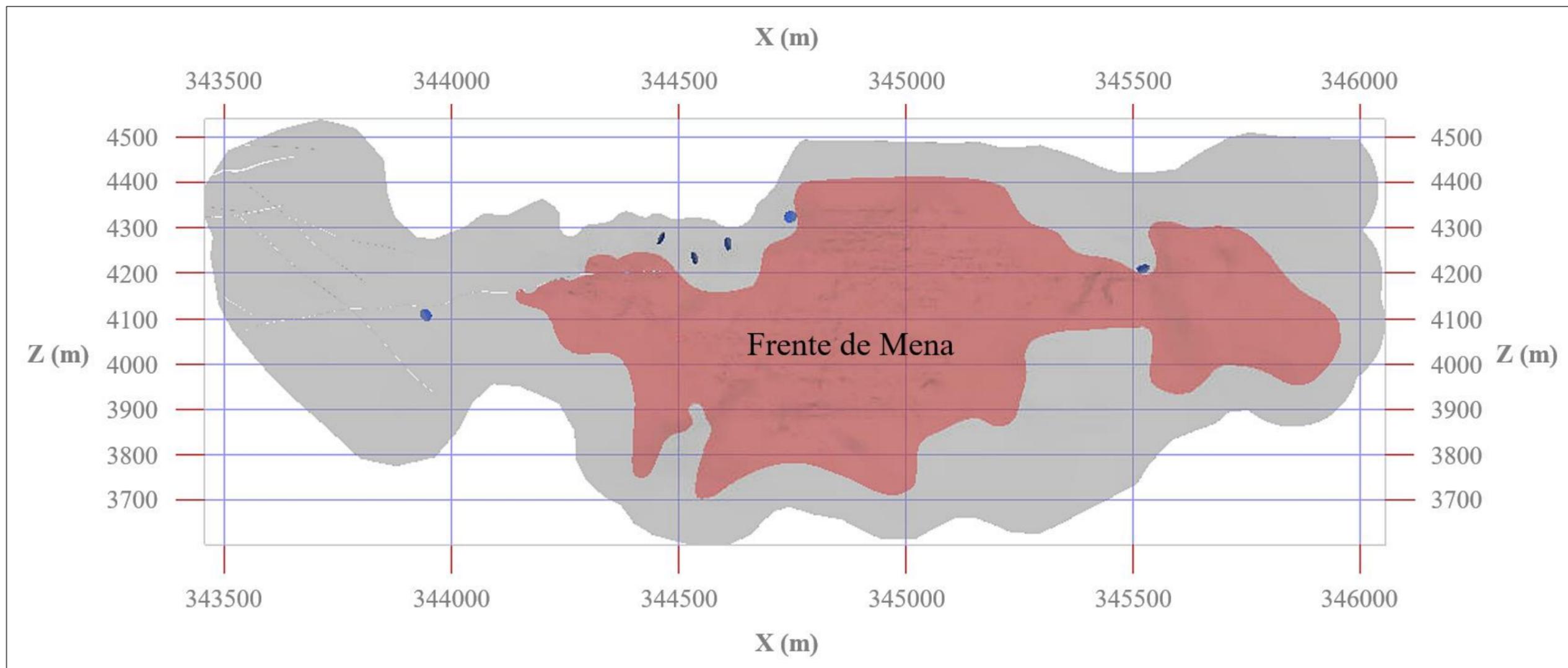
29	10.07	89.95	9.48	0.9420	0.03	55
30	10.06	92.44	9.61	0.9556	0.03	55
31	9.68	90.53	9.51	0.9825	0.03	55
32	9.57	87.35	9.35	0.9763	0.03	55
33	10.24	95.77	9.79	0.9554	0.03	55
34	10.01	89.72	9.47	0.9458	0.03	55
35	9.32	85.12	9.23	0.9900	0.03	55
36	10.15	92.21	9.60	0.9464	0.03	55
37	9.80	92.19	9.60	0.9798	0.03	55
38	9.81	90.83	9.53	0.9715	0.03	55
39	9.44	86.61	9.31	0.9863	0.03	55
40	9.45	84.46	9.19	0.9729	0.03	55
41	9.81	90.60	9.52	0.9708	0.03	55
42	9.54	90.84	9.53	0.9990	0.03	55
43	10.28	94.64	9.73	0.9460	0.03	55
44	10.24	93.72	9.68	0.9450	0.03	55
45	9.69	90.41	9.51	0.9816	0.03	55
46	9.62	84.04	9.17	0.9526	0.03	55
47	9.64	83.81	9.15	0.9497	0.03	55
48	10.08	93.16	9.65	0.9580	0.03	55
49	9.72	88.20	9.39	0.9658	0.03	55
50	9.72	87.53	9.36	0.9628	0.03	55



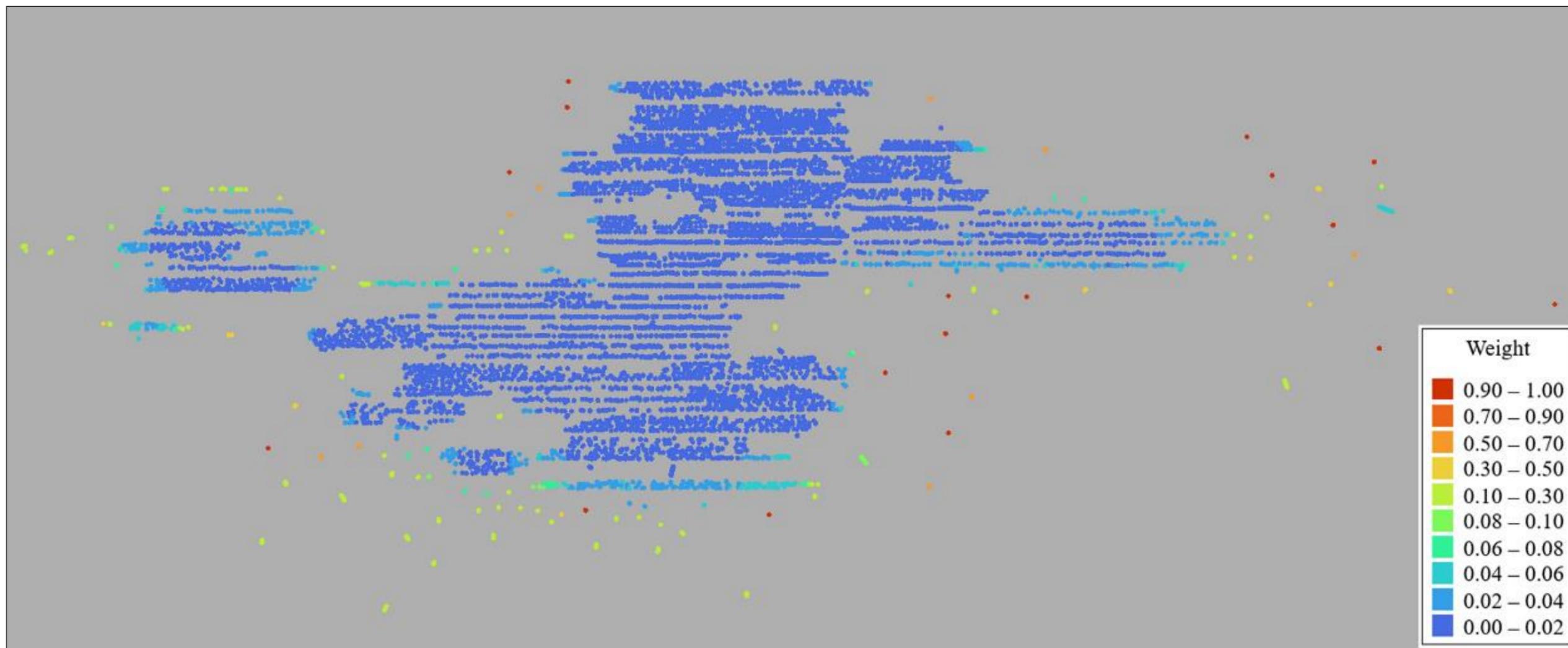
Anexo N° 3: Vista longitudinal mostrando el total de muestras del yacimiento y el sólido de la veta (Fuente: Elaboración propia).



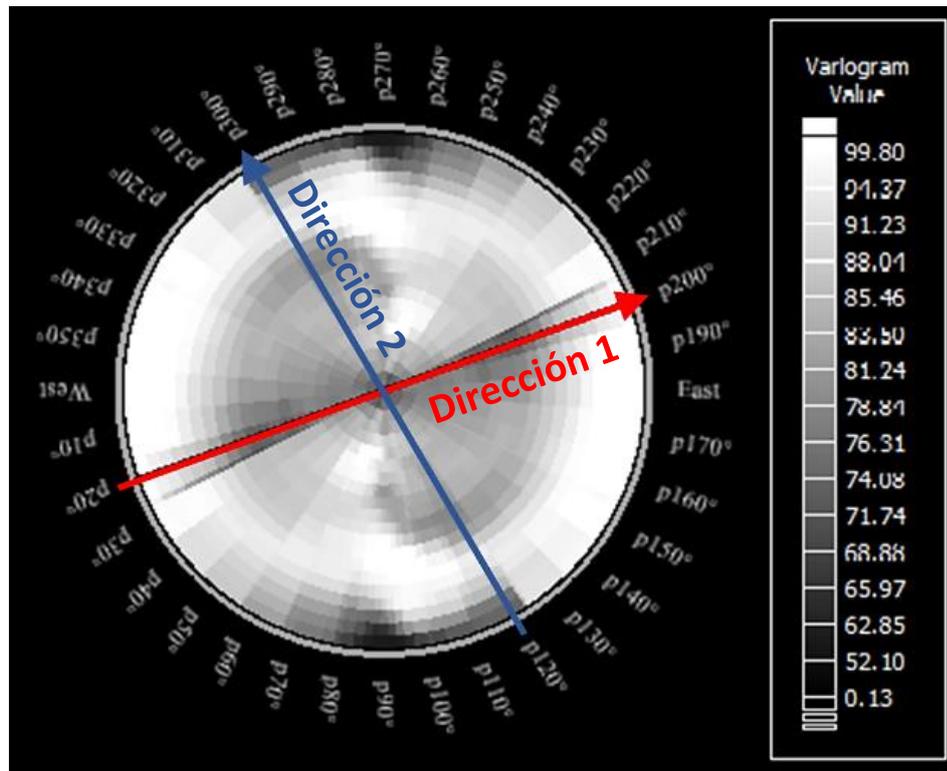
Anexo N° 4: Vista longitudinal mostrando la selección de muestras dentro de la estructura (Fuente: Elaboración propia).



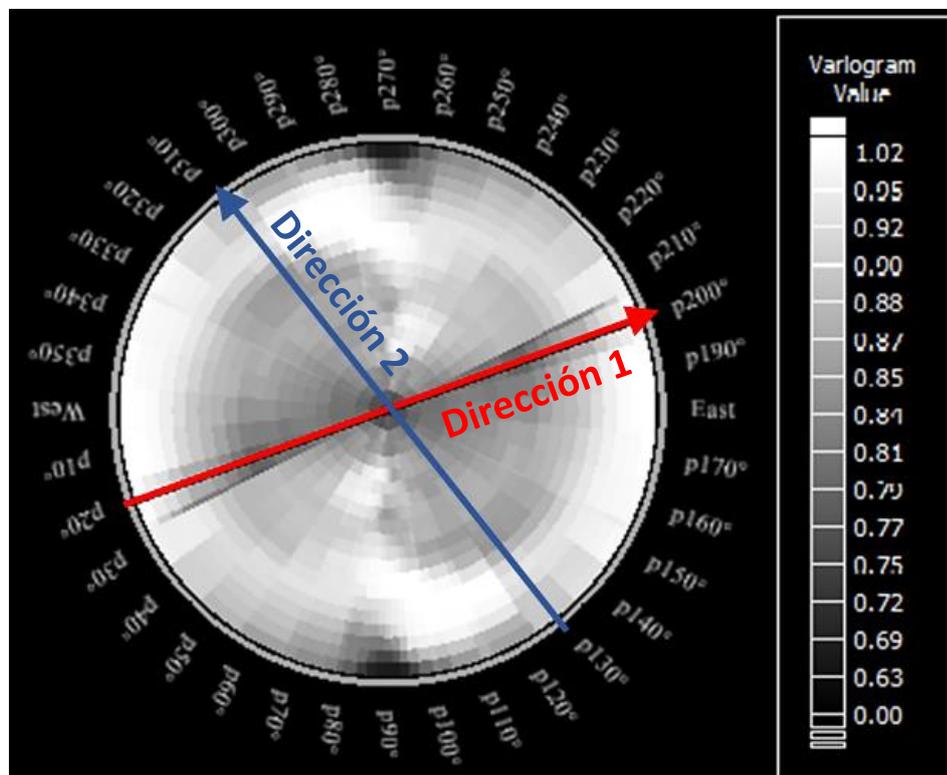
Anexo N° 5: Ubicación de las leyes por debajo del límite de detección (Fuente: Elaboración propia).



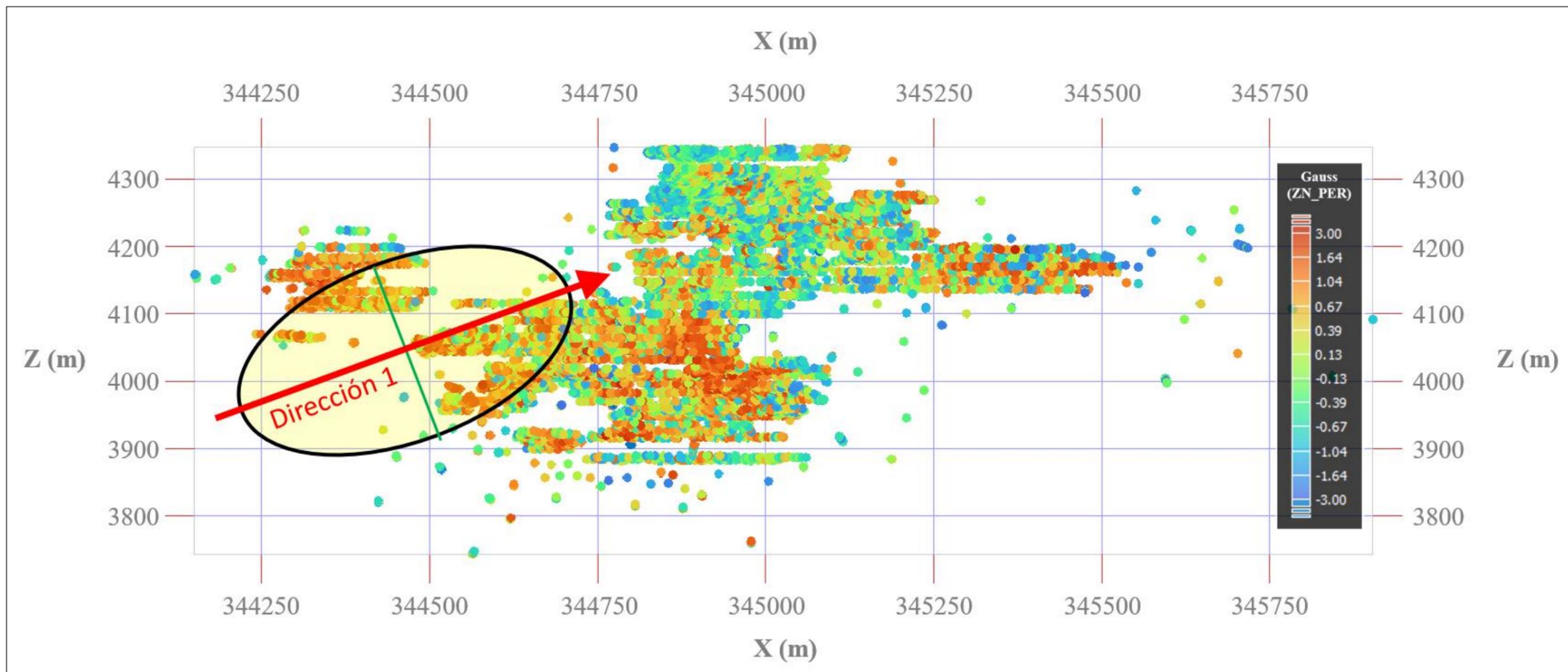
Anexo N° 6: Distribución espacial de los pesos asignados a cada muestra obtenidos a partir del desagrupamiento por el método de celdas (Fuente: Elaboración propia).



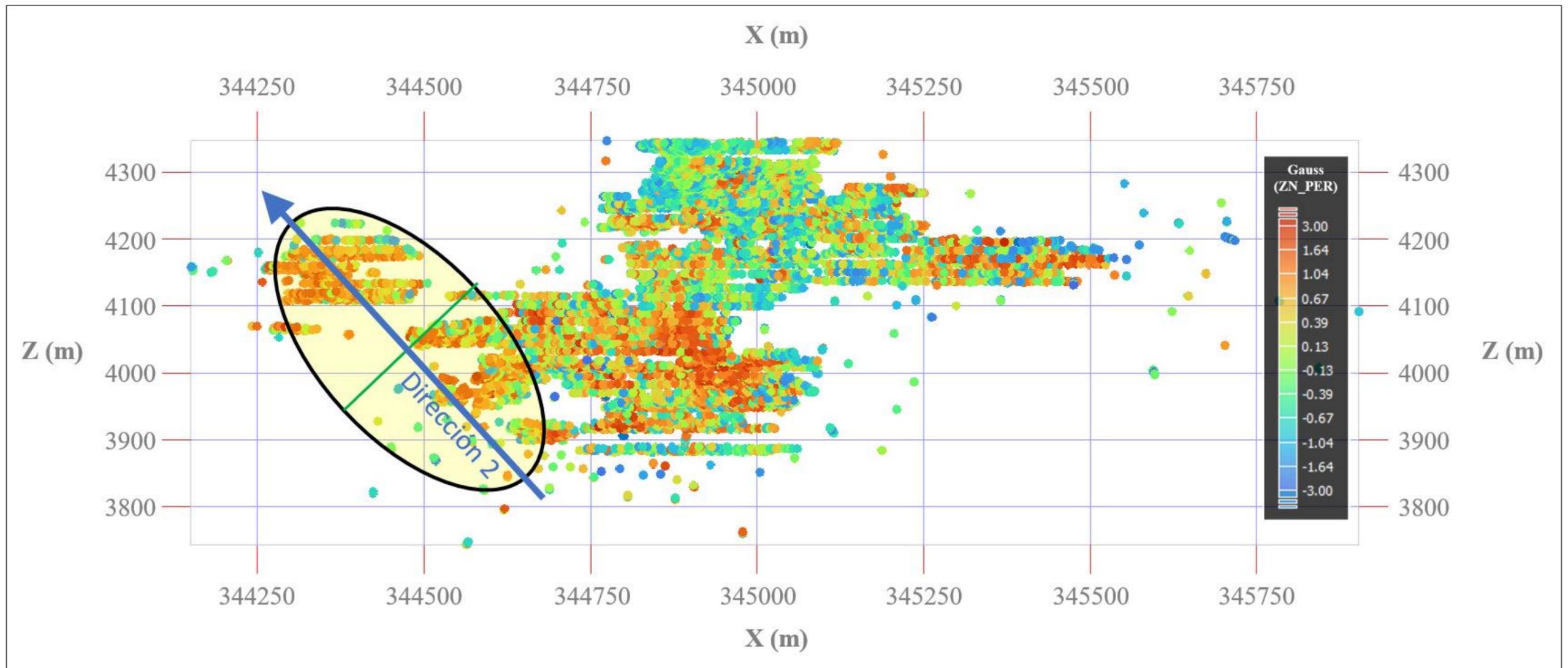
Anexo N° 7: Mapa variográfico de la ley de Zn sin transformar indicando las posibles direcciones de anisotropía (Fuente: Elaboración propia).



Anexo N° 8: Mapa variográfico de la ley de Zn transformada indicando las posibles direcciones de anisotropía (Fuente: Elaboración propia).



Anexo N° 9: Vista longitudinal de las leyes de Zn transformadas mostrando la dirección de anisotropía N°1 (Fuente: Elaboración propia).



Anexo N° 10: Vista longitudinal de las leyes de Zn transformadas mostrando la dirección de anisotropía N°2 (Fuente: Elaboración propia).