UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES POR EL MÉTODO GEOESTADÍSTICO KRIGING ORDINARIO EN EL PROYECTO MINERO BERENGUELA- LAMPA- PUNO 2023

PRESENTADO POR:

Br. DARWIN URIEL PACCO MAMANI

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL

DE INGENIERO DE MINAS

ASESOR:

Dr. MAURO VALDIVIA JORDAN

CUSCO-PERU

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

VICE RECTORADO DE INVESTIGACIÓN

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe asesor del informe técnico titulado: **"ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES POR EL MÉTODO GEOESTADÍSTICO KRIGING ORDINARIO EN EL PROYECTO MINERO BERENGUELA- LAMPA- PUNO 2023"**

Presentado por **Darwin Uriel Pacco Mamani**, con DNI **70848807** y código universitario Nro. **124229** para optar al Título Profesional de: **INGENIERO DE MINAS**. Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 (Tres) veces, mediante el software antiplagio Turnitin, conforme al Artículo 6° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de: **8 % (ocho por ciento).**

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación, tesis, textos, libros, revistas, artículos científicos, material de enseñanza y otros (Art. 7, inc. 2 y 3)

Porcentaje	Evaluación y acciones	Marque con una X
Del 1 al 10 %	**No se considera plagio.**	**X**
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayores a 31 %	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del software antiplagio.

Cusco, 13 de Mayo de 2025.

FIRMA
POST FIRMA: Dr. Mauro Valdivia Jordán
DNI Nro.: 23833142
ORCID ID: 0000-0002-7880-4637

Se adjunta:

1. Reporte Generado por el sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:458981108?locale=es-MX

DARWIN URIEL PACCO MAMANI

"ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES POR EL MÉTODO GEOESTADÍSTICO KRIGING ORDINARIO EN EL PR...

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:458981108

Fecha de entrega
13 may 2025, 8:36 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
13 may 2025, 8:41 p.m. GMT-5

Nombre de archivo
TURNITIN - DARWIN.pdf

Tamaño de archivo
17.0 MB

183 Páginas

29.750 Palabras

170.310 Caracteres

8% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text
- Small Matches (less than 8 words)

Top Sources

7% Internet sources
2% Publications
4% Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

Hidden Text
1 suspect characters on 1 page
Text is altered to blend into the white background of the document.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

DEDICATORIA

A Dios, mi guía y fortaleza, quien ha estado presente en cada paso de este camino. Gracias, por brindarme sabiduría, inteligencia y la determinación para seguir adelante, incluso en los momentos más desafiantes, este logro no habría sido posible sin su guía.

A mis padres**,** Sabino y Lucia quienes con sacrificio, esfuerzo y amor incondicional han sido mi guía y fortaleza en cada etapa de mi vida. Gracias por enseñarme a nunca rendirme y a siempre luchar por mis sueños.

A mis hermanos y seres queridos, por su constante apoyo y compañía, brindándome siempre palabras de aliento cuando más lo necesitaba.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y, en particular, a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por brindarme la oportunidad de formar parte de esta prestigiosa institución. Agradezco profundamente el apoyo recibido durante mi formación académica, así como la enseñanza y el compromiso de todos los docentes que han sido fundamentales en mi desarrollo profesional.

INTRODUCCIÓN

La estimación precisa de los recursos minerales siendo relevante en la industria minera, ya que constituye la base para la planificación de proyectos, toma de decisiones financieras y evaluación de la viabilidad de los yacimientos. La implementación de métodos geoestadísticos, como el Kriging Ordinario (KO), ha sido crucial para abordar la complejidad inherente a la distribución de los recursos minerales y reducir la incertidumbre en las estimaciones.

El Proyecto Minero Berenguela, situado en el distrito de Santa Lucía, provincia de Lampa, en la región de Puno, presenta un notable potencial para la explotación de minerales como plata (Ag), cobre (Cu), manganeso (Mn) y zinc (Zn).

El principal problema de esta investigación se enfoca en responder la pregunta: ¿Cuál es la estimación de los recursos minerales, utilizando el método geoestadístico kriging ordinario en el Proyecto Minero Berenguela? Para abordar esta interrogante, se han planteado tres problemas específicos: caracterizar las condiciones geológicas y los parámetros geoestadísticos necesarios para implementar el KO, aplicar el método geoestadístico Kriging Ordinario para la estimación de los recursos minerales, y finalmente, estimar y clasificar los recursos como medidos, indicados e inferidos, además de determinar el tonelaje total del yacimiento.

El objetivo principal de la investigación es estimar los recursos minerales mediante el uso del método Kriging Ordinario, utilizando datos de perforaciones históricas y recientes. La metodología incluye un análisis geoestadístico detallado, basado en técnicas como el Análisis Exploratorio de Datos (EDA), la construcción de variogramas y la generación de un modelo de bloques tridimensional que permite representar la distribución espacial de los recursos.

La relevancia de esta investigación radica en ofrecer una estimación precisa, satisfaciendo la necesidad de obtener estimaciones confiables de los recursos minerales en el Proyecto Berenguela, lo cual contribuirá al conocimiento técnico del yacimiento y facilitará la toma de decisiones durante las etapas iniciales del desarrollo del proyecto minero.

Para el desarrollo adecuado de la tesis, esta se ha organizado en los siguientes capítulos:

CAPÍTULO I: Presenta la problemática de la investigación, objetivos, justificación, como limitaciones, las variables e indicadores, así como la hipótesis investigativa.

CAPÍTULO II: Desarrolla el marco teórico, proporcionando un contexto académico sobre la estimación de recursos minerales, los métodos tradicionales y geoestadísticos, con un enfoque particular en el Kriging Ordinario. Además, se analiza la importancia de los análisis de variograma, la interpretación geológica y las bases teóricas requeridas para el estudio.

CAPÍTULO III: Expone la metodología detallando el enfoque metodológico adoptado, basado en un diseño científico, aplicado y descriptivo correlacional. Se describen las técnicas de recolección de datos, los instrumentos utilizados y el proceso de análisis de datos mediante herramientas especializadas como LeapFrog y DataMine para la estimación de los recursos minerales.

CAPÍTULO IV: Se dedica a la estimación de los recursos minerales mediante el método geoestadístico, utilizando el Kriging Ordinario, presentando los datos recolectados, el control de calidad, el análisis exploratorio y geoestadístico que respaldan las estimaciones realizadas, incluida la categorización de los recursos.

CAPÍTULO V: Se desarrolla el análisis y la discusión, como se valida el modelo de bloques, los variogramas, la interpolación y la clasificación de los recursos minerales. Se comparan los modelos de estimación con los datos reales, destacando la confiabilidad de la técnica utilizada y analizando los posibles impactos económicos y operacionales del proyecto. La investigación concluye con las conclusiones y recomendaciones.

RESUMEN

La investigación enfatizo la necesidad de utilizar estándares internacionales para evaluar y definir los recursos minerales, especialmente considerando la volatilidad del sector y la importancia de atraer inversiones, para lo cual se consideró el caso del proyecto minero Berenguela como un ejemplo de la aplicación de técnicas de modelado geoestadístico para la estimación. Teniendo como objetivo principal estimar los recursos minerales utilizando el método geoestadístico Kriging Ordinario, donde el estudio se sustenta en la recopilación y validación de datos históricos y recientes de perforaciones. Se aplicaron técnicas de control de calidad (QA/QC) para garantizar la integridad de los datos, y se construyeron variogramas experimentales y teóricos que permitieron modelar la continuidad espacial de los minerales. La metodología emplea un nivel descriptivo correlacional**,** ya que busca identificar patrones y relaciones espaciales entre las muestras disponibles, Este enfoque se basa en los principios del análisis científico e inductivo, lo que significa que se utiliza un enfoque cuantitativo para modelar la variabilidad de los datos de manera detallada. Los resultados mostraron que el método Kriging Ordinario (KO) proporciona una estimación confiable y consistente, clasificando los recursos en: Medidos e Indicados: 40.168 Mt con leyes promedio de 78 g/t Ag, 6.10% Mn, 0.67% Cu y 0.34% Zn. Por último, el estudio concluyo que el método KO es eficaz para la estimación de recursos minerales en depósitos complejos como Berenguela, proporcionando un modelo de bloques detallado y confiable que constituye una base técnica sólida para la planificación minera y futura evaluación económica del proyecto.

Palabras clave: **Recursos minerales, Kriging Ordinario, Modelado geoestadístico y Control de calidad (QA/QC)**

ABSTRACT

The research emphasized the need to utilize international standards for evaluating and defining mineral resources, especially considering the volatility of the sector and the importance of attracting investments. The Berenguela mining project was considered as a case study for the application of geo-statistical modeling techniques for estimation. The main objective was to estimate the mineral resources using the Ordinary Kriging geo-statistical method, with the study relying on the collection and validation of historical and recent drilling data. Quality control (QA/QC) techniques were applied to ensure data integrity, and experimental and theoretical variograms were constructed to model the spatial continuity of the minerals. The methodology employs a descriptive-correlational level, as it aims to identify patterns and spatial relationships between the available samples. This approach is based on the principles of scientific and inductive analysis, meaning a quantitative approach is used to model the variability of the data in detail. The results showed that the Ordinary Kriging (OK) method provides a reliable and consistent estimation, classifying the resources into Measured and Indicated categories: 40.168 Mt with average grades of 78 g/t Ag, 6.10% Mn, 0.67% Cu, and 0.34% Zn. Finally, the study concluded that the OK method is effective for estimating mineral resources in complex deposits such as Berenguela, providing a detailed and reliable block model that constitutes a solid technical foundation for mine planning and the future economic evaluation of the project.

Keywords: **Mineral resources, Ordinary Kriging, Geostatistical modeling and Quality control (QA/QC)**

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA ..... **ii**
AGRADECIMIENTO ..... **iii**
INTRODUCCIÓN ..... **iv**
RESUMEN ..... **vi**
ABSTRACT ..... **vii**
ÍNDICE GENERAL ..... **viii**
ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xii**
ÍNDICE DE PLANOS ..... **xvi**
ÍNDICE DE ABREVIATURAS ..... **xvii**
CAPÍTULO I **20**
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **20**
1.1. Descripción de Problema 20
1.2. Formulación del Problema 22
1.2.1. Problema General 22
1.2.2. Problemas Específicos 22
1.3. Objetivos de la Investigación 23
1.3.1. Objetivo General 23
1.3.2. Objetivos Específicos 23
1.4. Justificación e importancia de la investigación 23
1.4.1. Justificación de la Investigación 23
1.4.2. Importancia 24
1.5. limitación y Delimitación de la investigación 24
1.5.1. Limitación de la investigación 24
1.5.2. Delimitación de la Investigación 24
1.6. Formulación de Hipótesis 25
1.6.1. Hipótesis General 25
1.6.2. Hipótesis Específicos 25
1.7. Identificación de variables e indicadores 25
1.7.1. Operacionalización de Variables 26

CAPÍTULO II **27**
MARCO TEÓRICO **27**
2.1. Antecedentes de la investigación 27
2.1.1. Antecedentes Internacionales 27
2.1.2. Antecedentes Nacionales 29
2.2. Bases teóricas 31
2.2.1. Métodos de Estimación de Recursos Minerales 31
2.2.2. Métodos Geoestadísticos: 31
2.2.2. Estimación de Recursos Minerales 32
2.2.3. Interpretación geológica 32
2.2.4. Estimación de dominios 34
2.2.5. Análisis exploratorio de datos (EDA) 35
2.2.6. Estimación del modelo de bloque 36
2.2.7. Variograma 37
2.2.8. Kriging ordinario 39
2.2.9. Clasificación de recursos minerales (categorización) 42
2.3. Marco Conceptual 46
2.3.1. Recursos Minerales 46
2.3.2. Geoestadística y su Aplicación en la Minería 46
2.3.3. Preparación de datos 46
2.3.4. Cálculo del variograma 46
2.3.5. Modelado de la Dependencia Espacial 47
2.3.6. Estimación por kriging 47
2.3.7. Autocorrelación Espacial 47
2.3.8. Incertidumbre en la Estimación 47
2.3.9. Box Plot 48
2.3.10. Validación de los resultados 48
CAPITULO III **49**
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN **49**
3.1. Método de investigación 49
3.2. Nivel de la Investigación 49

3.3. Tipo de Investigación 49
3.4. Diseño de la investigación 50
3.5. Población y Muestra 50
3.5.1. Población 50
3.5.2. Muestra 51
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 51
3.6.1. Técnicas de recolección de datos 51
3.6.2. Instrumentos de recolección de datos 52
3.6.3. Procesamiento y presentación de datos 53
CAPITULO IV 54
ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES MEDIANTE EL MÉTODO GEOESTADÍSTICO 54
4.1. Exposición de datos 54
4.2. Control de calidad de datos de muestreo 56
4.2.1. Material de referencia certificada 56
4.2.2. Muestras en Blanco 60
4.2.3. Duplicado de muestras 61
4.2.4. Ensayos de Árbitro 65
4.3. Verificación de datos 69
4.3.1. Verificación del ensayo 71
4.3.2. Base de Datos para la Estimación 72
4.3.3. Bulk Density 72
4.4. Análisis de datos e interpretación de la información 75
4.4.1. Interpretación del Modelo Geológica 75
4.5. Análisis Exploratorio de Datos 80
4.5.1. Selección de muestras 80
4.5.2. Análisis estadístico descriptivo 80
4.5.3. Análisis gráfico (Box Plots) 84
4.5.4. Compositacion 87
4.5.5. Capping 89

4.6. Análisis geoestadístico 99
4.6.1. Análisis de Variogramas 100
4.6.2. Selección del Modelo Geoestadístico 104
4.6.3. Estimación de Dominios Geoestadísticos 105
4.6.4. Estimación de Modelo de Bloques 107
4.6.5. Estimación de Recursos Minerales por categoría 110
CAPITULO V 115
ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 115
5.1. Validación del Modelo de Bloques 115
5.1.1. Validación Visual 115
5.1.2. Comparación Estadística 121
5.2. Variograma 123
5.3. Validación de interpolación 125
5.3.1. Swats Plots 125
5.3.2. Curva Tonelaje Ley 130
5.4. Clasificación de Recursos Minerales 131
5.4.1. Implicaciones Operacionales y Económicas 133
5.5. Discusión de Resultados 133
CONCLUSIONES 133
RECOMENDACIONES 138
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 140
ANEXOS 142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Estructura natural de la roca* 33
Figura 2 *Observaciones y mediciones típicas.* 33
Figura 3 *Representación por limites* 34
Figura 4 *Cálculo de γ(h) en diferentes lags* 38
Figura 5 *Principales elementos del Variograma.* 38
Figura 6 *Variograma experimental y ajuste de un modelo.* 39
Figura 7 *Muestras ponderadas por variograma.* 42
Figura 8 *Códigos y normas internacionales de categorización de recursos minerales.* 43
Figura 9 *Clasificación de recursos minerales.* 44
Figura 10 *Categorización de recursos y reservas minerales.* 45
Figura 11 *Partes del diagrama de caja.* 48
Figura 12 *Sondeo de perforaciones en el proyecto minero* 50
Figura 13 *Proceso de estimación de recursos minerales por el método geoestadístico.* 52
Figura 14 *Control de MRC BER-21-2 (Ag)* 57
Figura 15 *Control de MRC BER-21-2 (Mn)* 58
Figura 16 *Control de MRC BER-21-2 (Cu)* 59
Figura 17 *Control de MRC BER-21-2 (Zn)* 59
Figura 18 *Desempeño de Aprobación por Elemento (%)* 60
Figura 19 *Gráfico RPD de Muestras duplicadas de campo para el mineral de Ag, Mn, Cu y Zn.* 62
Figura 20 *Scatter plots de datos duplicados de campo del mineral de Ag* 63
Figura 21 *Scatter plots de datos duplicados de campo del mineral de Mn* 64
Figura 22 *Scatter plots de datos duplicados de campo del mineral de Cu* 64
Figura 23 *Scatter plots de datos duplicados de campo del mineral de Zn* 65
Figura 24 *Muestras Duplicadas de una Referencia Estándar (Umpire)-Ag-Mn-Cu-Zn* 66
Figura 25 *Diagrama de dispersión de duplicados de Umpire-Ag* 67
Figura 26 *Diagrama de dispersión de duplicados de Umpire-Mn* 68
Figura 27 *Diagrama de dispersión de duplicados de Umpire-Cu* 68
Figura 28 Diagrama de dispersión de duplicados de Umpire-Zn 69
Figura 29 *Verificación por muestreo de los resultados de ensayos* 71
Figura 30 *Sondajes desarrollados por año desde 2004 hasta 2022.* 72
Figura 31 *Estadísticas de la densidad por tipo de roca.* 73

Figura 32 *Estadísticas de Densidad de Muestra General* 73
Figura 33 *Frecuencia Acumulada de Bulk Density* 74
Figura 34 *Box Plots de Bulk Densisty.* 75
Figura 35 *Variabilidad Espacial de las leyes de Ag, Mn, Cu y Zn.* 81
Figura 36 *Log Probability Plots de los Minerales Ag (g/t), Mn (%), Cu (%) y Zn (%)* 82
Figura 37 *Histograma Acumulativo, CDF y Curva de Lorenz para cada mineral.* 84
Figura 38 *Box Plots general de los minerales de Ag (g/t), Mn (%), Cu (%) y Zn.* 85
Figura 39 *Box plots por dominio de cada mineral Ag, Mn, Cu y Zn.* 86
Figura 40 *Histograma logarítmico para la longitud de muestra.* 87
Figura 41 *La escala logarítmica* 88
Figura 42 *Histograma y Gráfico de Probabilidad Acumulada (CDF) de LENGTH.* 89
Figura 43 *Gráficos de Probabilidad de Ag para los Dominios 1 a 4.* 90
Figura 44 *Histograma, CDF y Curva de Lorenz para el dominio 1 de cada mineral.* 92
Figura 45 *Histograma, CDF y Curva de Lorenz para el dominio 2 de cada mineral.* 93
Figura 46 *Histograma, CDF y Curva de Lorenz para el Dominio 3 de cada mineral.* 94
Figura 47 Histograma, CDF y Curva de Lorenz para el dominio 4 de cada mineral. 95
Figura 48 *Histograma, CDF y Curva de Lorenz para el Dominio 5 de cada mineral.* 96
Figura 49 *Box plots de los compositos por dominio de cada mineral Ag, Mn, Cu y Zn.* 97
Figura 50 *Box plots de los capped por dominio de cada mineral Ag, Mn, Cu y Zn.* 98
Figura 51 *figura de muestreo del proyecto minero berenguela* 100
Figura 52 *Variograma Eje Mayor - Valores de Plata* 101
Figura 53 *Variograma de Semi -Mayor (Valores de Plata)* 101
Figura 54 *Variograma para Valores de Plata (Eje Menor)* 102
Figura 55 *Variogramas ajustados para diferentes azimuts (Ag)* 102
Figura 56 *Variogramas ajustados para diferentes azimuts (Mn)* 103
Figura 57 *Variogramas ajustados para diferentes azimuts (Cu).* 104
Figura 58 *Distribución de Leyes por Dominio en el Yacimiento.* 106
Figura 59 *Contact plot del elemento de Ag, Mn, Cu y Zn por cada dominio* 107
Figura 60 *Curva SMU Para Ag, Mn, Cu y Zn Con Dilución Y Recuperación* 108
Figura 61 *Análisis QKNA para definir el tamaño de Block* 110
Figura 62 *Distribución 3D De Perforaciones Por Tipo* 111
Figura 63 *Mapa De Calor: Densidad De Perforaciones Por Área* 112
Figura 64 *Variograma teórico Ag en los diferentes dominios.* 123

Figura 65 *Variograma teórico Mn en los diferentes dominios.* 124
Figura 66 *Variograma teórico Cu en los diferentes dominios.* 124
Figura 67 *Variograma teórico Zn en los diferentes dominios.* 125
Figura 68 *Diagrama de franja para Ag en bloques Medidos e Indicados.* 126
Figura 69 *Diagrama de franja para Mn en bloques Medidos e Indicados* 127
Figura 70 *Diagrama de franja para Cu en bloques Medidos e Indicados* 128
Figura 71 *Diagrama de franja para Zn en bloques Medidos e Indicados* 129
Figura 72 *Curva Tonelaje-ley para la Ag* 131
Figura 73 *Principales unidades estratigráficas expuestas en la región de Santa Lucia.* 147
Figura 74 *Mapa geológico local del distrito de Santa Lucia* 148
Figura 75 *Estratigrafía jurásica y cretácica de la región* 151
Figura 76 *Sección esquemática de la mineralización de Berenguela.* 152
Figura 77 *Mapa metalogénico de la región al oeste del Lago Titicaca.* 153
Figura 78 *Mapa de afloramientos de alteración del área central y perforaciones.* 156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Operacionalización de Variables* 26

Tabla 2 *Muestras de control de calidad por año* 55

Tabla 3 *Ratios de control de calidad de muestras* 55

Tabla 4 *Resumen del desempeño de los duplicados de campo en el programa* 61

Tabla 5 *Resumen de capping de ley de mineral.* 91

Tabla 6 *Parámetros del modelo de bloque.* 109

Tabla 7 *KPI de densidad de perforación recomendada.* 112

Tabla 8 *Criterio para clasificación de recursos minerales* 113

Tabla 9 *Recursos medidos, indicados e inferidos del proyecto "BERENGUELA"* 114

Tabla 10 *Reporte de clasificación de recursos minerales por el método Kriging Ordinario* 114

Tabla 11 *Estadísticas de los modelos de bloques y los compositos para Ag, Mn, Cu y Zn.* . 122

Tabla 12 *Coordenadas de Ubicación* 143

Tabla 13 *Acceso vía terrestre* 144

Tabla 14 *Acceso vía aéreo* 144

Tabla 15 *Cuadro de clasificación de recursos minerales* 156

Tabla 16 *Calidad del macizo rocoso – Clasificación RMR (Bieniawski, 1973)* 157

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 *Vista en planta del modelo estructural en 3D.* 77

Plano 2 *Sección transversal geología 1600E.* 78

Plano 3 *Vista 3D de los dominios de estimación.* 80

Plano 4 *Plano de perforación del proyecto minero Berenguela.* 99

Plano 5 *Contenidos de Ag en el modelo de bloques y perforaciones en la sección transversal 1600E.* 117

Plano 6 *Contenidos de Mn en el modelo de bloques y perforaciones en la sección transversal 1600E.* 118

Plano 7 *Contenidos de Cu en el modelo de bloques y perforaciones en la sección transversal 1600E.* 119

Plano 8 *Contenidos de Zn en el modelo de bloques y perforaciones en la sección transversal 1600E.* 120

Plano 9 *Solido 3D con la variable CONF* 132

Plano 10 *Plano de Ubicación del Proyecto Minero Berenguela* 143

Plano 11 *Plano Geológico Regional* 146

Plano 12 *Plano del área del yacimiento que muestra las fallas observadas mediante mapeo y perforación.* 154

Plano 13 *Sección longitudinal que muestra el espesor de la mineralización.* 155

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
±2SD	Más o menos dos desviaciones estándar
±3SD	Más o menos tres desviaciones estándar
046-DIR-ARCOM-2015	Normativa técnica del Ecuador para clasificación de recursos minerales
1100E, 1600E, 1700E	Secciones transversales en coordenadas este del proyecto
ALS	ALS Global, laboratorio de análisis geoquímicos
AMC	Australian Mining Consultants
AUSIMM	Australasian Institute of Mining and Metallurgy
BER-21-2	Identificador de muestra del proyecto minero Berenguela
BG3	Blanco grueso (control de calidad de muestras)
CDF	Función de distribución acumulada (Cumulative Distribution Function)
CIM	Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum
CMMI	Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO)
CONF	Variable de confianza del modelo de bloques
CP	Competent Person (Persona competente)
CRD	Depósito de reemplazamiento de carbonatos (Carbonate Replacement Deposit)
CRIRSCO	Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards
CV	Coeficiente de variación
EDA	Análisis exploratorio de datos (Exploratory Data Analysis)
EDGE	Software de análisis geoestadístico
ICP-MS	Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente
ICP-OES	Espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente
ICP40V	Código o método analítico específico de ICP
IDW	Método de interpolación Inversa de la distancia (Inverse Distance Weighting)
JORC	Joint Ore Reserves Committee (código australiano para recursos mineros)
KO	Kriging Ordinario
KPI	Indicador clave de desempeño (Key Performance Indicator)
LDL	Límite inferior de detección (Lower Detection Limit)
MRC	Material de referencia certificado (Certified Reference Material)
NW-SE	Dirección Noroeste-Sureste
PBI	Producto bruto interno
PDL	Posible abreviatura local relacionada con perforaciones o proyectos
PEA	Preliminary Economic Assessment (Evaluación Económica Preliminar)

Abreviatura	Significado
QA/QC	Aseguramiento y control de calidad (Quality Assurance/Quality Control)
QC	Control de calidad (Quality Control)
QKNA	Análisis de vecindad de Kriging (Quantitative Kriging Neighbourhood Analysis)
QP	Qualified Person (Persona calificada según estándares internacionales)
RC	Perforación con aire reverso (Reverse Circulation)
RCB	Relación de clasificación de bloques (Ratio Classification Blocks)
RMR	Clasificación del macizo rocoso (Rock Mass Rating)
RPD	Diferencia porcentual relativa (Relative Percentage Difference)
RQD	Índice de calidad de la roca (Rock Quality Designation)
R^2	Coeficiente de determinación
SAMREC	South African Mineral Resource Committee (código sudafricano)
SNMPE	Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía del Perú
USD ($)	Dólar estadounidense
UTM	Universal Transverse Mercator (coordenadas geográficas)
VD	Variable Dependiente
VI	Variable Independiente
VOL	Volumen
XYZ	Coordenadas tridimensionales estándar

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de Problema

La dificultad y los costos financieros asociados a un proyecto minero, en función de la clasificación de los recursos y reservas minerales, así como la incertidumbre inherente, son aspectos fundamentales para la industria. Estas herramientas de valoración son esenciales para atraer a posibles inversores en empresas que a menudo carecen de un respaldo sólido en activos o que buscan seguridad financiera. Por ello, es vital utilizar estándares internacionales para definir y evaluar estos recursos (Pais, 2021, p. 3).

Según la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE), el sector minero representa el 10% del PBI del país que representa el 60% de las ventas totales del Perú al mundo. Esto resalta la importancia de la explotación de nuevos proyectos mineros a nivel nacional. Sin embargo, es indispensable considerar la reactivación económica en este sector.

En la actualidad, una estimación errónea o inadecuada de los modelos de recurso viene a ser un factor clave en la evaluación de proyectos mineros. Esto es especialmente cierto cuando se profundizan las excavaciones subterráneas o se elevan los niveles de operación en minas a cielo abierto, lo que resulta en un incremento de costos, como, por ejemplo, en acarreo y tecnología. Por lo tanto, para poder cuantificar los riesgos comerciales en la industria minera y en la economía extractiva, es esencial llevar a cabo una estimación precisa de los recursos disponibles.

La minería, como industria manufacturera, ejerce un rol significativo en el desarrollo económica de la región y del país. En este contexto, el departamento de Puno se presenta como una región con un gran potencial en el sector minero, aunque aún no ha podido despegar. A pesar de su relevancia, este sector enfrenta serias dificultades para su desarrollo, en el Perú y demás países latinoamericanos. Los desafíos sociales son factores determinantes que influyen en estas perspectivas. Además, los proyectos mineros conllevan el riesgo de sobrecostos y incumplimientos de plazos y objetivos, lo que puede resultar frustrante para los inversores.

El proyecto minero Berenguela, ubicado en Lampa, Santa Lucía, en Puno, representa un interesante objetivo Greenfield. La Formación Ayabacas contiene la mineralización de Berenguela y está compuesta por una unidad resedimentada severamente deformada, altamente caótica y en desplome, que puede definirse como una gran fisura o grieta en la corteza terrestre con mescla desordenada de rocas y/o sedimentos. Este proyecto abarca un área de 60,000 kilómetros cuadrados y presenta espesores que alcanzan hasta 500 metros. Con el propósito de hallar los datos necesarios para modelar y estimar los recursos disponibles en la zona, así como determinar la viabilidad de avanzar hacia etapas de ingeniería posteriores, se llevaron a cabo 357 perforaciones. Estos trabajos incluyeron datos recopilados de perforaciones anteriores, totalizando 39,513 metros perforados.

Finalmente, el inventario de minerales es fundamental para evaluar la calidad de los yacimientos en el negocio de la empresa, que presenta pocas garantías y está sujeto considerablemente de la capacidad del experto que toma decisiones basadas en su criterio. Este proceso es crucial para respaldar el mercado de empresas públicas, cuyo valor asciende a billones. Al presentar un proyecto o inicio de operación en la extracción de minerales, la firma de un experto competente con frecuencia avala decisiones que alcanzan cientos o miles de millones de dólares, estableciendo así criterios que son fundamentalmente independientes de la persona que elabora la tesis.

La idea principal es utilizar el Kriging Ordinario para construir modelos de bloques con una alta precisión y una mínima incertidumbre, a pesar de la limitada información disponible. Posteriormente, se clasificarán en áreas geoestadísticas mediante un análisis estadístico descriptivo, lo que permitirá una clasificación fiable.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cuál es la estimación de los recursos minerales, utilizando el método geoestadístico kriging ordinario en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno en 2023?

1.2.2. Problemas Específicos

- ✓ ¿Cuáles son los parámetros geoestadísticos más relevantes para obtener una estimación confiable de los recursos minerales mediante el método Kriging Ordinario en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno 2023?
- ✓ ¿Cómo aplicar el método geoestadístico kriging ordinario para estimar los recursos minerales en el Proyecto Minero Berenguela, lampa, Puno 2023?

- ✓ ¿Cuál es la cantidad estimada de los recursos minerales, por categorías (medidos, indicados, inferidos), y en toneladas, utilizando el método Kriging Ordinario en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno 2023?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Estimar los recursos minerales mediante el método geoestadístico Kriging ordinario, para determinar la importancia económica del Proyecto Minero Berenguela, lampa, Puno 2023.

1.3.2. Objetivos Específicos

- ✓ Identificar los parámetros geoestadísticos relevantes para obtener una estimación confiable de los recursos minerales mediante el método Kriging Ordinario en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno 2023.
- ✓ Implementar el método geoestadístico kriging ordinario para la estimación confiable de los recursos minerales en el Proyecto Minero Berenguela, lampa, Puno 2023.
- ✓ Determinar la cantidad estimada de recursos minerales, por categorías (medidos, indicados, inferidos), y en toneladas, utilizando el método Kriging Ordinario en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno 2023.

1.4. Justificación e importancia de la investigación

1.4.1. Justificación de la Investigación

Esta investigación pone de manifiesto la relevancia de los métodos geoestadísticos, en particular el kriging ordinario, como una herramienta esencial para obtener estimaciones más precisas de los recursos minerales. Al incorporar y analizar la variabilidad espacial de los datos geológicos, geofísicos y geoquímicos, se logra un enfoque más integral. Desde una perspectiva práctica, la aplicación de estas técnicas permite a las empresas del sector minero optimizar la

planificación de sus operaciones, incrementar la eficiencia en la recuperación de minerales, reducir costos operativos y mitigar el impacto ambiental. En cuanto a la metodología, el kriging se destaca por su capacidad para generar modelos confiables que se adaptan a diversas configuraciones geológicas, convirtiéndose así en una técnica robusta para la evaluación de yacimientos. Por último, a nivel social, este estudio promueve una minería más responsable y sostenible, generando beneficios tanto para las empresas como para las comunidades afectadas.

1.4.2. Importancia

La investigación busca mejorar con precisión la estimación de recursos, atraer inversiones, impulsar el desarrollo local, reducir impactos ambientales y aportar al conocimiento científico.

1.5. limitación y Delimitación de la investigación

1.5.1. Limitación de la investigación

Esta investigación presenta como principal limitación la disponibilidad, calidad y confidencialidad de los datos geológicos y de perforación (ya que son confidenciales), factores clave para la precisión del método geoestadístico KO. La escasez o inconsistencia de información puede afectar los resultados, y, además, el análisis requiere conocimientos técnicos y acceso a software especializado. La elección del método también estuvo influenciada por criterios económicos relevantes.

1.5.2. Delimitación de la Investigación

El área de estudio se ubica en el proyecto minero Berenguela en el distrito de Santa Lucia, provincia de Lampa, región de Puno.

a) ***Delimitación Temporal***

El estudio se desarrolló a cabo los meses de noviembre del 2024 a marzo del 2025.

b) ***Delimitación Normativa***

Las principales normas utilizadas en este trabajo de investigación son la Norma canadiense, australiana, africana y chilena Estos códigos y normas son fundamentales para asegurar la transparencia, la presentación clara de la información y mejoras en la toma de decisiones de la industria minera. (JORC, 2012)

1.6. Formulación de Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

El método geoestadístico kriging ordinario permite una estimación confiable de los recursos minerales en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno 2023.

1.6.2. Hipótesis Específicos

- ✓ La identificación de los parámetros geoestadísticos más relevantes contribuye significativamente a la precisión de la estimación de los recursos minerales utilizando el método Kriging Ordinario.
- ✓ La aplicación correcta del método geoestadístico kriging ordinario resulta en una estimación confiable de los recursos minerales en el Proyecto Minero Berenguela.
- ✓ La estimación de los recursos minerales en términos de categorías (medidos, indicados, inferidos) proporciona un enfoque claro y útil para la toma de decisiones en el desarrollo del proyecto minero.

1.7. Identificación de variables e indicadores

Variable Independiente (VI): Método de Kriging Ordinario

Variable Dependiente (VD): Recursos Minerales

1.7.1. Operacionalización de Variables

Tabla 1

Operacionalización de Variables

Variables	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Variable Independiente: Kriging Ordinario	Los parámetros geoestadísticos se determinan al generalizar el estimador a una media aleatoria fluctuante en el espacio variando en cada region. (Maldonado, C.2023)	D1: Indicadores geoestadísticos	Media, mediana, desviación estándar	Razón
		D2: Variografía.	Efecto pepita, umbral, sill y alcance	Razón
		D3: Malla Espacial	Índice RCB	M
Variable Dependiente: Estimación de recursos minerales	Los recursos minerales del proyecto minero berenguela se estiman y clasifican según su confiabilidad. (Maldonado, C.2023)	D1: Recurso inferido.	Tonelaje y ley de Ag (g/t)	Tn-gr/tn
		D2: Recurso indicado.	Tonelaje y ley de Ag (g/t)	Tn-gr/tn
		D3: Recurso medido.	Tonelaje y ley de Ag (g/t)	Tn-gr/tn

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Pozo, C. (2020) **Aplicación de Kriging Ordinario y Simulación Condicional para la estimación de recursos.** Caso de Estudio: Proyecto Pastenes, Chile (proyecto de investigación para la obtención del Título de Ingeniero Geólogo) Universidad Central del Ecuador. El propósito de este estudio fue calcular la cantidad total de recursos de cobre utilizando técnicas convencionales de kriging y simulación condicional, así como métodos descriptivos e inferenciales para analizar el comportamiento y la distribución en el proyecto Pastenes en Atacama, Chile. Cada método de interpolación necesita indispensablemente una variable dependiente e independiente, cada una con su propio rango de estimación utilizando el contenido total de cobre como variable dependiente y el diseño experimental. La VD siendo la causa es el contenido total de cobre en las muestras de pozos, mientras que la variable

independiente, que representa el efecto, es la estimación tanto del kriging regular como de las simulaciones secuenciales condicionales. Resultados: Ambos métodos de interpolación geoestadística muestran una alta similitud, con menos del 5% de diferencia de error cuando se aplica la regularización del tamaño de bloque. En conclusión, tanto el método de kriging regular como el método de simulación gaussiana secuencial muestran una diferencia de interpolación del 4,98% de error para un tamaño de bloque de 20x20x20 metros. Ambos métodos son muy similares, lo que lleva a la conclusión de que la estimación de recursos, alrededor de 10 Mtn, o aproximadamente 125 Mtn, serán aceptadas para el proyecto.

País, G. (2021) **Definición de un nuevo criterio de categorización de recursos minerales basado en simulaciones geoestadísticas**. (Tesis para optar al grado de magíster en minería) Universidad de Chile. El propósito de este estudio fue introducir un nuevo método de clasificación de recursos minerales, con el objetivo de mejorar la interpretación cualitativa que predomina en gran medida en la industria. Su aplicación en cualquier yacimiento mineral busca optimizar los datos disponibles para los responsables de tomar decisiones, al eliminar la influencia subjetiva de un experto en la cuantificación de estos recursos. Se emplearon enfoques no experimentales para este fin. El estudio propone un nuevo criterio de clasificación de recursos minerales para abordar cuestiones generales que los métodos actualmente utilizados en la industria no abordan, y evaluar su posible impacto en un escenario real. Los resultados de la simulación se muestran mediante la curva tonelaje ley, la visualización con respecto a los compósitos, la presentación de estadísticas básicas y el análisis variográfico. Debido al gran número de realizaciones, estos resultados se presentan para el tipo E y para las replicaciones #11, #28 y #60 seleccionadas al azar. En conclusión, se encontró que los criterios de clasificación actualmente empleados en la industria se basan principalmente en consideraciones geométricas que no tienen en cuenta el efecto proporcional, la ley de corte y los cambios en el soporte del depósito.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Maldonado, C. (2023) **El método kriging ordinario para la estimación de recursos minerales del Proyecto Purple Hill, Tacna, Perú** (Tesis Para optar el Grado Académico de Magíster en Geología con mención en Recursos Mineros) Universidad Nacional Mayor de San Marcos. El propósito principal fue estimar los recursos minerales mediante la implementación del KO. Se utilizó un enfoque científico hipotético-inductivo de tipo aplicado para determinar los parámetros de estimación mediante kriging ordinario, lo que condujo a la generación del modelo de recursos. Los resultados de la estimación de recursos mediante el método de kriging, y la clasificación de recursos por medio de la varianza de kriging por medio del cálculo probabilístico evidenciaron la variabilidad espacial y variográfia, la cantidad y densidad de sondaje. Como conclusión, la categorización de recursos arrojó el medido 8,570,624 tn con un 0.310% de Cu mientras que el indicado 127,584 tn con un 0.222% de Cu, ambos con una ley cut off de 0.20% de Cu.

Escudero, G. y Morera, J. (2020) **Optimización del plan de kriging ordinario mediante la validación cruzada en la estimación de recursos geológicos.** (Tesis para optar al título profesional de Ingeniero de Minas) Universidad Privada del Norte**.** Tuvo como objetivo mejorar el plan de KO por medio de la validación cruzada en la estimación de recursos geológicos de cobre. Se empleo un diseño descriptivo transversal con enfoque cuantitativo. Los resultados de las muestras 40,40 y 16 en las litologías 1, 2 y 3 , contemplando un óptimo plan de estimación elipsoidal y excluyendo únicamente el compuesto a estimar. Se concluyó que el Kriging optimizado de 40, 40 y 16 muestras para las litologías 1, 2 y 3, respectivamente. demostró ser el más adecuado.

Mariscal, E. (2022) **Gestión para la predicción de recursos y reservas de un yacimiento minero, utilizando programaciones en Matlab**. (Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Magíster en Regulación, Gestión y Economía Minera) Pontificia

Universidad Católica del Perú. El propósito del estudio fue predecir los tonelajes y leyes de mineral utilizando programas en Matlab, un software de código abierto disponible en internet, y clasificar los resultados según el código JORC mediante los criterios de Diehl & David. Se empleó un enfoque inductivo y se diseñó un experimento para obtener con la menor cantidad de errores posibles las leyes de Cu y Au, así como las cantidades en tn, haciendo varias corridas de las variables para mejorar la precisión de los resultados. Los resultados obtenidos al utilizar los programas de Matlab son prometedores y relevantes a comparación con los obtenidos mediante un programa comercial utilizado en la industria minera. Se concluyó que Un recurso se considera medido si la σ del kriging es <= al 25% del CV del krigeado, y se clasifica como indicado si la σ del kriging es menor o igual al 45% del CV del krigeado. Para lograr esto, se realizaron múltiples iteraciones durante la validación cruzada para aproximar a 0.

Mamani, L. (2020) **Proceso de estimación de recursos minerales y aplicación de los métodos geoestadísticos aplicado en los cuerpos mineralizados 1, 2 y 5 en la unidad cerro lindo** (Para optar el Grado Académico de Maestro en Ciencias de la Tierra, con mención en Exploración Geológica) Universidad Nacional San Agustín de Arequipa. El objetivo principal de la investigación fue mejorar el proceso de estimación de recursos minerales, reduciendo el riesgo en la reconciliación de recursos. La metodología utilizada se emplearon métodos de tipo básico y un enfoque científico inductivo no experimental combinó trabajos de gabinete y de campo, aplicando análisis estadísticos y geoestadísticos con herramientas como Leapfrog Geo y MineSight. Los resultados mostraron que la validación cruzada y el uso del Kriging mejoraron la estimación y la categorización de los recursos. Se concluyó que una correcta definición de los dominios de estimación y el uso de simulación condicional ayudan a reducir el sesgo y la incertidumbre en la estimación de recursos.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Métodos de Estimación de Recursos Minerales

2.2.1.1. Métodos Tradicionales

Los métodos tradicionales para la estimación de recursos minerales incluyen el método de bloques o polígonos, la inversa de la distancia (IDW), la media global y las secciones transversales. Estos métodos, aunque útiles en etapas preliminares o en depósitos con geometrías simples, presentan limitaciones al no considerar la variabilidad espacial de los datos, lo que puede conducir a estimaciones menos precisas (Clark, 1979; Davis, 2002; Hustrulid & Kuchta, 2006).

2.2.2. Métodos Geoestadísticos:

Los métodos geoestadísticos representan un avance significativo para la estimación de recursos minerales, permitiendo modelar la dependencia espacial de las variables y generar estimaciones con error minimizado. Entre estos, el Kriging Ordinario se destaca como un estimador lineal insesgado que utiliza la estructura de correlación espacial para interpolar valores en puntos no muestreados (Matheron, 1963; Journel & Huijbregts, 1978).

a) Co-Kriging

Este método, descrito por Goovaerts (1997), es una variante del Kriging que incorpora múltiples variables correlacionadas para mejorar la precisión en depósitos complejos.

b) Simulación Geoestadística

Journel y Huijbregts (1978) explican que este método permite generar múltiples representaciones de un depósito para evaluar la incertidumbre y la variabilidad. Es especialmente útil en depósitos con alta heterogeneidad.

c)Kriging

Según Matheron (1963) el Kriging es un método de interpolación basado en el análisis de la continuidad espacial entre muestras. Su principal ventaja es que ofrece

estimaciones óptimas al considerar tanto la distancia como la distribución espacial de los datos.

2.2.2. Estimación de Recursos Minerales

Es indispensable en minería, ya que permite valorar la cantidad y calidad, lo que ayuda a determinar su viabilidad económica y planificar su explotación. La geoestadística es una herramienta clave en este proceso, ya que modela la variabilidad espacial de los depósitos minerales, proporcionando estimaciones más precisas, especialmente cuando los datos son limitados (Chilès & Delfiner, 1999).

El Kriging ordinario, desarrollado por Isaaks y Srivastava (1989) y Journel y Huijbregts (1978), es uno de los métodos más usados para interpolar datos y realizar estimaciones precisas de las leyes minerales. Además de cuantificar la incertidumbre, la geoestadística incorpora herramientas avanzadas como la simulación estocástica para evaluar variabilidad y riesgos en los modelos de recursos.

Deutsch y Rossi (2014) destacan la importancia de reducir las discrepancias entre los modelos a largo plazo y las proyecciones de producción a corto plazo, considerando factores como el tamaño de los bloques, la selectividad minera y la dilución. Aunque el Kriging suaviza los valores, puede diferir de la distribución real en unidades mineras selectivas (SMU), por lo que los modelos de simulación condicional ofrecen una herramienta que contribuye en la predicción de reservas y rendimientos mineros.

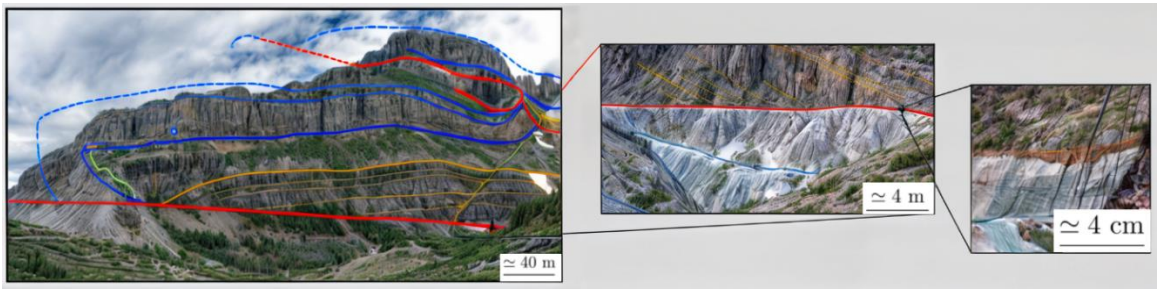
2.2.3. Interpretación geológica

La interpretación geológica es esencial para estimar recursos minerales, pues define la distribución espacial de los minerales, especialmente al usar kriging ordinario. Este método, basado en variografía, permite interpolar datos en áreas no muestreadas si se cuenta con un buen marco geológico (Pérez, 2023). El análisis geológico identifica estructuras clave como fallas y pliegues, que ayudan a delimitar zonas mineralizadas y optimizar el modelo de kriging.

Según Pérez (2023), la integración entre geología y estadísticas mejora las estimaciones y permite detectar áreas con alta incertidumbre que podrían requerir más investigación. Además, la colaboración entre geólogos y estadísticos mejora la eficiencia en costos y tiempo, guiando decisiones de muestreo y modelado. En cuanto a la tecnología, Groshong (2006) destaca que las herramientas informáticas permiten crear modelos 3D desde etapas tempranas, mejorando la comprensión y comunicación de los resultados, especialmente en áreas complejas afectadas por fallas.

Figura 1

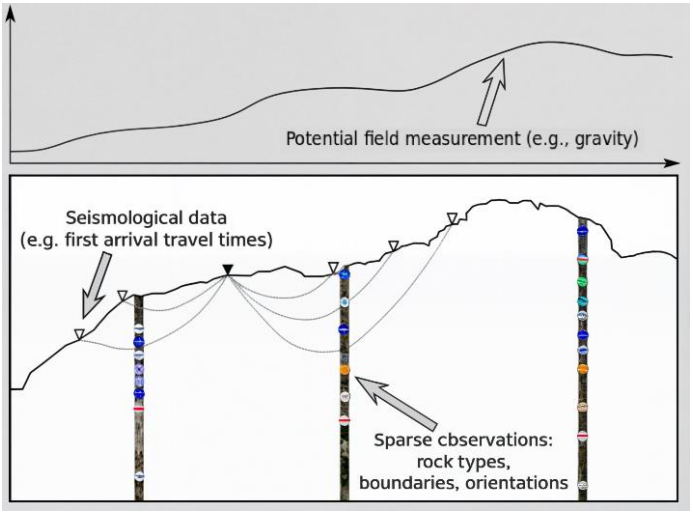
Estructura natural de la roca



Fuente: Estructuras geológicas complejas. (Wellmann & Caumon, 2018, p.5)

Figura 2

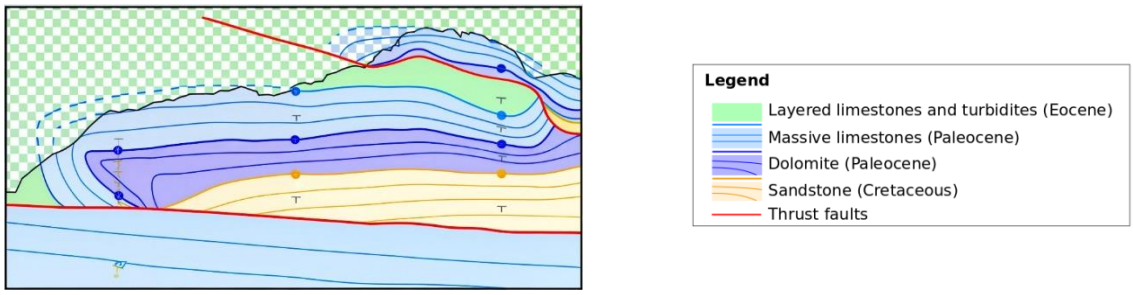
Observaciones y mediciones típicas.



Fuente: Wellmann & Caumon, 2018, p.5

Figura 3

Representación por limites



Fuente: Wellmann & Caumon, 2018, p.5

Los modelos litológicos se basan en datos de sondajes y otras técnicas de exploración subterránea, así como en el mapeo y estudio detallado de afloramientos. Permiten reconstruir la secuencia y evolución de las unidades litológicas en el subsuelo, lo que es esencial para comprender la geología local y regional del área de interés, donde un modelo litológico bien definido es esencial para:

- ✓ Interpretar datos geofísicos y geoquímicos en conjunto.
- ✓ direccionar la exploración hacia áreas con mayores posibilidades de mineralización.
- ✓ Utilizar sondajes para delinear yacimientos.
- ✓ Selecte las técnicas de explotación minera más apropiadas.

En resumen, un modelo litológico sólido basado en datos de campo es esencial para las exploraciones mineras porque proporciona el contexto geológico necesario para la interpretación e identificación completa de los datos.

2.2.4. Estimación de dominios

Los dominios de estimación son zonas dentro de un yacimiento que, aunque no completamente homogéneas, presentan propiedades geológicas y estadísticas consistentes, lo que facilita su predicción. Según el principio de estacionariedad de Matheron, estos dominios

se agrupan con base en variaciones dentro de un mismo volumen, usando parámetros confiables (Deutsch & Rossi, 2014). En yacimientos complejos como los polimetálicos, se crean dominios específicos para diferentes elementos, ya que cada uno responde a distintas variables geológicas, como el cobre y el oro en los depósitos tipo pórfido. La definición de estos dominios se basa en análisis geológicos y estadísticos, utilizando herramientas como histogramas, diagramas de probabilidad y variogramas para identificar patrones y asegurar la validez. Aunque existen técnicas avanzadas como árboles de decisión, estas se adaptan al contexto geológico, priorizando métodos simples que aseguren consistencia y confiabilidad (Maldonado, 2023).

2.2.5. Análisis exploratorio de datos (EDA)

El EDA es crucial en la estimación de recursos minerales, especialmente cuando se usa kriging ordinario para la interpolación espacial. Su objetivo es evaluar la distribución, variabilidad y relaciones entre los datos, lo cual es esencial para entender la variabilidad espacial y aplicar el kriging correctamente (Chiles & Delfiner, 1999).

Según Isaaks y Srivastava (1989), el EDA ayuda a identificar patrones y anomalías en los datos geoespaciales, lo que es clave para ajustar los modelos de variograma, base del kriging. También valida la suposición de estacionariedad del kriging, garantizando la constancia de la varianza en el área analizada. Chiles y Delfiner (1999) enfatizan que comprender bien los datos a través del EDA es fundamental para evitar errores y asegurar que el modelo refleje con precisión las características espaciales del yacimiento.

El EDA emplea herramientas estadísticas y gráficas para analizar distribuciones, correlacionar variables químicas, estudiar estadísticas según litología o mineralización y evaluar límites entre dominios. También permite detectar errores como límites erráticos y anomalías.

Técnicas como la compositación y el capping son fundamentales en el EDA. La compositación agrupa los datos en intervalos uniformes para reducir la variabilidad aleatoria, mejorando el análisis geoestadístico, especialmente en la variografía. La longitud de los intervalos es clave, ya que afecta la calidad del modelo de recursos. El capping limita los valores extremos (outliers) para evitar sesgos en el análisis, y puede aplicarse antes o después de la compositación para asegurar que los datos sean representativos y adecuados para el modelado de recursos minerales.

2.2.6. Estimación del modelo de bloque

Es la representación tridimensional de un yacimiento dividiéndolo en bloques que contienen datos geológicos y de ingeniería. Estos bloques, organizados en una cuadrícula XYZ, incluyen información como leyes y densidad, lo que es clave para calcular los recursos, planificar su extracción y determinar las reservas económicamente viables (Deutsch & Rossi, 2014).

David (1977) señala que los modelos de bloques mejoran la precisión de la estimación al integrar las variaciones espaciales dentro del yacimiento. Una estimación confiable debe tomar en cuenta tanto la variabilidad local como la estructura global del depósito, lo que permite equilibrar la resolución de datos con volúmenes más grandes.

El kriging ordinario, cuando se combina con el modelo de bloques, optimiza el uso de los datos, reflejando tanto las fluctuaciones locales como los patrones espaciales a gran escala, lo cual mejora la comprensión del depósito y su explotación (David, 1977).

Estos modelos son esenciales para evaluar los recursos, optimizar los planes de extracción y diseñar las minas, dividiendo el depósito en bloques pequeños que se adaptan a las características operativas. El tamaño de los bloques debe equilibrar la precisión con la viabilidad operativa, recomendándose un tamaño entre 1/3 y 1/2 del espaciamiento entre pozos

de perforación (Journel & Huijbregts, 1978). La Unidad Mínima de Minado (SMU) define el volumen más pequeño que puede extraerse, considerando los equipos y operaciones.

La geometría del modelo se ajusta a la forma del depósito: los depósitos tabulares requieren bloques bidimensionales, mientras que los depósitos masivos necesitan mallas tridimensionales. Esta flexibilidad permite representar de manera precisa las complejidades geológicas del depósito (Deutsch & Rossi, 2014).

Por último, el modelo debe incorporar variables clave, como leyes y densidad, para facilitar la planificación operativa y económica, influyendo directamente en las decisiones sobre extracción y viabilidad (Stone & Dunn, 1995).

2.2.7. Variograma

El variograma es una herramienta fundamental en la estimación mediante kriging ordinario, ya que permite analizar la variación espacial de propiedades geológicas como la ley mineral en función de la distancia entre muestras, lo que es clave para modelar la estructura de correlación entre datos y realizar interpolaciones precisas. Según Journel y Huijbregts (1978), el variograma mide la dependencia espacial estableciendo la correlación según la separación entre valores. Chiles y Delfiner (1999) destacan que además evalúa la variabilidad y define escalas de correlación y límites de influencia, mientras que Goovaerts (1997) señala que la correcta selección y ajuste del modelo de variograma, incluyendo parámetros como nugget y rango, impacta directamente en la calidad de las estimaciones y en la planificación minera.

El variograma experimental es una herramienta matemática que nos ayuda a entender cómo se relacionan entre sí los valores de una propiedad (como la concentración de un mineral) en diferentes puntos dentro de un yacimiento. Imagina que tienes varias muestras de mineral tomadas en distintos lugares. El variograma mide cuánto cambia o varía la propiedad mineral (por ejemplo, ley de Ag) entre esas muestras según la distancia que hay entre ellas.

Este método asume que la variabilidad de las muestras depende de su distancia y orientación relativa. La variabilidad, o semivarianza (γ(h)), se define calculando la varianza entre pares de muestras separadas por una distancia "h" (distancia de desfase), siguiendo una fórmula:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_{(\square)}} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - x_{i+h})^2$$

donde: γ(h): valor del variograma para la distancia h.

2n(h): número de pares de puntos que están separados por la distancia h.

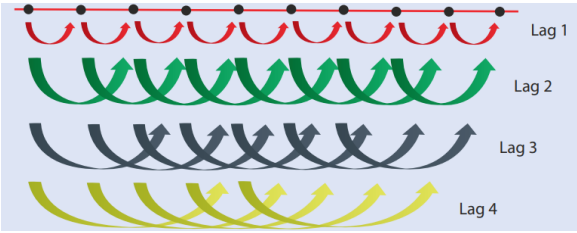
xi: valor de la propiedad mineral en el punto i.

xi+h: valor en otro punto que está a distancia h de i

Calcula el promedio de las diferencias al cuadrado entre valores de la propiedad en puntos separados por h.

Figura 4

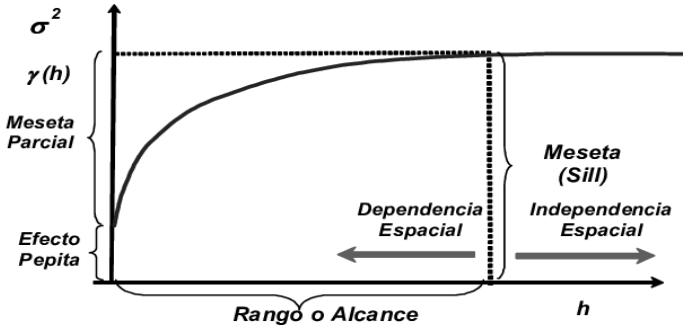
Cálculo de γ(h) en diferentes lags



Fuente: Goovaerts, 1997

Figura 5

Principales elementos del Variograma.

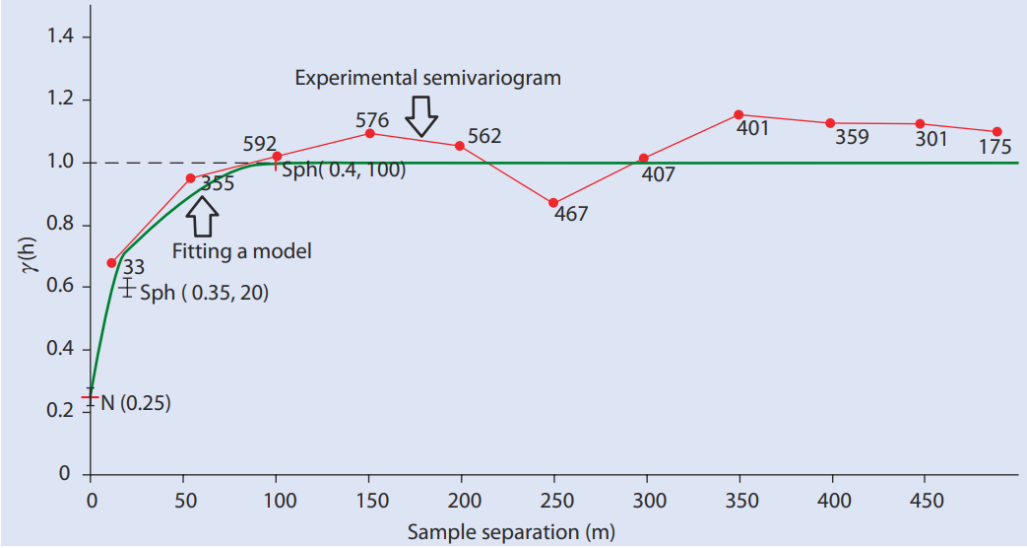


Fuente: Mejía (2006)

El variograma experimental debe interpretarse mediante un modelo teórico ajustado para garantizar su uso en la estimación por kriging, ya que este asegura soluciones válidas y estimaciones positivas. El ajuste considera restricciones matemáticas y puede realizarse de forma manual, automática o combinada, seguido de una validación cruzada para comparar alternativas.

Figura 6

Variograma experimental y ajuste de un modelo.



Fuente: Desharnais, G. (2019)

Los modelos comunes incluyen el esférico, circular, exponencial, lineal, gaussiano o combinaciones de estos, siendo el esférico el más frecuente en minería. El ajuste enfrenta desafíos como la variabilidad de las semivarianzas, anisotropías y fluctuaciones en los datos. Los modelos ajustados en distintas direcciones deben ser consistentes, salvo en casos de anisotropía zonal.

2.2.8. Kriging ordinario

El kriging es una técnica geoestadística que minimiza la varianza de estimación y proporciona el estimador lineal insesgado más preciso. Utiliza una combinación ponderada de muestras cercanas para obtener valores, ajustando el modelo de variograma para calcular

estimaciones en puntos desconocidos y generar niveles de confianza. Existen variantes como el kriging ordinario, simple, de indicador, universal y de probabilidad, que se destacan por su precisión en comparación con otros métodos, como la ponderación por distancia inversa.

Según Sinclair y Blackwell (2006), el proceso de kriging presenta algunas consideraciones clave:

- ✓ Aunque las diferencias entre una estimación de kriging y un valor real pueden ser grandes en un caso aislado, en promedio, las diferencias son menores que con otros métodos.
- ✓ El kriging reproduce con exactitud los datos conocidos en la ubicación de los mismos.
- ✓ Considera la redundancia de datos, y en casos extremos, un pequeño conjunto de datos puede tener el mismo peso que uno único en el centro del grupo.
- ✓ El kriging también puede aplicarse a datos transformados, pero si la transformación no es lineal, la retrotransformación no generará estimaciones óptimas.

El Kriging Ordinario (KO) es un método de estimación espacial que busca predecir valores en lugares donde no se tienen datos, usando un enfoque que minimiza el error de estimación.

El Objetivo principal es Estimar un valor desconocido z∗(u) en un punto u como una combinación lineal ponderada de los valores medidos z(ui) es decir:

$$z^*(u) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z(u_i) + \left[1 - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i\right] * m$$

- Aquí, λi son los pesos asignados a cada punto conocido.
- m es la media local, que en KO se asume constante pero desconocida.

a) Restricción de suma de pesos:

Para garantizar que la estimación sea imparcial, se impone la condición:

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

Esto asegura que la suma de los pesos sea uno, manteniendo la media constante en la estimación.

b) Minimización de la varianza del error:

El método busca minimizar la varianza de error de la estimación, que se expresa como

$$Q(\lambda_i, i = 1, \dots, n, \mu) = \sigma_E^2 + 2\mu \left[\sum_{j=1}^{n} \lambda_i - 1 \right] \dots . . minima$$

- σ_B^2 es la varianza base (error).
- μ es un multiplicador de Lagrange para mantener la restricción de suma de pesos

C) Sistema de ecuaciones para encontrar los pesos

Derivando Q respecto a los pesos λα y el multiplicador μ, obtenemos un sistema de ecuaciones:

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j C(v_j, v_i) + \mu = C(V, v_i), \quad i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1$$

Donde:

- C(vj,vi) es la covarianza entre puntos de muestra.
- C(V,vi) es la covarianza entre el punto a estimar y los puntos de muestra.

D) Cálculo de la varianza de la estimación:

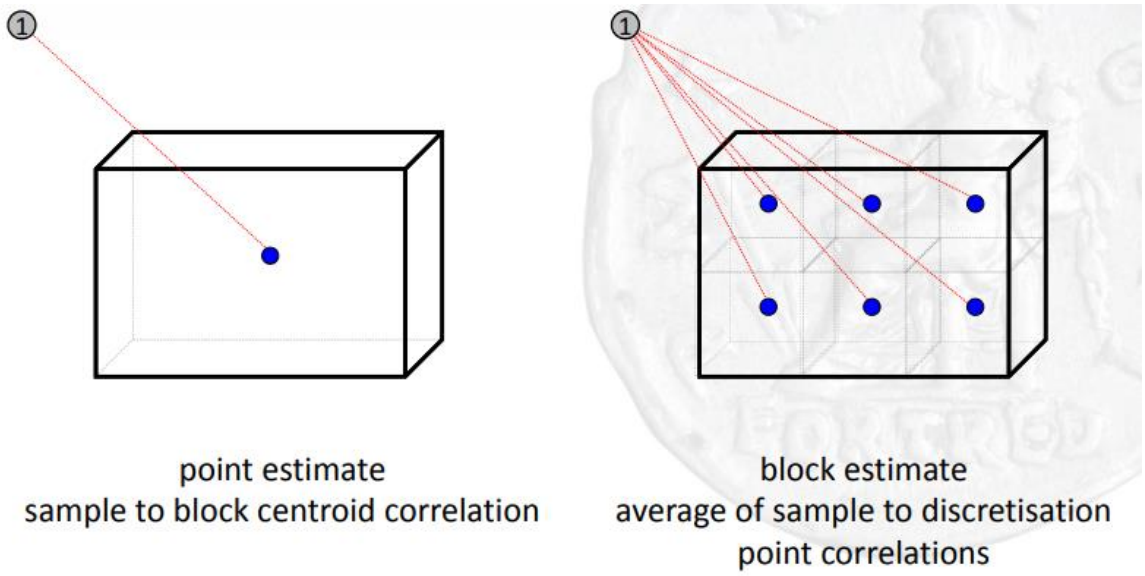
Una vez calculados los pesos λi y el multiplicador μ la varianza del error de estimación es:

$$\sigma_K^2 = C(V,V) - \mu - \sum_{\alpha=1}^{n} \lambda_\alpha C(V, v_\alpha)$$

Esto indica la incertidumbre o error en la predicción.

Figura 7

Muestras ponderadas por variograma.



Nota: Discretización: muestras ponderadas por variograma.

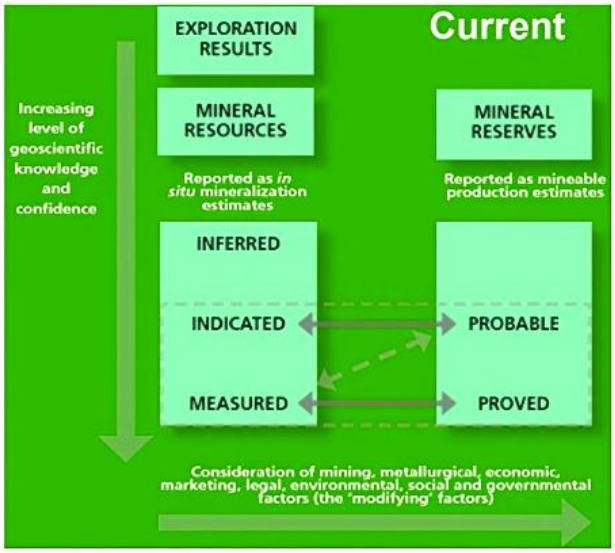
2.2.9. Clasificación de recursos minerales (categorización)

La clasificación es esencial para la gestión sostenible de yacimientos, dependiendo del conocimiento geológico y la confianza en las estimaciones. Según CRIRSCO (2019), los recursos se dividen en inferidos, indicados y medidos. Códigos internacionales como JORC, NI 43-101, SAMREC y guías de la Unión Paneuropea estandarizan esta clasificación. JORC es ampliamente reconocido, y NI 43-101, utilizado en Canadá, establece normas para divulgar recursos y reservas minerales, basándose en definiciones del CIM y el CMMI.

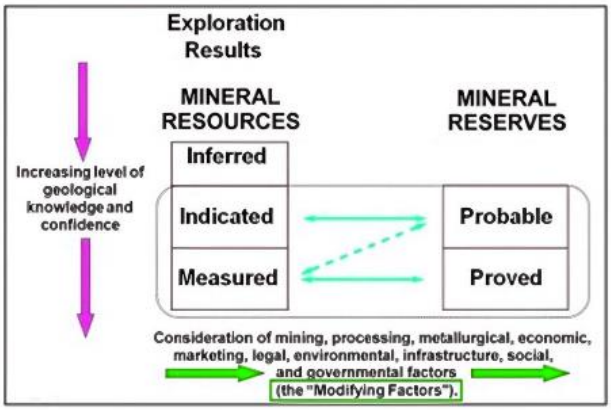
Los organismos responsables de los códigos de reporte de recursos minerales incluyen los siguientes:

Figura 8

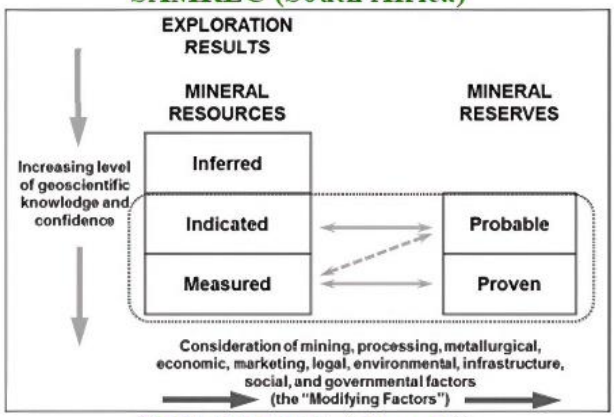
Códigos y normas internacionales de categorización de recursos minerales.



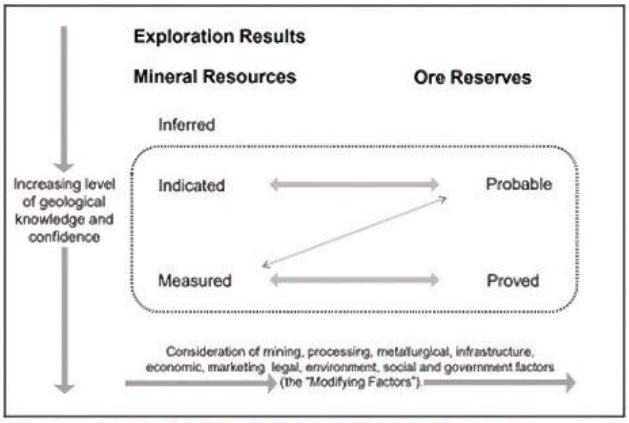
SAMREC (South África)



Código JORC 2012 (Australia)



NI43-101 2013 (Canadá)



The 2014 SME Guide(EE. UU.)

Código CH 20235 (Chile)

Fuente: Adaptación de normas y códigos internacionales más importantes.

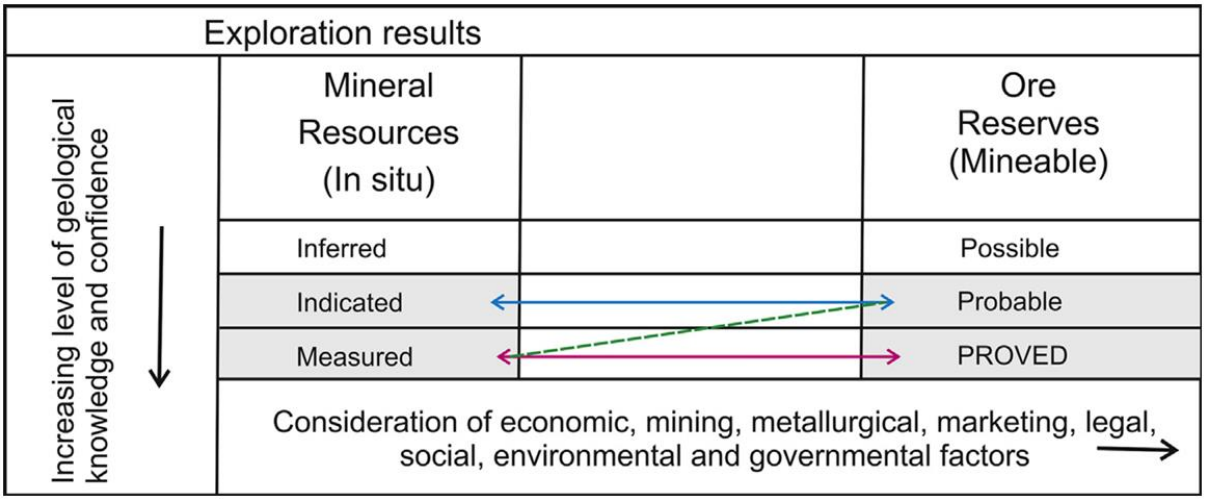
Smith (2020) menciona que la clasificación de recursos minerales es un proceso complejo que integra factores como geología, mineralogía, geometalurgia y economía, fundamental para decisiones sobre la viabilidad de un proyecto minero. Además, el concepto de Persona Calificada (QP) o Competente (CP) ha ganado relevancia. Estos profesionales deben estar acreditados, tener experiencia mínima de cinco años y ser expertos en depósitos similares. Una QP puede clasificar una mineralización como Recurso Mineral Indicado si los datos permiten inferir su continuidad, lo cual es clave para estudios de viabilidad preliminar.

Los Recursos Minerales Inferidos, con menor confianza, no garantizan su conversión a Indicados o Medidos, y su incertidumbre limita su uso en estudios de viabilidad o análisis económicos significativos.

Por otro lado, el recurso incluye las reservas Mineral que son la porción económicamente explotable, respaldada por un Estudio de Factibilidad Preliminar que justifique la extracción económica e incluya factores técnicos, económicos y operativos.

Figura 9

Clasificación de recursos minerales.



Fuente: Joint Ore Reserve Committee (JORC)

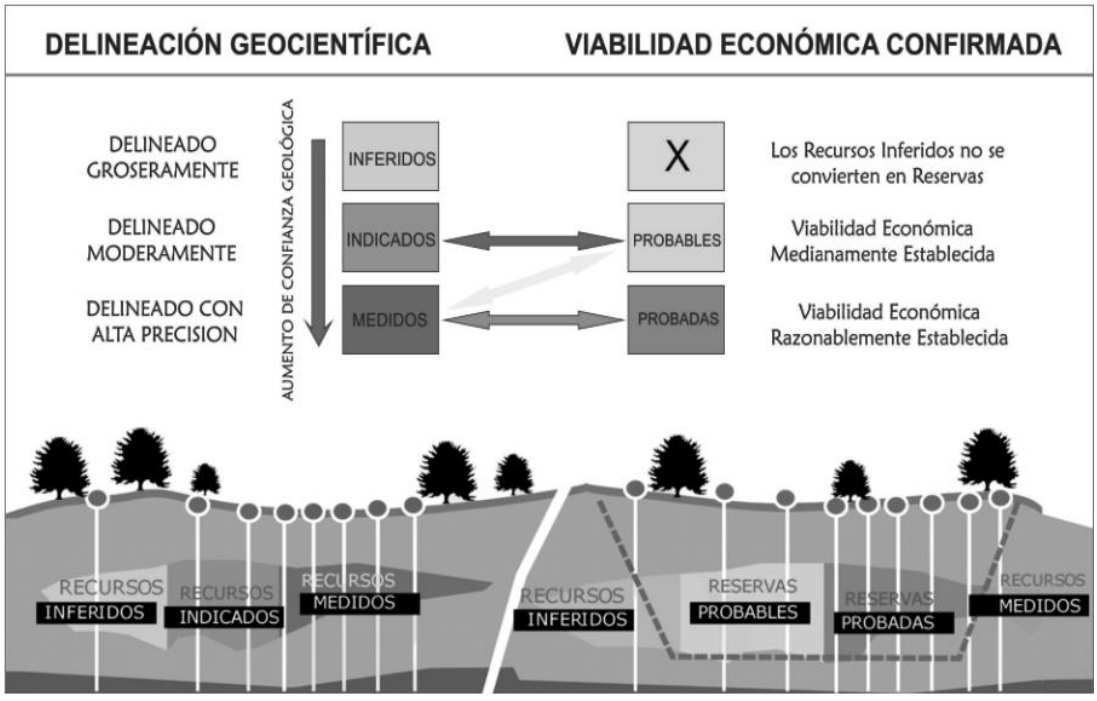
Un **Recurso Inferido** es una estimación preliminar de cantidad y calidad basada en evidencia geológica limitada, con continuidad geológica y de ley asumida pero no verificada (CRIRSCO, 2019, p. 14).

Un **Recurso Indicado** tiene mayor confianza, con suficiente información sobre cantidad, calidad, densidad y características físicas para aplicar parámetros técnicos y económicos, lo que permite la planificación minera y la evaluación de viabilidad económica (CRIRSCO, 2019, p. 16).

Un **Recurso Medido** ofrece el mayor nivel de certeza, con datos completos que permiten estimaciones precisas, respaldando directamente la planificación de producción y evaluación económica del yacimiento (CRIRSCO, 2019, p. 18).

Figura 10

Categorización de recursos y reservas minerales.



Fuente: Reglamento de Calificación de Recursos y Reservas Mineras 046-DIR-ARCOM-2015.

La categorización precisa de los recursos minerales permite minimizar los riesgos financieros y técnicos asociados a los proyectos mineros, facilitando la inversión y el desarrollo

sostenible. Como menciona Craig (2020), "una clasificación errónea puede llevar a sobreestimaciones económicas y decisiones incorrectas en la planificación de un proyecto" (p. 25).

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Recursos Minerales

Son concentraciones naturales de materiales inorgánicos valiosos que pueden extraerse y procesarse para generar productos útiles (Datamine, 2023). Su estimación exacta es esencial para planificar proyectos y optimizar la extracción. Clasificados según la confianza en su estimación, son cruciales para evaluar la viabilidad de proyectos mineros (Hahn et al., 2020).

2.3.2. Geoestadística y su Aplicación en la Minería

Estudia datos espaciales que dependen de su ubicación. En minería, es esencial para estimar recursos minerales a partir de datos limitados y dispersos (Matheron, 1963). El Kriging es el principal método utilizado, ya que estima valores no muestreados tomando en cuenta la variabilidad y autocorrelación espacial (Journel & Huijbregts, 1978). Con el avance de software especializado como Datamine Studio, la geoestadística facilita el análisis espacial, la creación de modelos geológicos y mejora la precisión en la estimación (Datamine, 2023).

2.3.3. Preparación de datos

Viene a ser fundamental para aplicar con éxito el KO. Cada etapa, desde la recopilación hasta la verificación de calidad, debe realizarse con precisión para garantizar resultados confiables que reflejen correctamente la distribución de los recursos minerales. Una correcta preparación asegura que el modelo geoestadístico sea sólido y proporcione estimaciones precisas para la planificación minera (Datamine, 2023).

2.3.4. Cálculo del variograma

El cálculo del variograma es crucial en la estimación mediante el KO. Este proceso modela la dependencia espacial de los datos, permitiendo estimaciones precisas en áreas no

muestreadas. Un variograma ajustado correctamente es fundamental para estimaciones exactas y mejor entendimiento de las características geológicas (Datamine, 2023).

2.3.5. Modelado de la Dependencia Espacial

El software Datamine Studio optimiza la creación del variograma y el ajuste de modelos como esférico, exponencial o gaussiano, para describir adecuadamente la estructura espacial de los datos geológicos. La precisión del modelo de variograma es esencial para obtener estimaciones confiables mediante Kriging, ya que un modelo incorrecto puede generar estimaciones imprecisas y decisiones inadecuadas (Datamine, 2023).

2.3.6. Estimación por kriging

El Kriging Ordinario es una herramienta clave en la estimación de recursos minerales, proporcionando estimaciones precisas y evaluaciones de incertidumbre. Su capacidad para modelar la dependencia espacial entre las muestras lo hace ideal para aplicaciones geológicas y mineras. No obstante, su efectividad está sujeto a la calidad del variograma y la disponibilidad de datos representativos. Con un proceso adecuado de preparación de datos, cálculo del variograma y resolución de las ecuaciones de Kriging, se pueden obtener estimaciones confiables para la planificación minera (Datamine, 2023).

2.3.7. Autocorrelación Espacial

Se refiere a la relación de los valores entre variables en función de su proximidad geográfica, siendo más similares en puntos cercanos que en los distantes (Journel & Huijbregts, 1978). En minería, es fundamental para el Kriging Ordinario, que prioriza las muestras cercanas al realizar estimaciones. Este proceso utiliza el variograma para resolver ecuaciones y obtener estimaciones precisas en puntos no muestreados (Goovaerts, 2001). Herramientas como Datamine Studio mejoran este proceso mediante visualizaciones y algoritmos avanzados (Datamine, 2023).

2.3.8. Incertidumbre en la Estimación

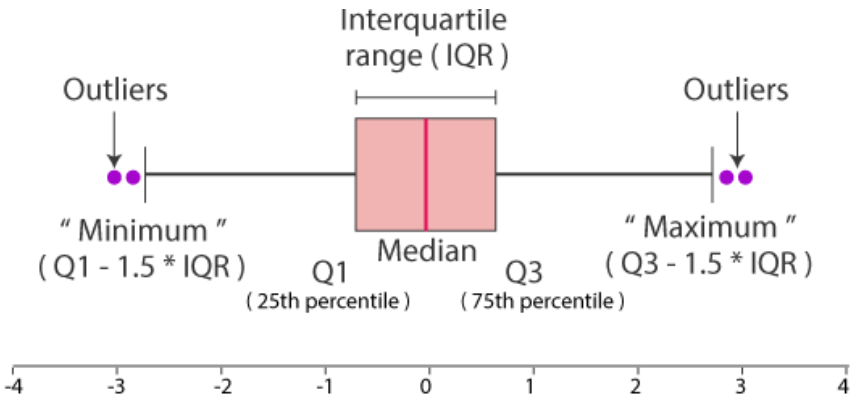
Por medio de esta se origina en los datos y métodos utilizados. En el Kriging Ordinario, la varianza de estimación ayuda a medir esta incertidumbre, lo que permite identificar áreas con mayor fiabilidad y aquellas que necesitan más información para tomar decisiones informadas (Goovaerts, 2001). Programas como Datamine Studio integran esta varianza en los modelos, proporcionando análisis más precisos de los recursos (Datamine, 2023).

2.3.9. Box Plot

Herramienta que visibiliza como está expuesto los datos numéricos por medio de cuartiles, útil para visualizar la variación en un conjunto de datos y permite comparar datos de diferentes categorías de manera efectiva.

Figura 11

Partes del diagrama de caja.



Fuente: Byjus.com. (s.f.)

2.3.10. Validación de los resultados

Es un paso primordial para garantizar que las estimaciones sean precisas y confiables. Mediante la evaluación visual, el análisis de errores y residuos, la evaluación de la varianza del estimador, etc., se puede asegurar que el modelo de Kriging proporciona estimaciones de recursos minerales de alta calidad. La validación también es útil para detectar posibles problemas con el modelo de variograma, lo que permite realizar ajustes necesarios para mejorar la precisión de las estimaciones (Datamine, 2023).

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Método de investigación

El método empleado es científico e inductivo, recolectar, analizar para responder a una hipótesis, las cuales se validan empíricamente. Este enfoque utiliza la lógica inductiva para generalizar resultados adaptándose a nuevos hallazgos (Hernández, 2014).

3.2. Nivel de la Investigación

Según Valderrama (2017), el estudio es de tipo descriptivo correlacional, ya que describe y analiza la relación entre variables sin intervenir en ellas. En este caso, se emplea el método geoestadístico para estimar recursos minerales y analizar su impacto en los informes sobre los mismos.

3.3. Tipo de Investigación

Estudio de tipo aplicado, ya que busca utilizar los conocimientos para resolver problemas concretos (Hernández, 2014), enfocándose en la implementación de un modelo geoestadístico en un caso práctico de minería.

3.4. Diseño de la investigación

Según Hernández (2014), el diseño es no experimental, cuantitativo, retrospectivo y transversal, enfocándose en la recolección, análisis de datos, en un solo instante del tiempo, seguidamente el modelado geoestadístico y validación respectiva.

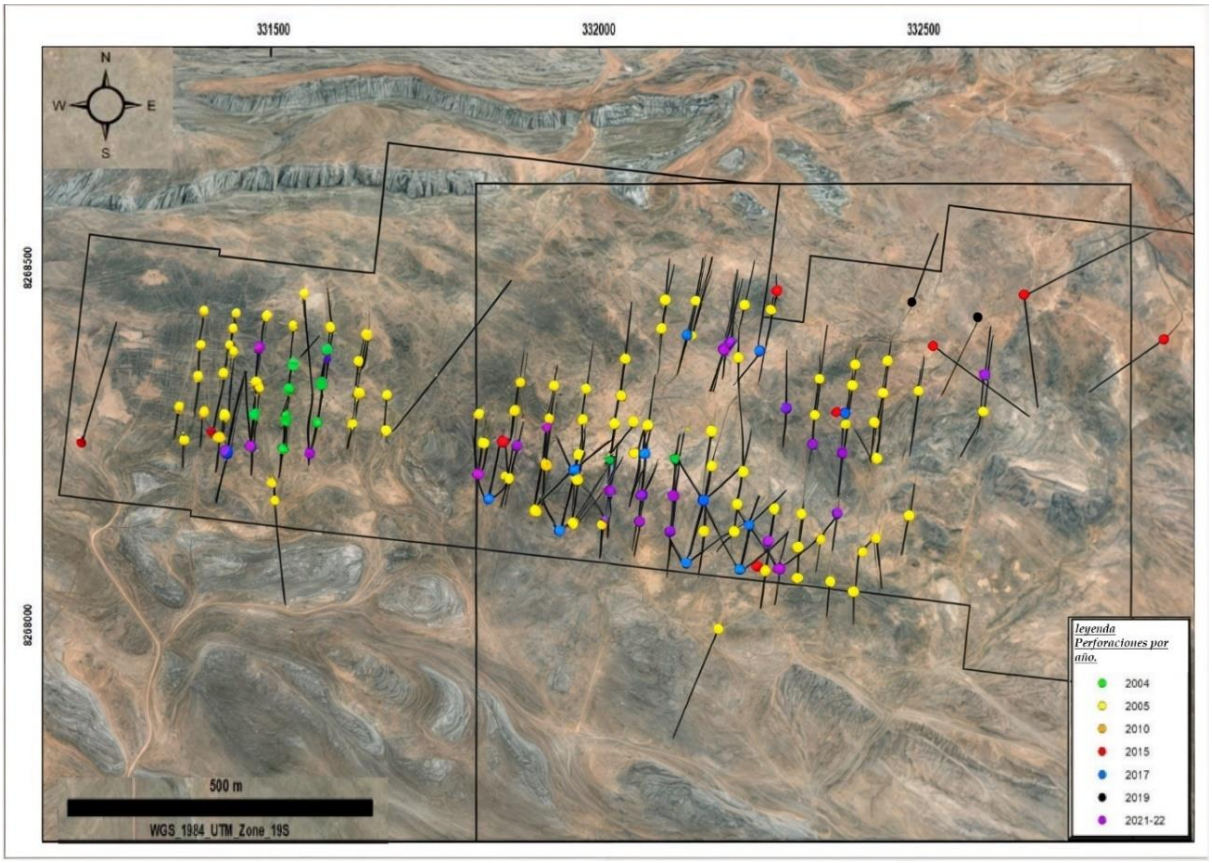
3.5. Población y Muestra

3.5.1. Población

Se utilizo un total de 357 sondeos; de las cuales 262 son sondeos por el método de aire reverso y 95 sondeos de perforación diamantinas haciendo un total de 39,513 metros perforados, teniendo un total de muestras de 37,770 unidades.

Figura 12

Sondeo de perforaciones en el proyecto minero.



*Fuente:*Proyecto Minero Berenguela

3.5.2. Muestra

El tipo de muestreo utilizado es el de tipo censal ya que la muestra se asignó la población de 357 sondeos de estudio; 262 sondeos por el método de aire reverso y 95 sondeos por el método de perforación diamantina haciendo un total de 39,513 metros perforados, teniendo un total de muestras de 37,770 unidades de manera confidencial.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

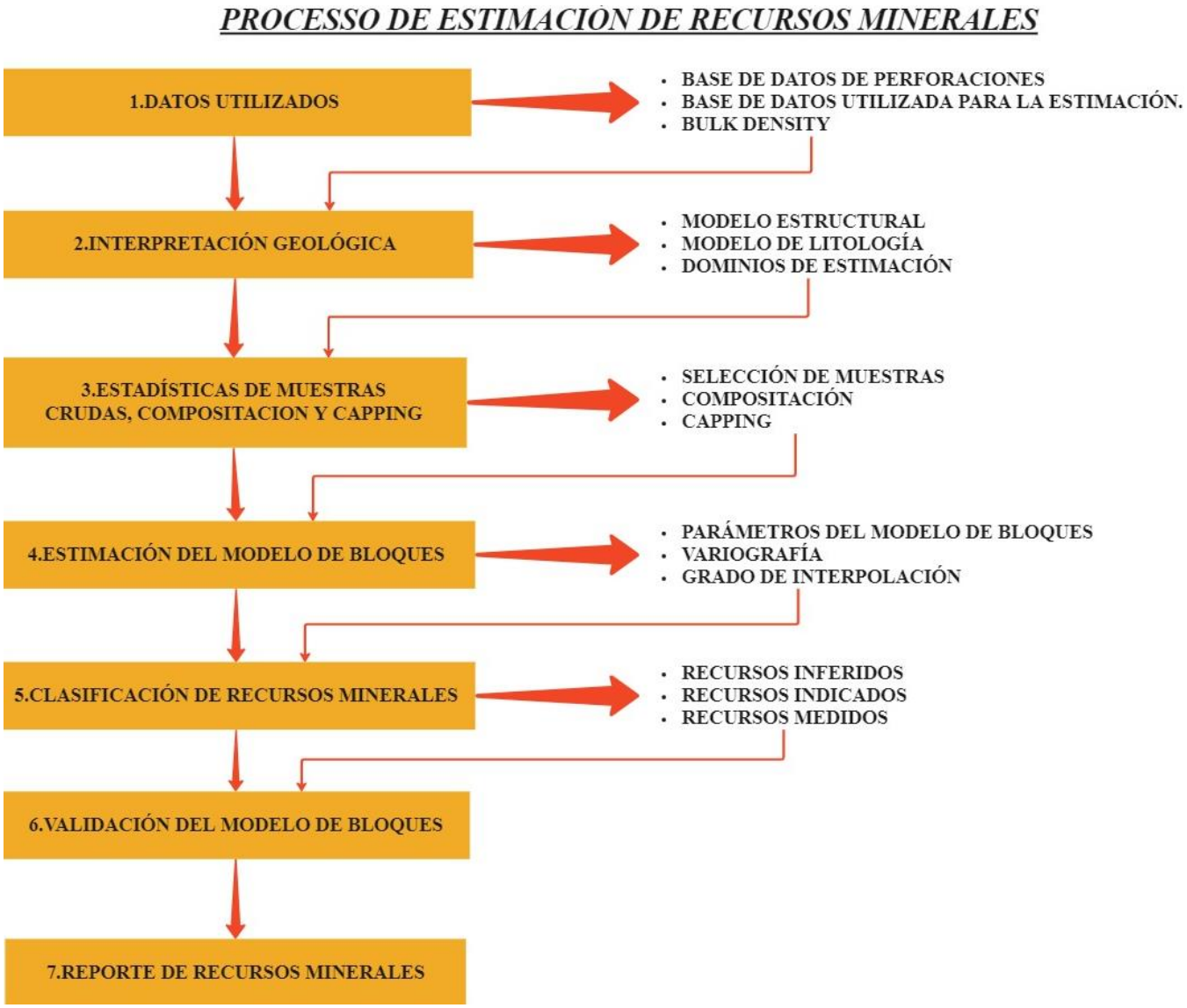
Perforación Diamantina (DD): Utiliza una perforadora de diamante con triple tubo para la extracción y el registro de núcleos. Este método permite obtener muestras de alta calidad para análisis geológicos. Asimismo, para delimitar cuerpos mineralizados, verificar leyes y determinar recursos en yacimientos. Este método proporciona muestras casi inalteradas.

Perforación Aire-Reverso (RC): Emplea una perforadora de aire reverso para obtener registros de roca que se recolectan en bandejas. Este metodo para identificar la presencia de cuerpos minerales, estimar su tamaño, determinar su ley y evaluar las condiciones geológicas, como litología, alteración, mineralización y estructuras.

Topografía y Localización: Se utiliza un sistema GPS diferencial para ubicar de manera precisa los pozos de perforación y otras estructuras. Esta técnica asegura la exactitud en la ubicación y la trazabilidad de las actividades de perforación.

Figura 13

Proceso de estimación de recursos minerales por el método geoestadístico.



Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos

Se utilizaron una ficha para registrar datos superficiales y otra para las muestras obtenidas en los sondeos. Estos datos permitieron crear estructuras litológicas con el software LeapFrog ©, que restringió la interpolación. Además, se empleó el programa Datamine para la estimación de recursos minerales mediante el método KO.

3.6.3. Procesamiento y presentación de datos

La creación del modelo geológico de bloques se realiza utilizando el software LeapFrog © con los registros obtenidos. Posteriormente, se empleó el programa DataMine para integrar los resultados de las pruebas químicas. Con esta información, se realiza un estudio variográfico para estimar y categorizar los recursos. El EDA se aplica para conocer la distribución de los datos en Assay y Compósitos, utilizando gráficos como Box Plot y Probabilidad Acumulada. Se generan histogramas para evaluar los modelos y se valida la distribución de los datos con la variable EType de Summit de DataMine. Finalmente, se realizan veinte realizaciones por dominio de recursos, basadas en leyes de plata, y se comparan con modelos de secciones de planta representativas. Se interpretan los resultados mediante gráficos como Swath Plot y Curvas de Tonelaje Ley por dominio.

CAPITULO IV

ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES MEDIANTE EL MÉTODO GEOESTADÍSTICO

4.1. Exposición de datos

La discusión siguiente se basa en una revisión independiente realizada por QP de las bases de datos de QA/QC relacionadas con los programas de QA/QC anteriores a 2021 y los programas de QA/QC de 2021-2022 completados por Aftermath. Los programas Aftermath se dividen en seis categorías diferentes, de las cuales cuatro son pertinentes para los datos del modelo de bloque.

Un resumen de las muestras de QA/QC analizadas para cada programa se encuentra en la Tabla 2. La Tabla 3 detalla un resumen de la tasa de inserción de muestras de QA/QC. Los resúmenes están tabulados en función del año, del tipo de perforación y de la empresa.

Tabla 2

Muestras de control de calidad por año

Año	Empresa	Tipo de Perforación	N° de Muestras de Perforación	MRCs	Blancos	Duplicados de campo	Duplicados gruesos	Duplicado de finos	Muestras árbitro
2004-2005	Silver Standard	RC	18,483	948	1,048	524	-	-	559
2010		DD	1,620	95	94	92	-	-	-
2015		DD	1,520	28	40	38	-	-	-
2017	Valor	RC	8,465	148	99	198	-	-	-
2019	Rio Tinto	DD	705	41	36	24	-	-	-
sub-total			**30,793**	**1,260**	**1,317**	**876**	**0**	**0**	**559**
2021-2022	Aftermath	DD	5,876	441	441	294	-	-	-
		RC	1,206	92	30	-	-	-	-
		RC	1,425	71	144	-	72	-	-
		RC	208	11	20	-	11	-	-
sub-total aftermath			**8,715**	**615**	**635**	**294**	**83**	**0**	**0**
total			**39,508**	**1,875**	**1,952**	**1,170**	**83**	**0**	**559**

Fuente: Elaboración propia

NOTA: Existen pequeñas variaciones en el número de análisis entre la plata y otros elementos analizados

Tabla 3

Ratios de control de calidad de muestras

Año	Empresa	Tipo de Perforación	Muestras de Perforación	MRCs	Blancos	Duplicados de campo	Duplicados gruesos	Duplicado de finos	Muestras árbitro
2004-2005	Silver Standard	RC	18,483	5.00%	6.00%	3.00%	-	-	3.00%
2010		DD	1,620	6.00%	6.00%	6.00%	-	-	
2015		DD	1,520	2.00%	3.00%	3.00%	-	-	-
2017	Valor	RC	8,465	2.00%	1.00%	2.00%	-	-	-
2019	Rio Tinto	DD	705	6.00%	5.00%	3.00%	-	-	-
2021-2022	Aftermath	DD	5,876	8.00%	8.00%	5.00%	-	-	-
		RC	1,206	8.00%	2.00%		-	-	-
		RC	1,425	5.00%	10.00%		5.00%	-	-
		RC	208	5.00%	10.00%		5.00%	-	-

Fuente: Elaboración propia

NOTA: El recuento de campos duplicados incluye todos los identificadores de muestra enviados, ya sea que se devolvieran resultados válidos o no.

4.2. Control de calidad de datos de muestreo

4.2.1. Material de referencia certificada

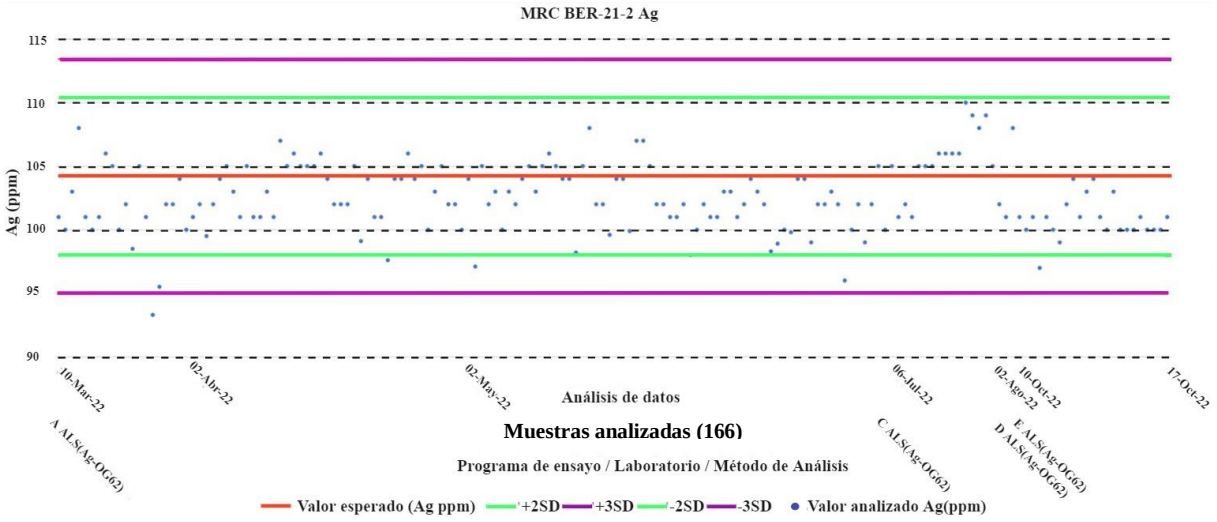
Se envió 711 muestras de cinco MRCs a diez laboratorios para análisis con técnicas ICP-OES e ICP-MS. Los MRCs provienen de minerales de alta ley de manganeso-cobre-plata y cobre, además de una muestra de Berenguela. La tasa de inserción de MRC recomendada es del 5-6%, y los programas de Aftermath cumplen con esta norma. Se sugiere usar al menos tres MRC con valores ajustados al depósito mineral. Si dos MRC están fuera de dos desviaciones estándar o uno fuera de tres, se deben realizar nuevos análisis.se utiliza gráficos de control para monitorear el rendimiento.

El siguiente gráfico de control muestra los resultados del análisis de la concentración de plata (Ag) en una muestra. El eje vertical indica la concentración en ppm, y el eje horizontal representa los puntos de análisis. Se incluyen líneas de control: roja (valor esperado), verde y morada (+2SD y -2SD), y negras (±3SD). Los puntos azules representan los resultados obtenidos. Si los puntos caen dentro de los límites de ±2SD, los resultados son consistentes; si están fuera de ±3SD, se consideran anómalos. Este gráfico ayuda a monitorear la estabilidad y precisión del análisis.

Este gráfico es un control de calidad estadístico (gráfico de control tipo Shewhart) del análisis de plata (Ag) en una muestra de referencia certificada (MRC BER-21-2 Ag). Se observan los valores de Ag analizados en distintos días por varios laboratorios (ALS y C. ALS), con comparaciones a los límites de control estadístico.

Figura 14

Control de MRC BER-21-2 (Ag)



Fuente: Elaboración propia

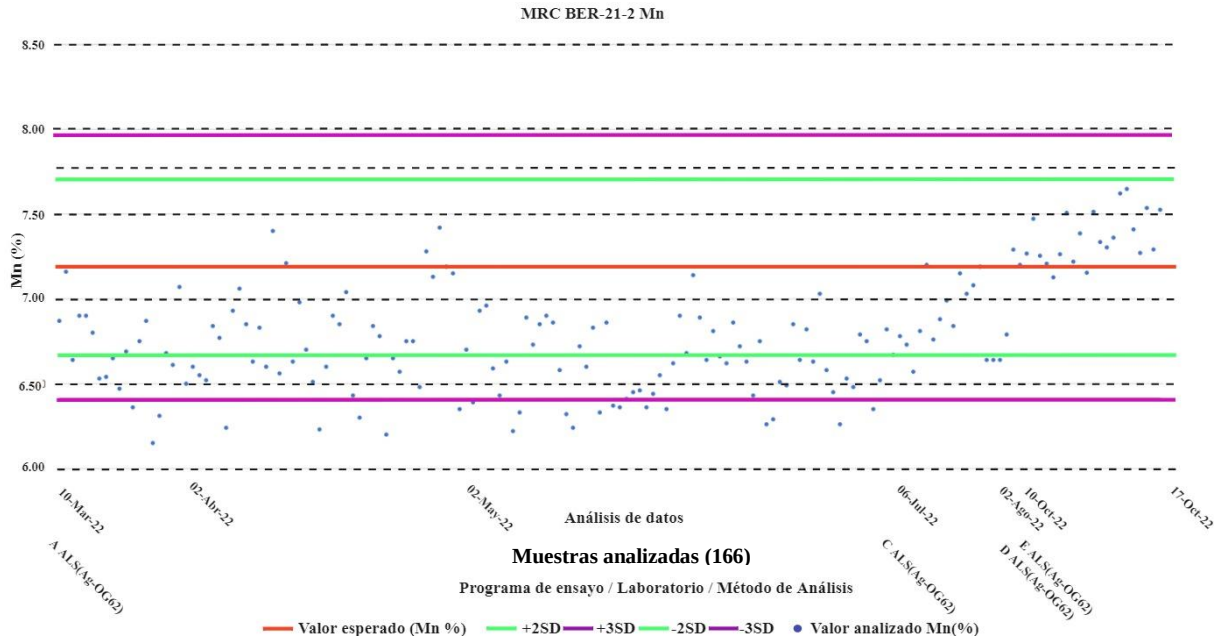
Nota: Este MRC tiene un sesgo bajo para la plata, ya que demuestra estabilidad en las mediciones, con pequeñas fluctuaciones que están dentro de los márgenes esperados. La línea roja representa el valor esperado de la concentración de plata, alrededor de 105 ppm. Este es el valor promedio que se espera en todas las mediciones.

Los resultados de Mn muestran inicialmente una distribución aceptable alrededor del valor esperado (≈ 7.20 %), con la mayoría de datos entre ±2SD (≈ 6.45 % a 7.95 %). Sin embargo, a partir del 10 de octubre de 2022, se observa una tendencia creciente de los valores, alcanzando incluso valores cercanos o superiores al límite superior de control estadístico (+2SD y +3SD).

Desde esa fecha, se observa una tendencia ascendente clara, con varios puntos por encima del valor esperado y acercándose al límite de +3SD (≈ 7.90 %).

Figura 15

Control de MRC BER-21-2 (Mn)



Fuente: Elaboración propia

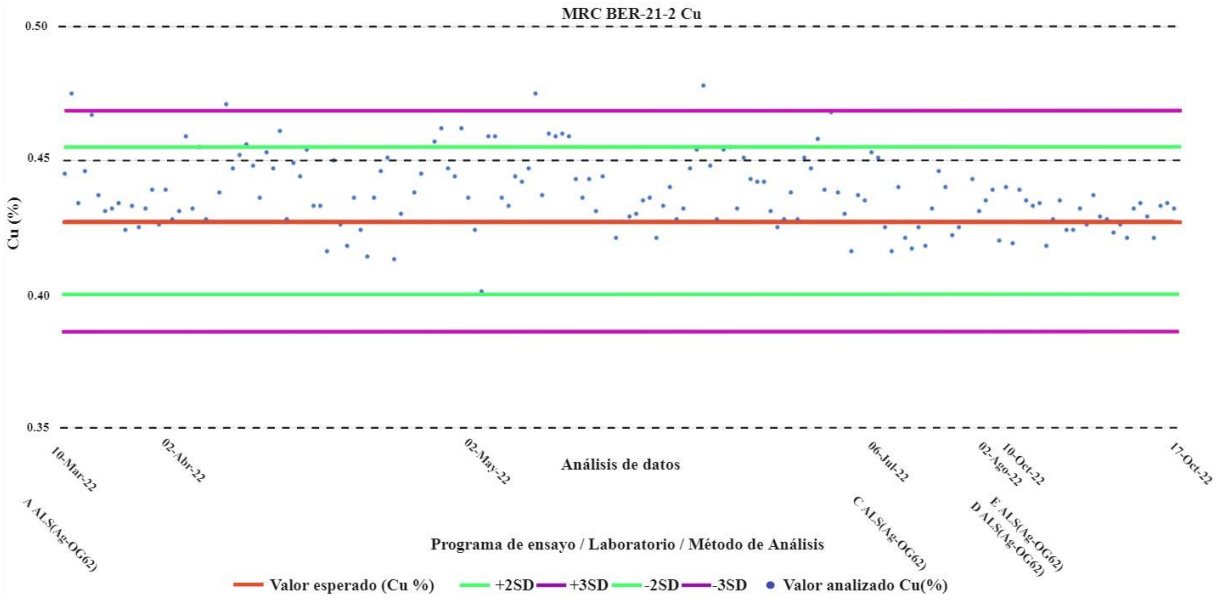
Nota: Este MRC tiene un sesgo bajo para manganeso, donde el proceso de medición de manganeso está bajo control, con la mayoría de los resultados dentro de los límites esperados.

El siguiente gráfico de control demuestra que los valores analizados para el porcentaje de cobre (Cu %) en las muestras se encuentran dentro de los márgenes de variabilidad aceptables (±3SD) y no presentan ningún valor fuera de los límites establecidos. La estabilidad del proceso es evidente, con pequeñas fluctuaciones que no indican una desviación significativa del valor esperado.

Los resultados del análisis de Cobre (Cu) para la muestra de referencia MRC BER-21-2 se mantienen dentro de los límites estadísticamente aceptables, con una clara concentración de puntos entre ±2SD respecto al valor esperado (≈ 0.43 %). No hay indicios de sesgo sistemático ni de problemas con los procedimientos de análisis.

Figura 16

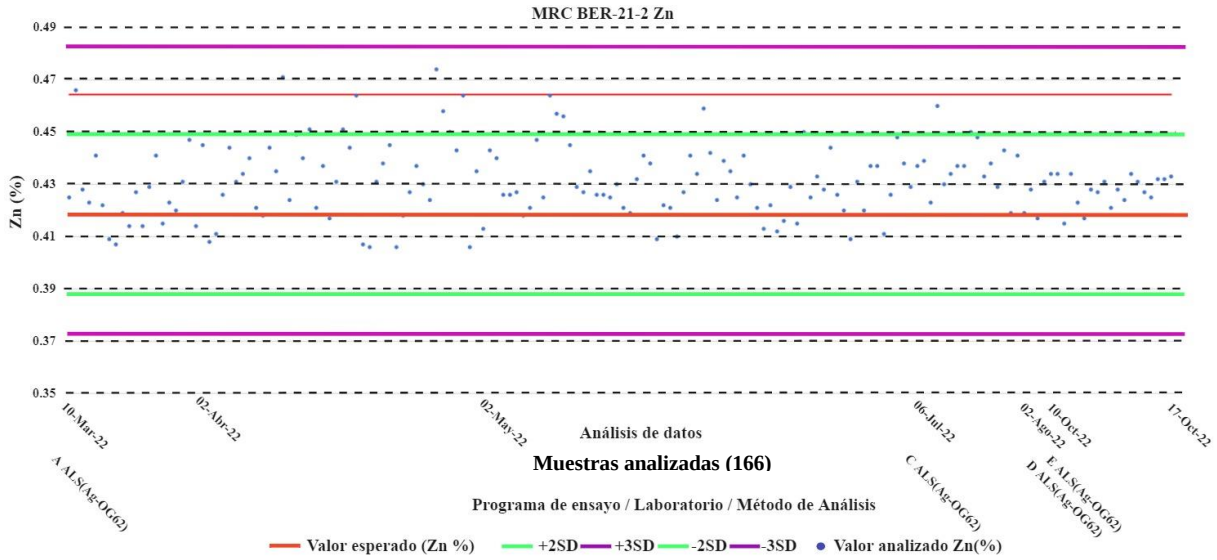
Control de MRC BER-21-2 (Cu)



Fuente: Elaboración propia

Figura 17

Control de MRC BER-21-2 (Zn)



Fuente: Elaboración propia

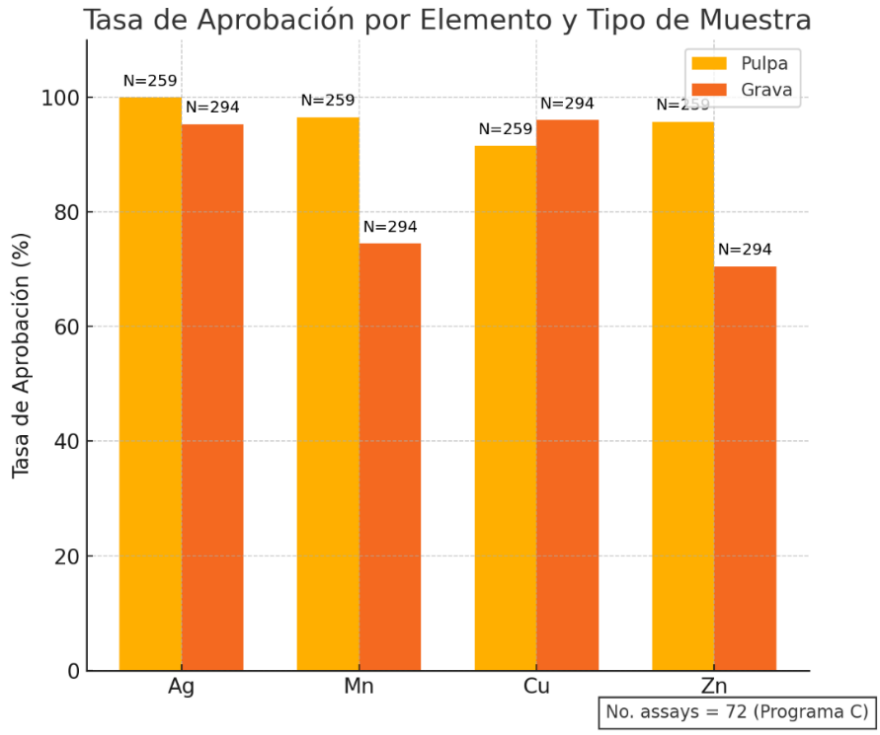
Nota: El proceso de medición para Zinc muestra una buena estabilidad.

4.2.2. Muestras en Blanco

En el ámbito minero, las "muestras en blanco" sirven como control para monitorear posibles contaminaciones o interferencias durante el proceso de muestreo y análisis de minerales. Estas muestras, aunque no contienen el mineral de interés, se analizan de la misma manera que las muestras reales, lo que permite identificar y corregir cualquier tipo de contaminación al comparar los resultados. En este trabajo, se emplean "Pulp blank", que son muestras con el líquido de transporte sin el mineral, para asegurar que no haya contaminaciones durante la preparación de las muestras y mantener la precisión de los análisis.

Figura 18

Desempeño de Aprobación por Elemento (%)



Fuente: Elaboración Propia

Se observa que para plata (Ag) la tasa es casi perfecta en ambos casos. Sin embargo, para manganeso (Mn) y zinc (Zn) la grava muestra menor aprobación, indicando un desafío mayor en estos elementos para ese tipo de blanco.

4.2.3. Duplicado de muestras

El duplicado de muestras implica tomar muestras adicionales que son iguales a las iniciales, con el objetivo de implementar controles de calidad (QA/QC) en las minas y laboratorios, y medir el error en los procesos de preparación y análisis. Este proceso garantiza que los datos utilizados en la exploración y operación minera sean precisos y confiables. El gráfico ilustra cómo las mediciones duplicadas pueden mostrar la consistencia de los resultados y evaluar la calidad de los datos en la minería.

Tabla 4

Resumen del desempeño de los duplicados de campo en el programa

Elemento	ME-ICP61 (LDL / PDL)	Número de ensayos	Ensayos > 15*LDL / PDL	% Muestras < 25% RPD	Promedio Original	Promedio Duplicado	Sesgo (%)
Ag ppm	0.5	294	274	91.97	125.39	123.87	-1.23
Mn %	0.006	294	291	97.59	10.07	10.08	0.1
Cu %	0.0004	294	284	92.25	0.52	0.87	0.48
Zn %	0.0006	294	268	98.51	0.52	0.51	-0.45

Fuente: Elaboración Propia

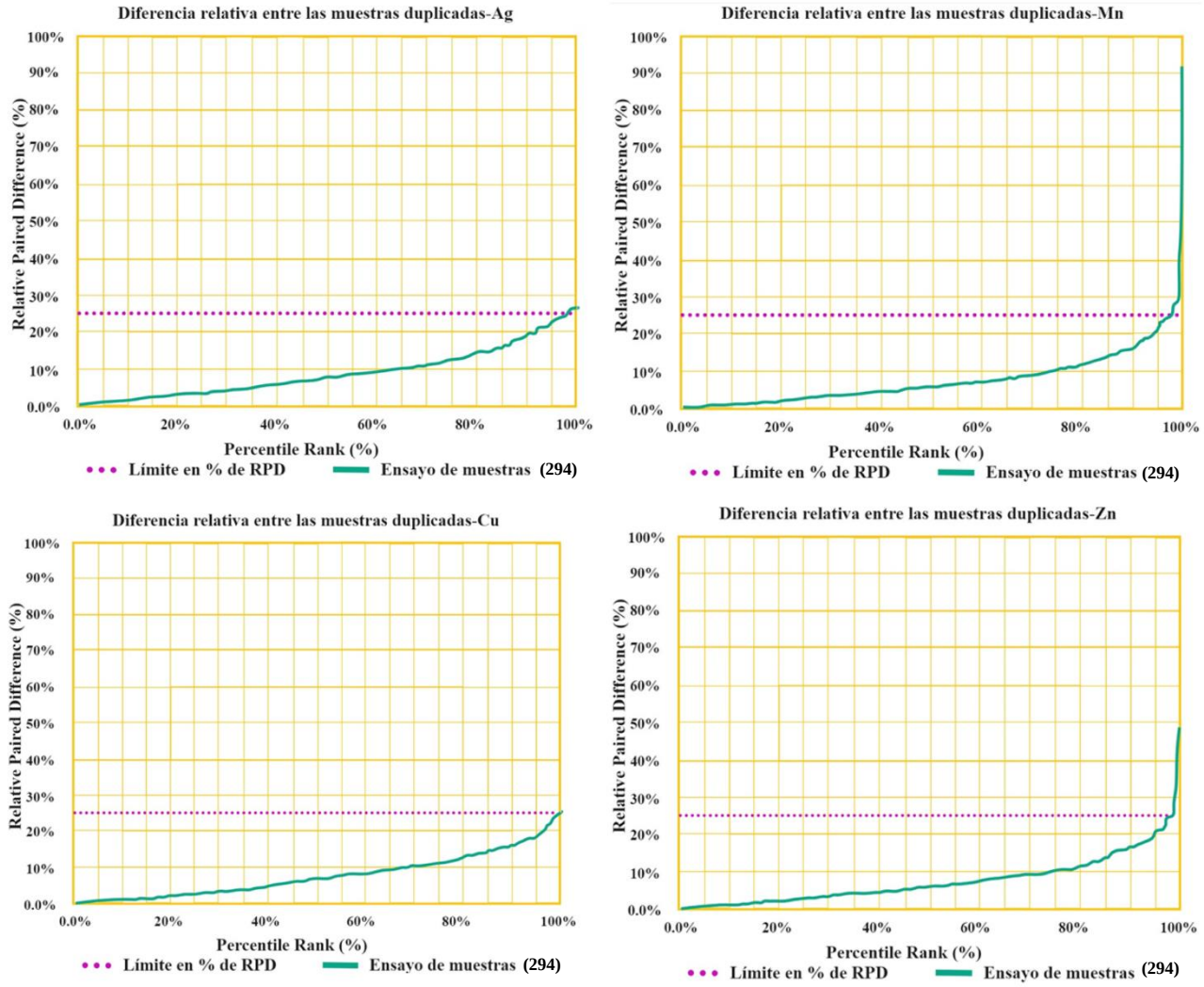
La tabla anterior muestra una buena consistencia en la mayoría de los análisis, con un alto porcentaje de muestras (por encima del 90%) que tienen una diferencia relativa de precisión inferior al 25%, lo que sugiere que los resultados son precisos y confiables. Sin embargo, los sesgos observados (especialmente en el caso del cobre y la plata) deben ser monitoreados. Los sesgos negativos en plata y zinc indican una ligera subestimación en las muestras duplicadas, mientras que el sesgo positivo en cobre indica una ligera sobreestimación. Estos resultados sugieren que los procedimientos de muestreo y análisis son generalmente buenos, pero es importante seguir evaluando y ajustando los métodos para reducir cualquier desviación.

A continuación, se muestran gráficos representativos de lo gráficos muestran la diferencia relativa entre las muestras duplicadas para Ag, Mn, Cu y Zn, donde la mayoría de los valores de RPD están por debajo del límite aceptable (línea punteada morada),

especialmente para Ag, Cu y en gran parte para Zn. Esto indica que las muestras duplicadas tienen una buena reproducibilidad y poca variabilidad para esos minerales.

Figura 19

Gráfico RPD de Muestras duplicadas de campo para el mineral de Ag, Mn, Cu y Zn.



Fuente: Elaboración propia

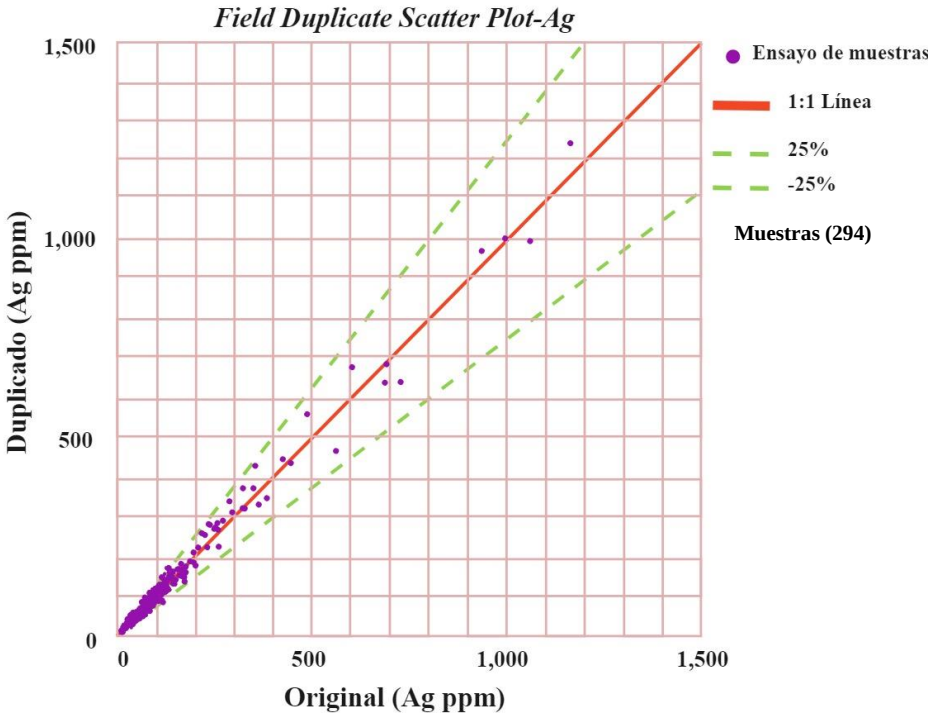
Nota: Una baja diferencia porcentual relativa indica una alta consistencia entre las muestras duplicadas, lo que sugiere una mayor confiabilidad en los datos obtenidos, Asimismo, El límite de RPD del 30% sirve como referencia para evaluar la confiabilidad de los resultados; si la diferencia entre las muestras duplicadas es superior a este límite, se considera que los ensayos no cumplen con los estándares de precisión. Se calcula comparando los resultados de

dos análisis de la misma muestra. Un valor de RPD bajo indica una alta precisión, mientras que un valor alto indica una baja precisión.

Según los siguientes gráficos de dispersión de la figura 20, 21, 22 y 23 de diferente mineral, cuando se toman muestras duplicadas en el campo (es decir, dos o más muestras tomadas en el mismo lugar y momento), se espera que proporcionen mediciones similares si el proceso de muestreo y análisis es preciso y consistente. Estos gráficos muestran cómo las mediciones se comparan entre muestras duplicadas. Los puntos del gráfico deberían estar cerca de una línea diagonal, indicando una fuerte correlación y una baja variabilidad entre las muestras duplicadas. Sin embargo, una gran dispersión en los puntos del gráfico puede indicar problemas con el desarrollo o análisis de muestreo.

Figura 20

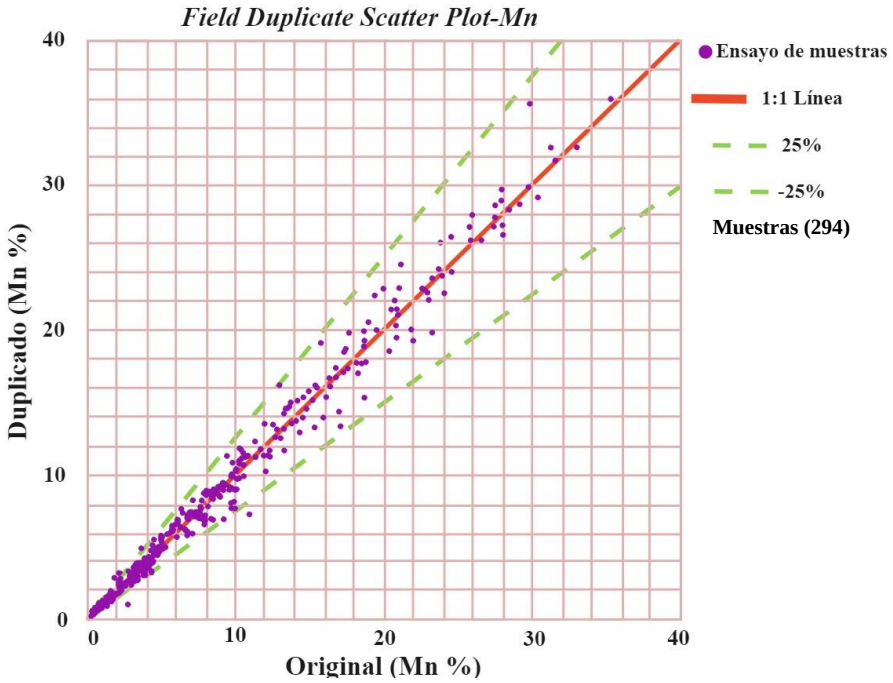
Scatter plots de datos duplicados de campo del mineral de Ag



Fuente: Elaboración propia

Figura 21

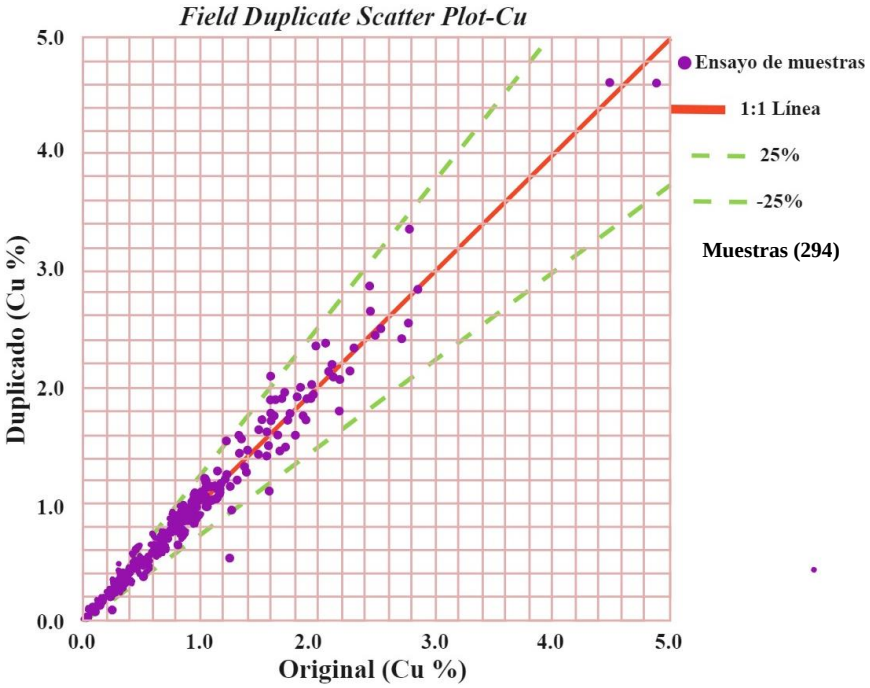
Scatter plots de datos duplicados de campo del mineral de Mn



Fuente: Elaboración propia

Figura 22

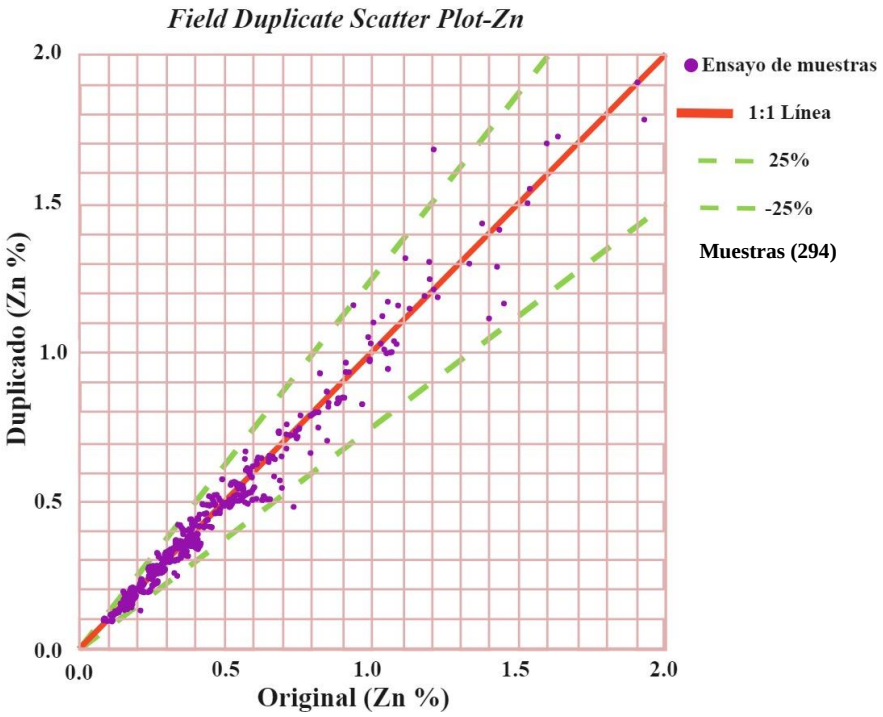
Scatter plots de datos duplicados de campo del mineral de Cu



Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Scatter plots de datos duplicados de campo del mineral de Zn



Fuente: Elaboración propia

Los gráficos de dispersión muestran que las mediciones de los cuatro elementos (plata, manganeso, cobre y zinc) tienen una alta precisión y una buena concordancia entre las muestras originales y duplicadas. La mayoría de los resultados caen dentro de los límites de error aceptables (±25%), indicando que el proceso de análisis es confiable y que la calidad del muestreo y los análisis es sólida. En general, no se observan anomalías significativas en los duplicados de campo, lo que sugiere que el proceso de muestreo y análisis es robusto y consistente.

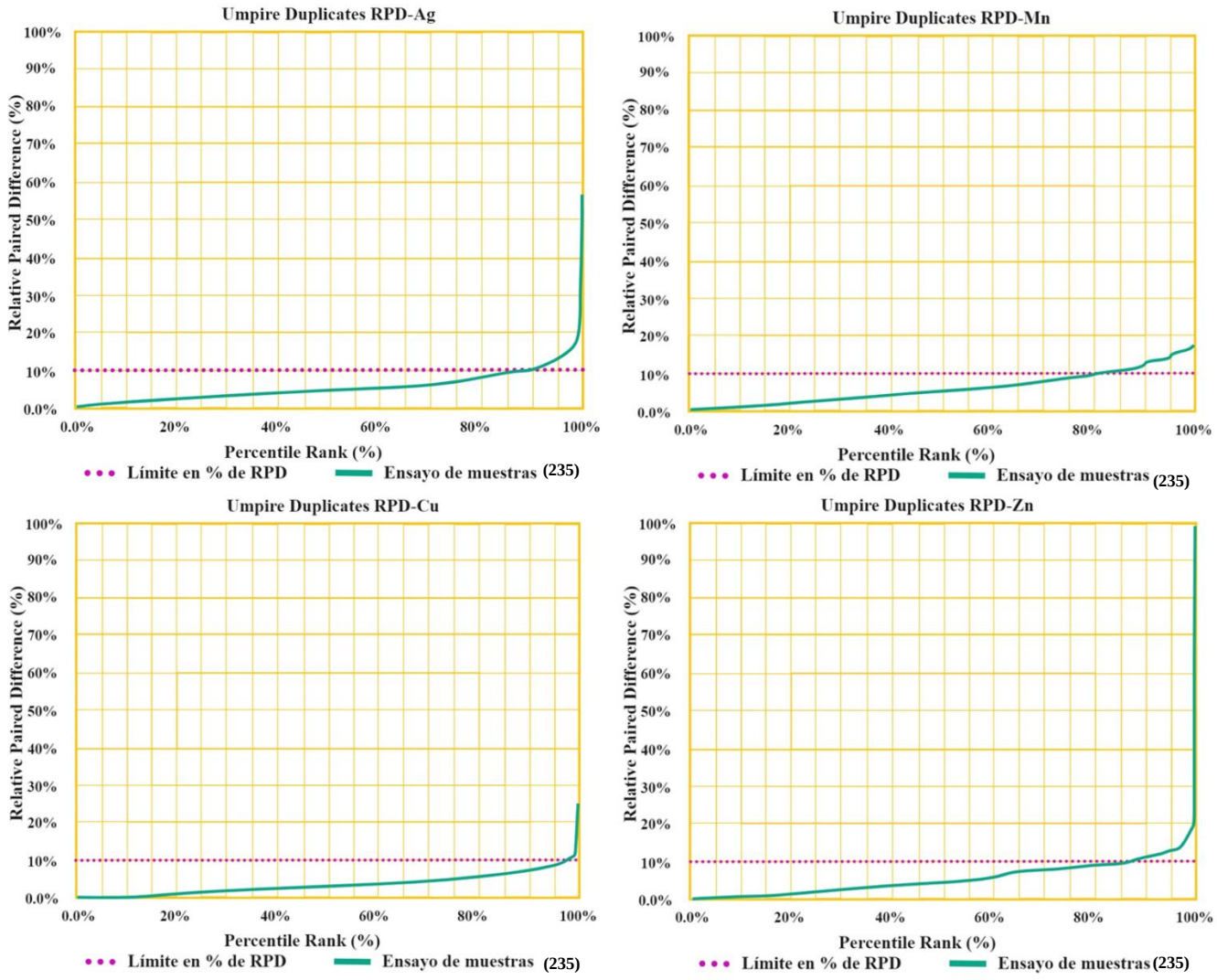
4.2.4. Ensayos de Árbitro

Durante el análisis de una muestra de mineral, se divide en varias partes que se envían a laboratorios independientes, conocidos como "Umpire Laboratories", para su análisis. Los resultados obtenidos se comparan para verificar la imparcialidad y exactitud en la evaluación. Este proceso ayuda a asegurar la precisión en la determinación del valor del mineral y

minimizar los errores. Los análisis son realizados por laboratorios independientes como Bureau Veritas y SGS, los cuales son un total de 235 ensayo de muestras. Si las diferencias en los resultados superan ciertos límites, se asigna un árbitro para realizar un análisis adicional. Esto tiene como fin evaluar la precisión de los laboratorios locales, asegurar la transparencia, y corregir posibles errores o sesgos.

Figura 24

Muestras Duplicadas de una Referencia Estándar (Umpire)-Ag-Mn-Cu-Zn



Fuente: Elaboración propia

Nota: La mayoría de los ensayos para los elementos analizados (Ag, Mn, Cu y Zn) presentan una buena precisión, estando las diferencias relativas (RPD) mayoritariamente por

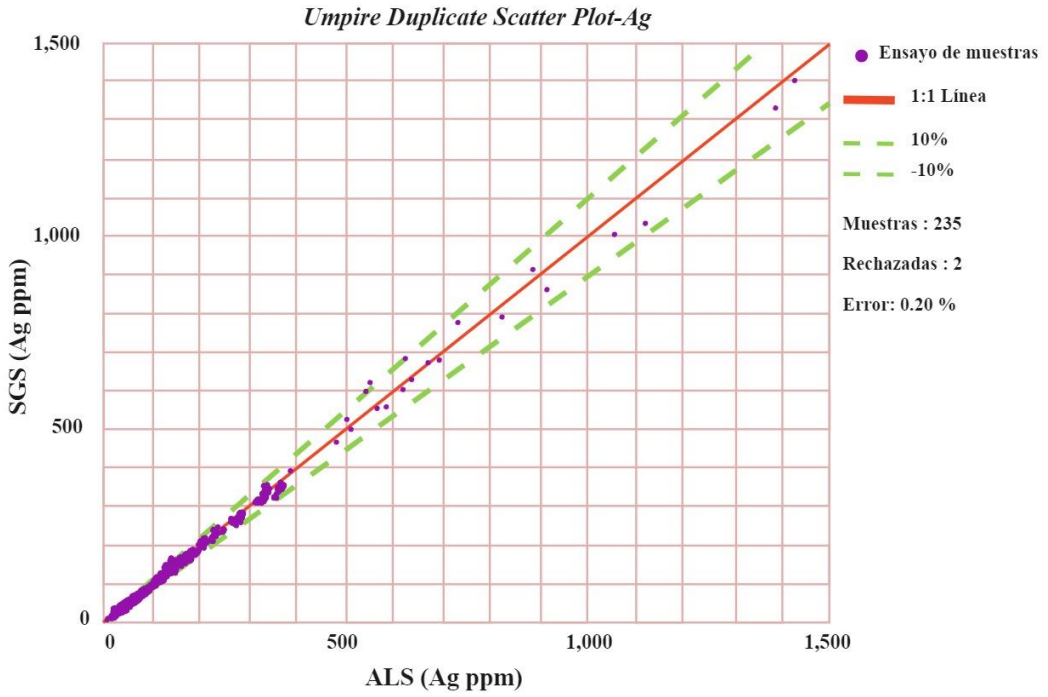
debajo del límite del 10%. No obstante, especialmente en los valores extremos (últimos percentiles), se observan algunas inconsistencias significativas, principalmente en Zn, y en menor grado en Ag y Cu. Esto sugiere que podrían existir algunas condiciones o errores puntuales durante la toma o análisis de estas muestras que deberían ser objeto de atención especial para mejorar aún más la calidad de los resultados.

El diagrama de dispersión demuestra una fuerte correlación entre los resultados de la muestra original de umpire y los resultados de sus duplicados, lo que indica una alta precisión de las mediciones. Para evaluar la comparabilidad de sus métodos de análisis, se compararon los diagramas de dispersión de duplicados de umpire de varios laboratorios.

Asimismo, en los siguientes gráficos 25, 26, 27 y 28 se puede observar los resultados de este análisis se han representado en un diagrama de dispersión para visualizar la relación entre los resultados de la muestra original de umpire y los resultados de sus duplicados.

Figura 25

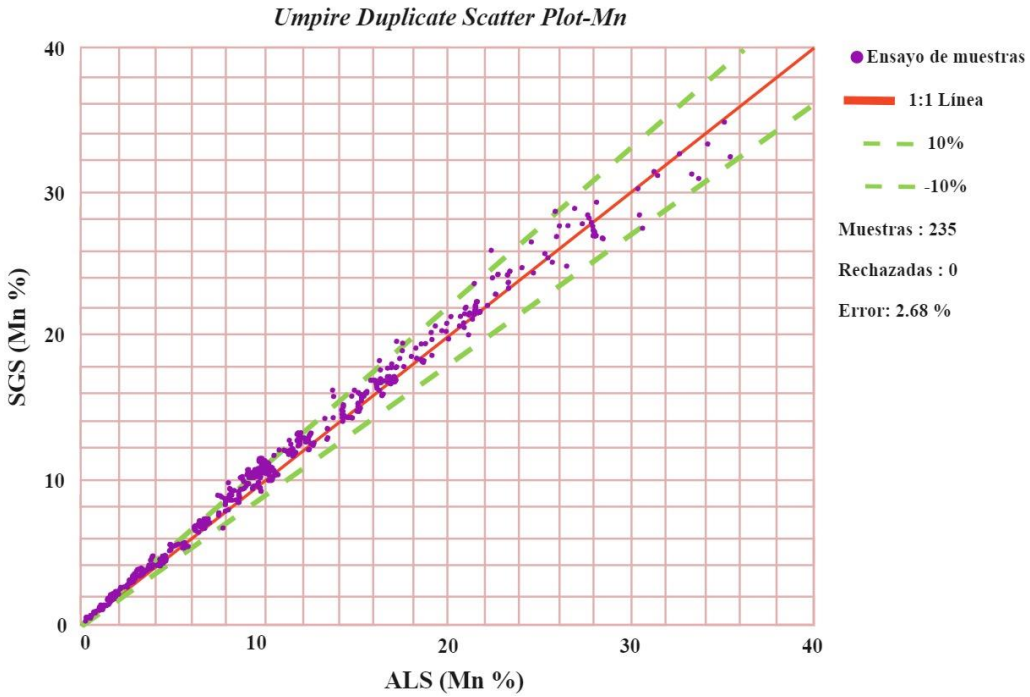
Diagrama de dispersión de duplicados de Umpire-Ag



Fuente: Elaboración propia

Figura 26

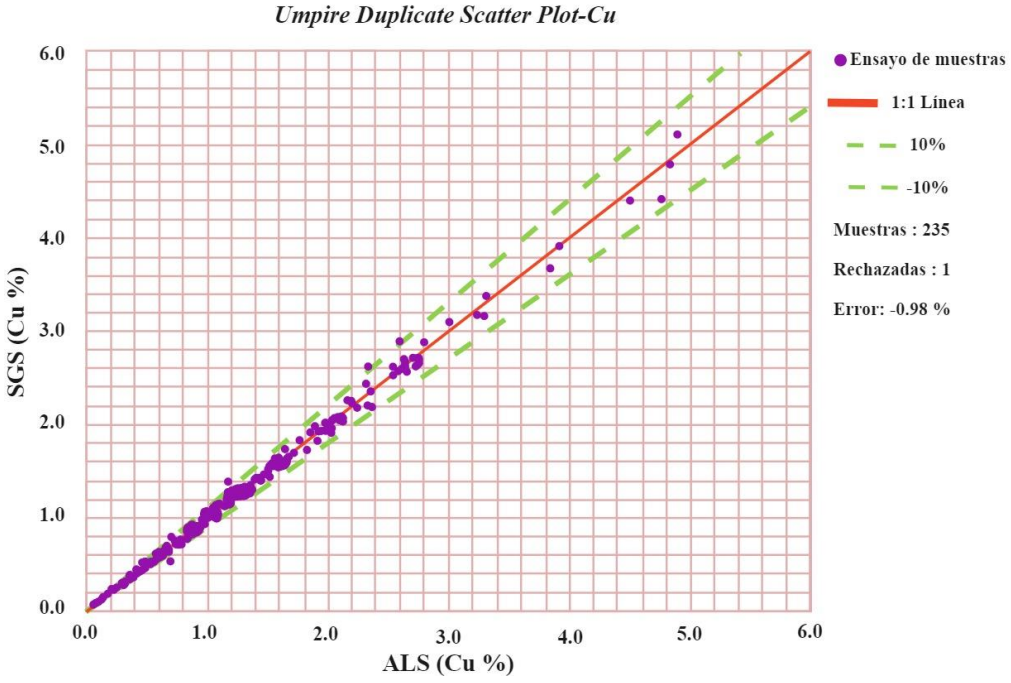
Diagrama de dispersión de duplicados de Umpire-Mn



Fuente: Elaboración propia

Figura 27

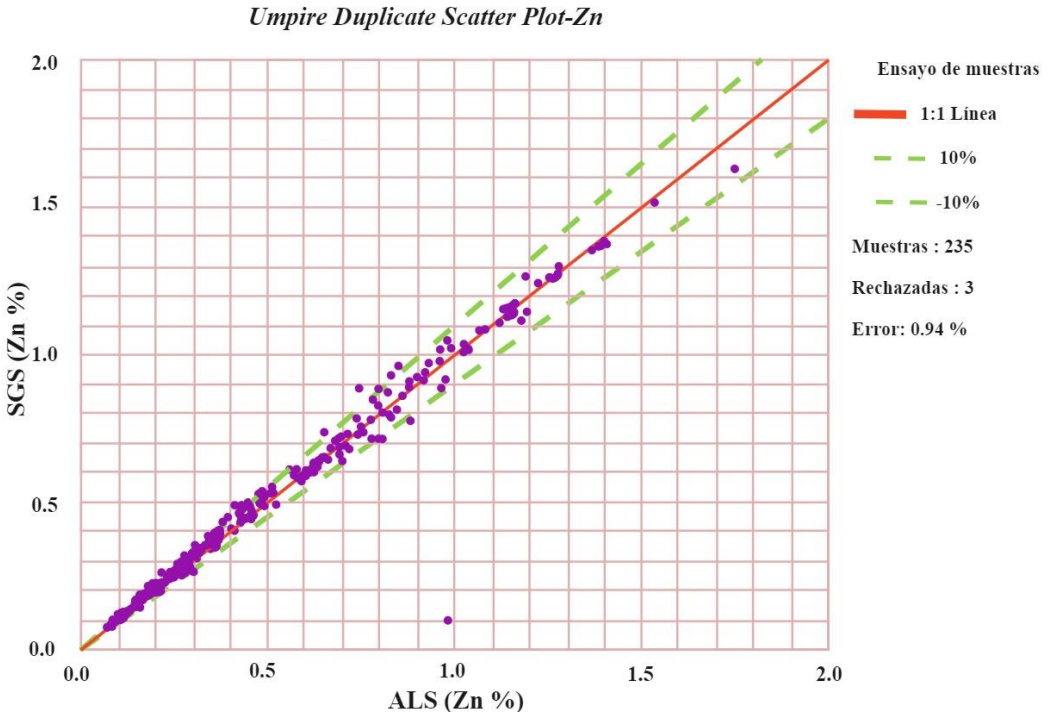
Diagrama de dispersión de duplicados de Umpire-Cu



Fuente: Elaboración propia

Figura 28

Diagrama de dispersión de duplicados de Umpire-Zn



Fuente: Elaboración propia

Nota: La interpretación del diagrama ayuda a identificar problemas de precisión, variabilidad o errores de medición, lo que permite tomar decisiones informadas sobre la confiabilidad de los datos y la necesidad de medidas correctivas.

4.3. Verificación de datos

Se rehízo la base de datos desde cero a partir de un conjunto de datos antiguos y hojas de cálculo, así como sus controles internos. Se realizó el ingreso y el control de la base de datos en la oficina de campo por el geólogo responsable. El QP realizó las siguientes verificaciones de inconsistencias en los archivos de perforación:

- ✓ Valores inconsistentes de "DE" y "HASTA": Esto se refiere a errores en las profundidades registradas del inicio y final de un intervalo de perforación.

- ✓ Tratamiento incorrecto de valores de ensayo ausentes: A veces, los ensayos de laboratorio pueden fallar o no realizarse para ciertos intervalos. El QP verifica que estos valores ausentes estén registrados y manejados adecuadamente en la base de datos.
- ✓ Registros duplicados y perforaciones duplicadas: El QP verifica que no haya entradas duplicadas para muestras o perforaciones en la base de datos.
- ✓ Levantamientos de pozos verticales: Los levantamientos de pozos verticales son importantes para garantizar que los datos de perforación estén correctamente ubicados en el espacio tridimensional. El QP verifica que estos datos sean coherentes y precisos.

De este modo, el proceso de reconstrucción y verificación de una base de datos geológica perforación. La reconstrucción de la base de datos y desarrollo de controles internos para garantizar la integridad de los datos. Un QP independiente revisó los datos de perforación para detectar inconsistencias y confirmó que la ubicación de los sondajes y los collares de perforación eran precisos y coherentes.

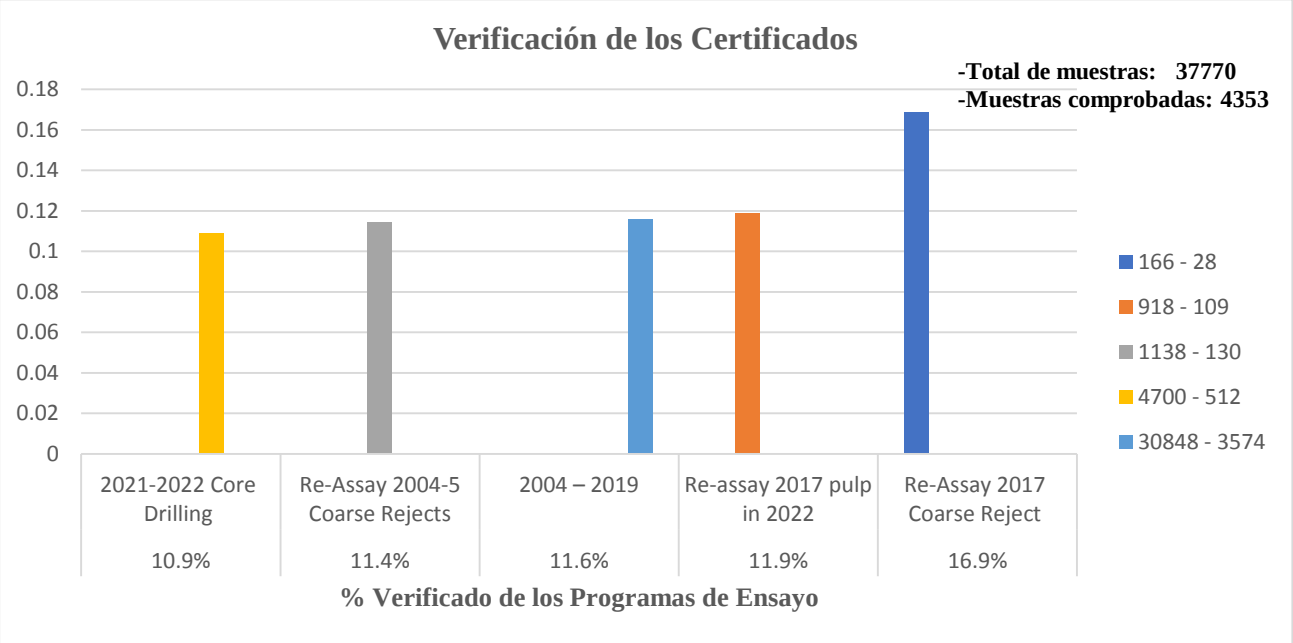
4.3.1. Verificación del ensayo

Entre 2004 y 2019, la persona calificada (QP) realizó una selección aleatoria de perforaciones en la base de datos, y la Sra. M. Morton de AMC comparó los resultados originales de los análisis con los registrados en la base de datos. Se verificaron 3,574 resultados de análisis, lo que representa alrededor del 12% de las muestras. Se detectó una pequeña discrepancia en una muestra, pero no fue relevante.

Tras la visita al sitio en 2022, la Sra. M. Morton, bajo la supervisión del QP, llevó a cabo otra verificación aleatoria de los resultados de los taladros y programas de re-análisis de 2021-2022. Se compararon 779 resultados de 6,922 en la base de datos con los resultados originales de los certificados de ALS (Perú). Esta verificación cubrió aproximadamente el 11.3% de las muestras, sin encontrar errores observados a continuación:

Figura 29

Verificación por muestreo de los resultados de ensayos



Fuente: Elaboración propia

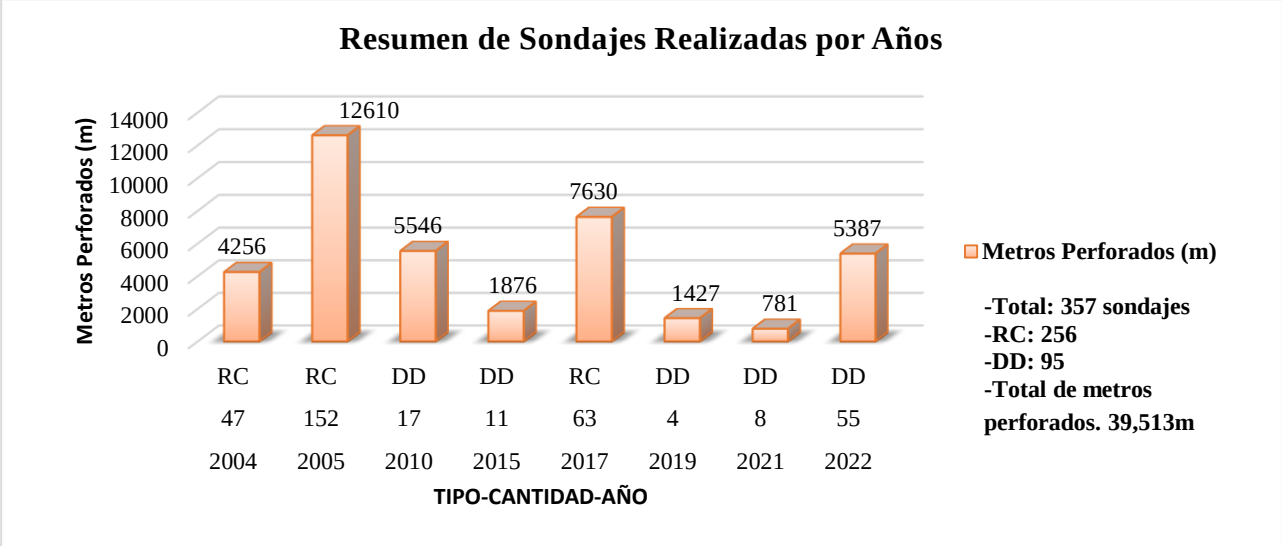
4.3.2. Base de Datos para la Estimación

Se desarrolla el proceso de limpieza, preparación y adaptación de una base de datos geológica para su uso en software LeapFrog© especializado de modelado minero. Se realizo el QC y se manejaron los datos faltantes para garantizar la integridad de la información utilizada en la estimación es en formato csv en el anexo 02, el cual fue auditada.

En la figura 34 se puede observar todo relacionado a ello de forma secuenciada.

Figura 30

Sondajes desarrollados por año desde 2004 hasta 2022.



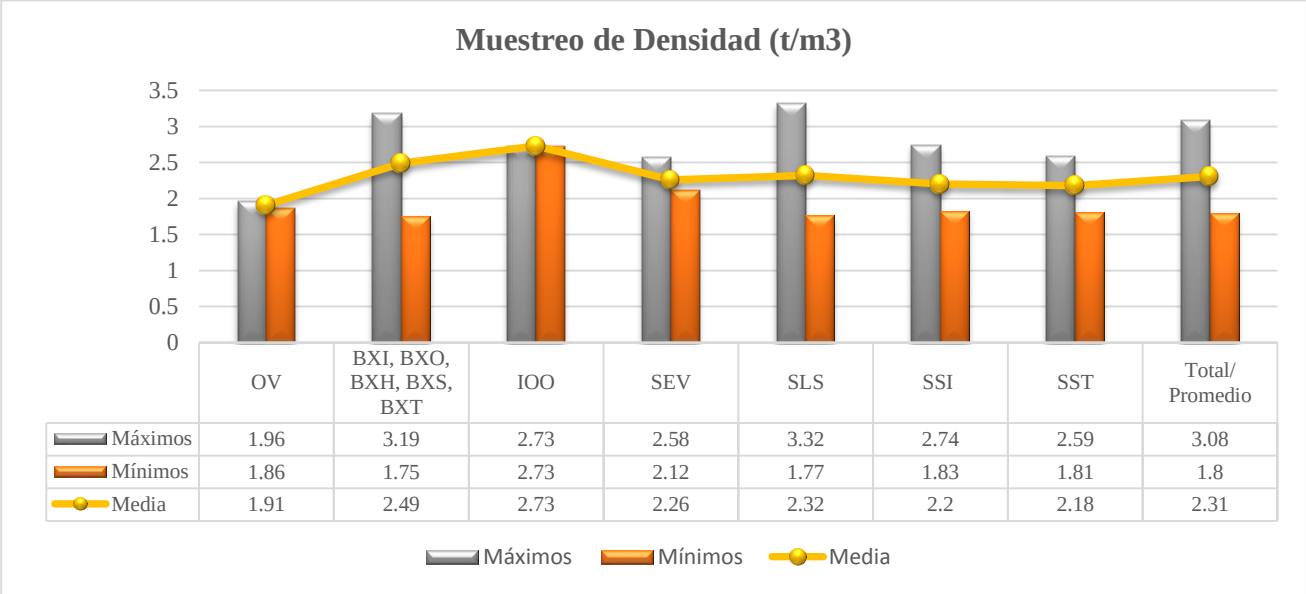
Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Bulk Density

Se utilizaron medidas de densidad aparente a partir de testigos de perforación dentro de la zona mineralizada. Los testigos se extrajeron de sondeos distribuidos uniformemente en todos los dominios de estimación, para ello se tomaron 506 medidas de densidad aparente, asimismo, Las muestras se tomaron dentro de la zona mineralizada y se distribuyeron uniformemente en todos los dominios, ellos se obtuvieron de 63 sondeos perforados en toda la zona de estudio como se puede observar en la figura 35 y el histograma general en la figura 36.

Figura 31

Estadísticas de la densidad por tipo de roca.

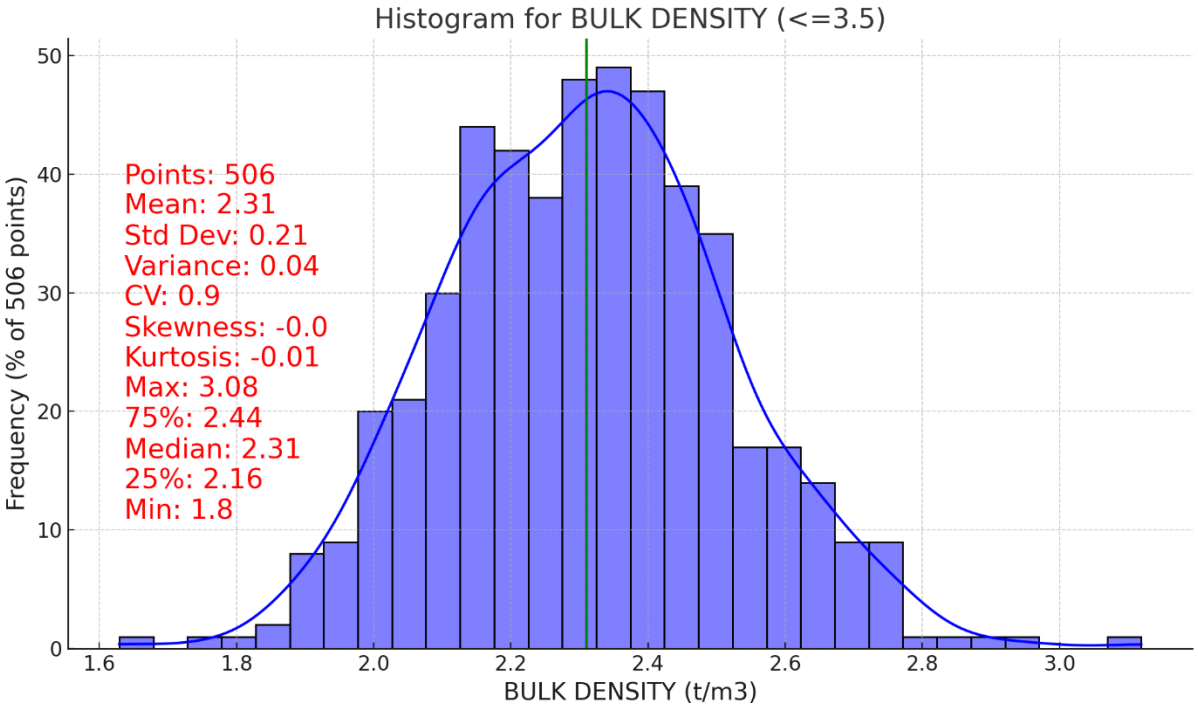


	OV	BXI, BXO, BXH, BXS, BXT	IOO	SEV	SLS	SSI	SST	Total/ Promedio
Máximos	1.96	3.19	2.73	2.58	3.32	2.74	2.59	3.08
Mínimos	1.86	1.75	2.73	2.12	1.77	1.83	1.81	1.8
Media	1.91	2.49	2.73	2.26	2.32	2.2	2.18	2.31

Fuente: Elaboración propia

Figura 32

Estadísticas de Densidad de Muestra General

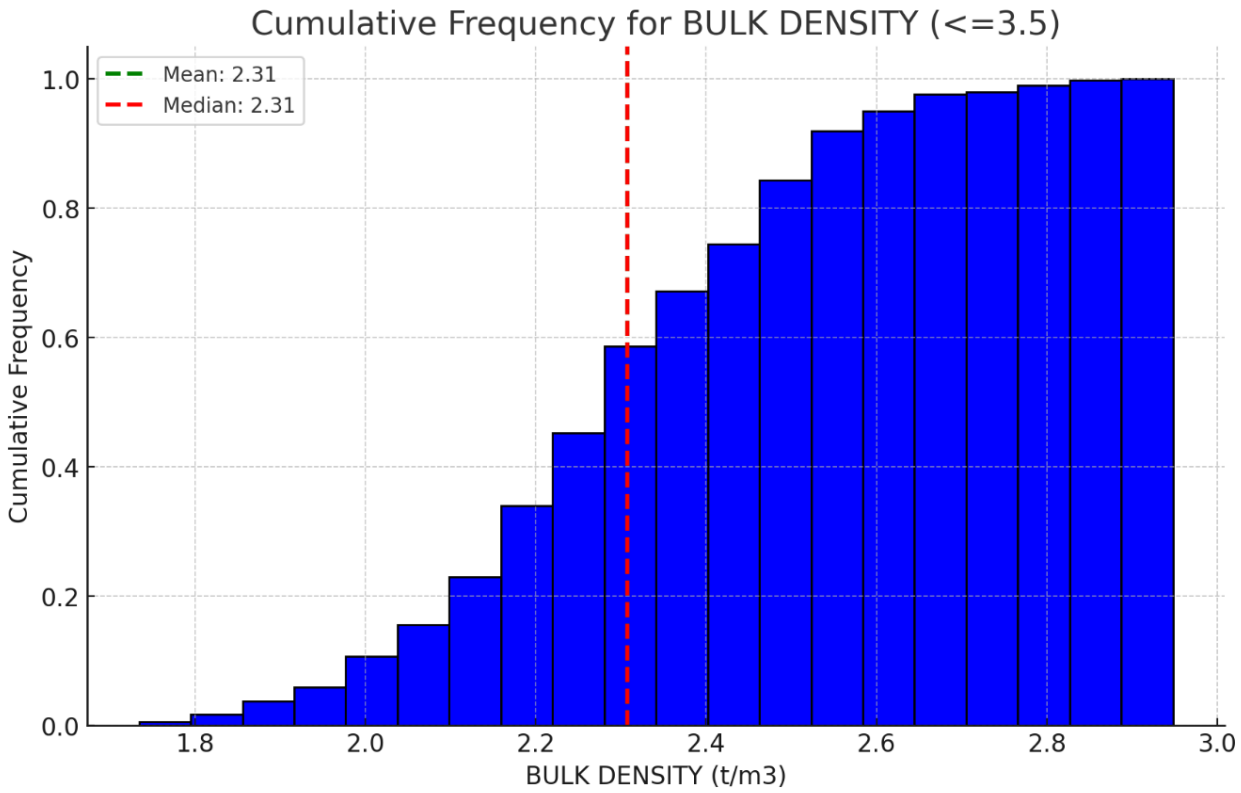


Fuente: Elaboración propia

La siguiente Gráfica de Frecuencia Acumulada nos proporciona la línea de frecuencia acumulada destaca que aproximadamente el 75% de los valores de densidad aparente están por debajo de 2.4, el cual Proporciona una visión acumulativa para analizar umbrales o límites significativos en los datos.

Figura 33

Frecuencia Acumulada de Bulk Density

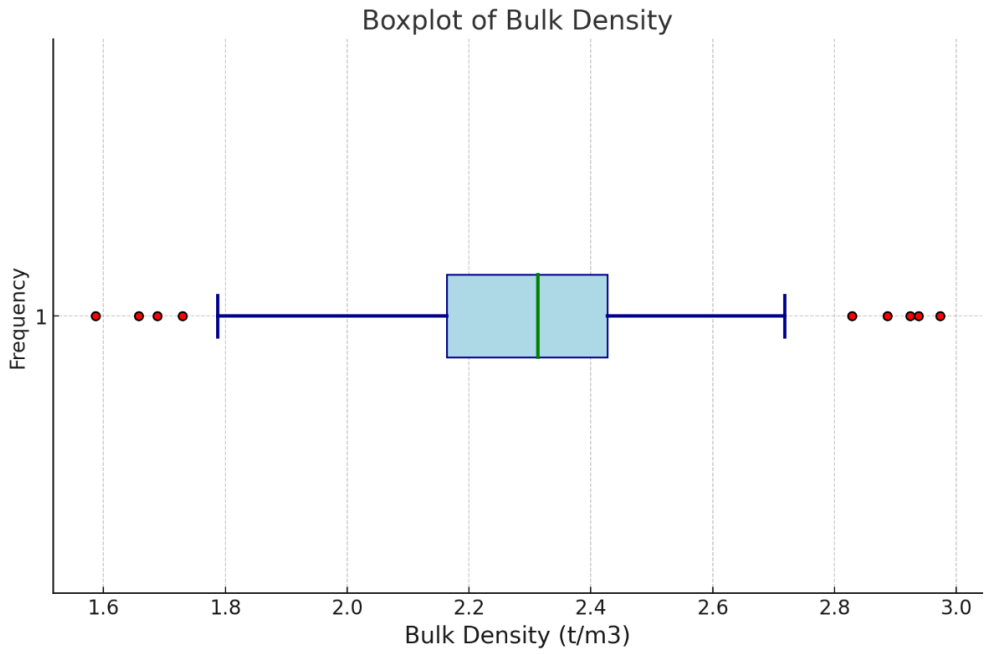


Fuente: Elaboración propia

Asimismo, considerando el grafico 34 (Box plots) donde se destaca la mediana (2.31), el rango intercuartílico (2.16-2.44), y valores mínimos y máximos sin presencia de valores atípicos, esto sugiere mayor concentración entre 2.0 y 2.6.

Figura 34

Box Plots de Bulk Densisty.



Fuente: Elaboración propia.

4.4. Análisis de datos e interpretación de la información

Este proceso involucra la construcción del modelo de bloques geológico, seguidamente la recopilación es compositada considerando asimismo los ensayos químicos los cuales son organizados y analizados de una gran cantidad de datos geológicos, geoquímicos donde, el proceso utiliza una variedad de herramientas y técnicas, incluyendo software especializado, análisis estadístico y estudios variográficos.

4.4.1. Interpretación del Modelo Geológica

El estudio hace referencia a un depósito CRD único formado por fluidos hidrotermales a relativamente baja temperatura. La mineralización se controla por la litología (específicamente, la presencia de calizas dolomíticas) y se localiza por estructuras de plegamiento que canalizaron los fluidos. La fuente de los fluidos se cree que está al este de la zona mineralizada y posiblemente esté relacionada con una intrusión félsica no expuesta. La

presencia de óxidos de manganeso indica condiciones de oxidación durante la deposición, todo ello se procesa para determinar el modelo geológico.

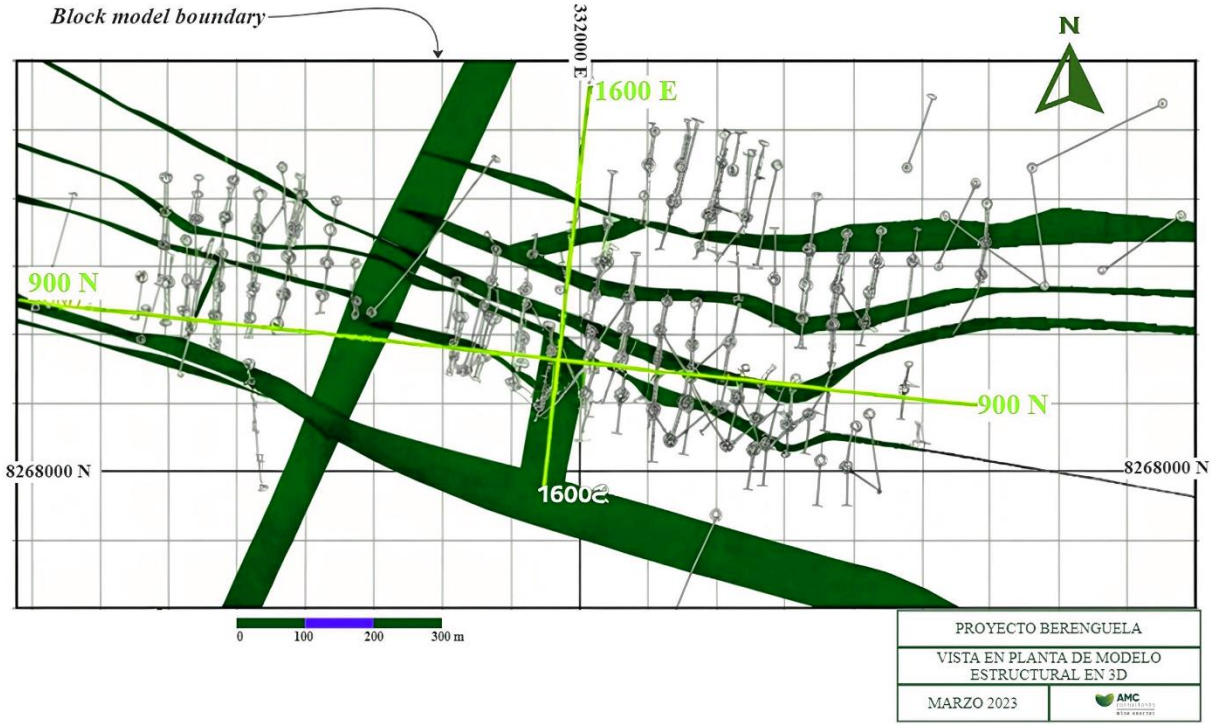
A) Modelo Estructural

Se usan varios tipos de información para modelar los dominios estructurales: entre ellos se tiene las Mapas de superficie el cual incluye la topografía, geomorfología o lineamientos que indiquen estructuras superficiales, seguidamente los mapas geológicos que muestran la distribución de las diferentes rocas en el área, lo que puede ayudar a identificar zonas con características estructurales similares (ej. zonas con fallas o plegamientos). Asimismo, La descripción de las rocas en los sondajes permite identificar cambios en la litología y la presencia de estructuras como zonas de brecha o diques intrusivos, analizando cortes transversales del depósito e integrando la información anterior, se pueden inferir estructuras que continúan en profundidad.

Todo ello nos da como resultado el siguiente plano estructural donde se identificaron un total de 14 estructuras mayores dentro de los límites del bloque modelo. El bloque modelo es una representación tridimensional del depósito mineral que se utiliza para la estimación de recursos y una futura planificación minera.

Plano 1

Vista en planta del modelo estructural en 3D.



Fuente: Proyecto Berenguela.

B) Modelo Litológico

Es un modelado geológico 3D de un depósito mineral estratiforme alojado en la Formación Ayabacas. Se utilizaron técnicas de modelado por computadora para definir las unidades geológicas y la base de la mineralización. Se puede observar lo siguiente:

Formación Ayabacas (AYA): Calizas dolomíticas plegadas y masivas del Cretácico Medio-Tardío. Contienen brechas sedimentarias, limolitas y evaporitas menores. Son rocas sedimentarias carbonatadas que pueden ser hospederas de mineralización.

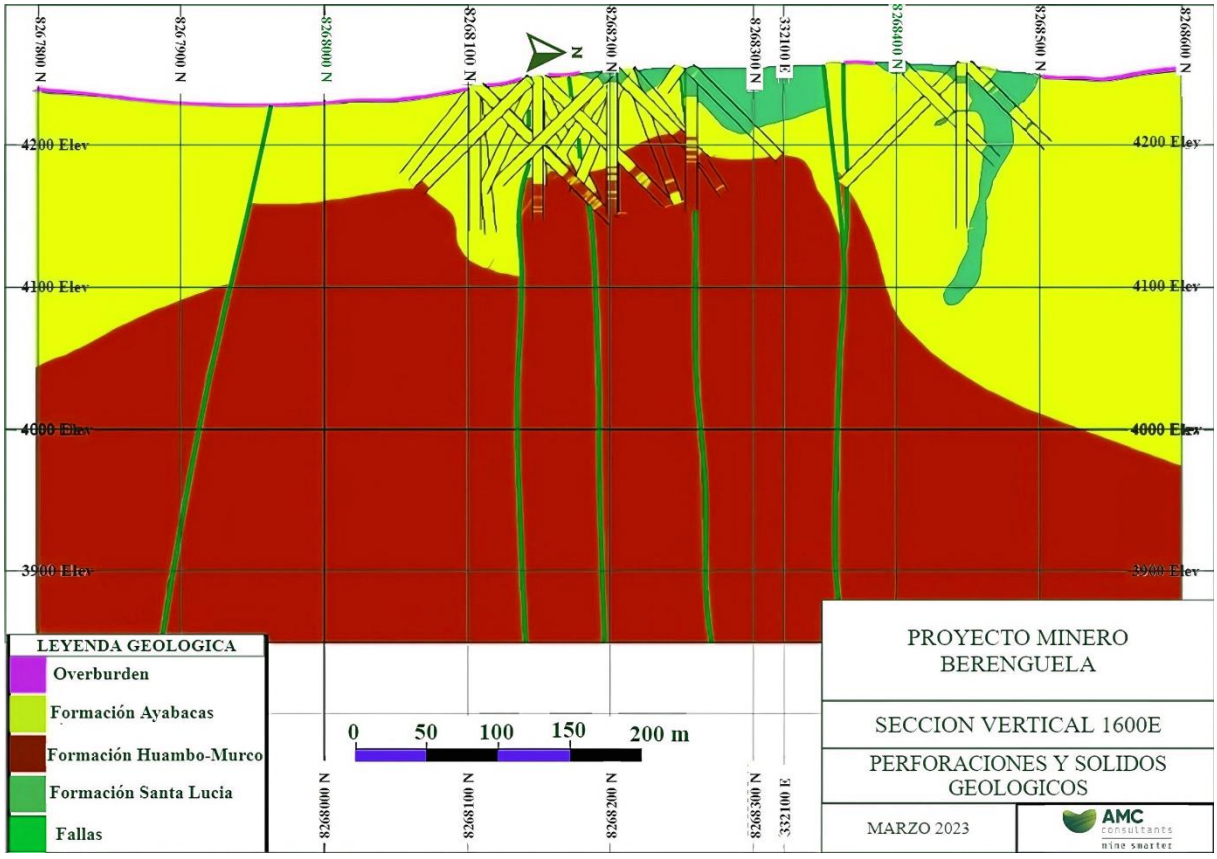
Formación Huambo - Murco (SAR-HUA): Areniscas rojas con intercalaciones de evaporitas y brechas sedimentarias del Cretácico Medio-Tardío. Las areniscas generalmente no son objetivos mineros por sí mismas. La presencia de evaporitas puede indicar la existencia de un ambiente favorable para la formación de ciertos tipos de yacimientos minerales.

Clásticos Santa Lucía (VOL): La descripción no menciona el tipo de roca en esta unidad, pero se denomina "VOL" lo que indica rocas volcánicas. Estas rocas no suelen ser objetivos mineros en sí mismas, pero pueden influir en la mineralización de otras unidades.

En el plano se observa como una sección transversal que muestra los modelos geológicos sólidos y los rastros de los sondajes. Ello ayuda a visualizar la disposición de las unidades y la mineralización en el depósito.

Plano 2

Sección transversal geología 1600E.



Fuente: Proyecto Berenguela.

Nota: Depósito mineral estratiforme alojado en la Formación Ayabacas, geológica.

C) Estimación de Dominios

Se utilizaron un total de cinco dominios para la estimación del bloque, lo cual los dominios se construyeron en base a las fallas principales del yacimiento. Se "recortaron"

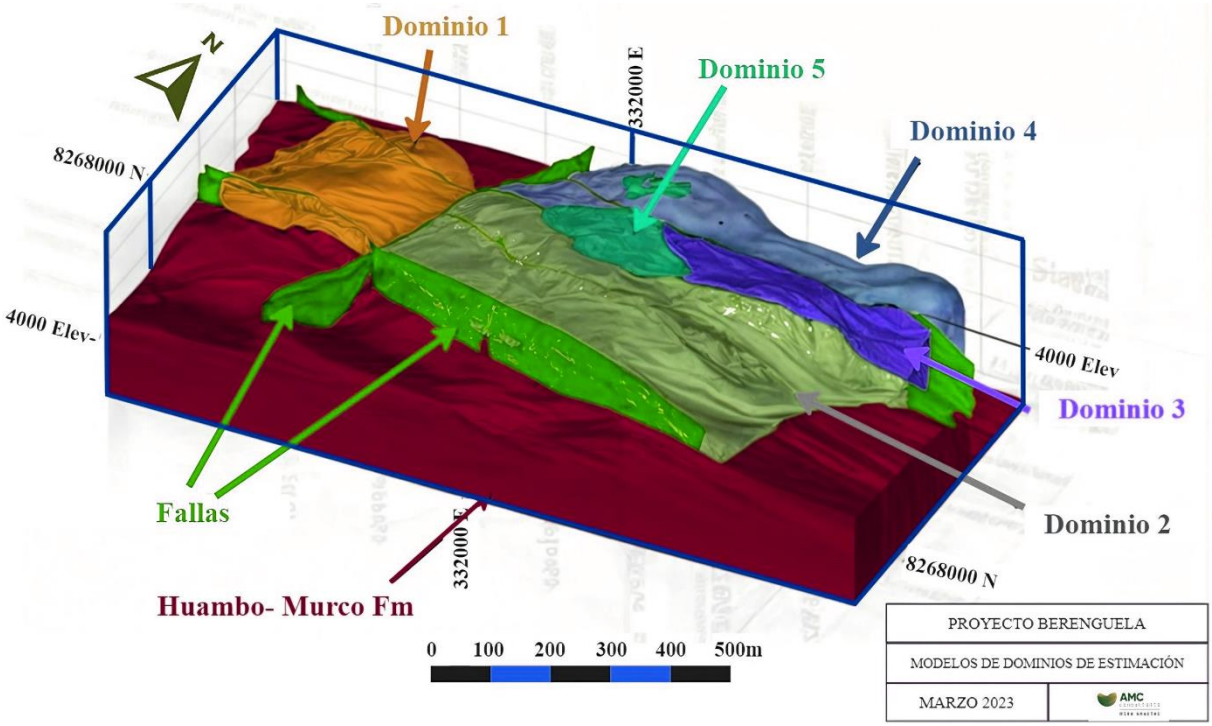
(clipped) por la base de la Formación Huambo-Murco subyacente. Esto significa que el límite inferior de los dominios está definido por el contacto con la Formación Huambo-Murco. El sólido litológico de los Clásticos Santa Lucía se denomina Dominio 5, este dominio solo contiene bajas leyes de mineralización. En la siguiente figura 46 se menciona como una vista 3D de los dominios de estimación, las fallas estructurales y la Formación Huambo-Murco subyacente. Esta figura ayudaría a visualizar la distribución de los dominios y las fallas en relación con la mineralización.

La interpretación es dividir el modelo en dominios basados en fallas y la base geológica permite una estimación de recursos más precisa, seguidamente la presencia de bajas leyes en el Dominio 5 (Clásticos Santa Lucía) indica que esta unidad no es económicamente viable para la extracción minera. Se divide en dominios para una mejor estimación de los recursos minerales. Las fallas y la base de la Formación Huambo-Murco se utilizaron como límites para los dominios, y el Dominio 5, que representa los Clásticos Santa Lucía, tiene bajas leyes de mineralización.

El modelo geológico del Proyecto Berenguela identifica cinco dominios de estimación bien diferenciados, definidos con base en características geológicas y estructurales. Las fallas juegan un papel fundamental como estructuras de control, y la Formación Huambo-Murco constituye el basamento. Este modelo proporciona una base robusta para realizar estimaciones de recursos confiables y geológicamente consistentes, esenciales para el desarrollo minero responsable y técnico del yacimiento.

Plano 3

Vista 3D de los dominios de estimación.



Fuente: Elaboración propia.

4.5. Análisis Exploratorio de Datos

4.5.1. Selección de muestras

Las muestras fueron seleccionadas dentro de cada zona por el Geólogo Calificado (QP) para revisión. Este fragmento explica cómo se prepararon los datos de las muestras para un análisis estadístico que probablemente servirá como base para estudios de geometalurgia, estimación de recursos o evaluación económica del yacimiento mineral.

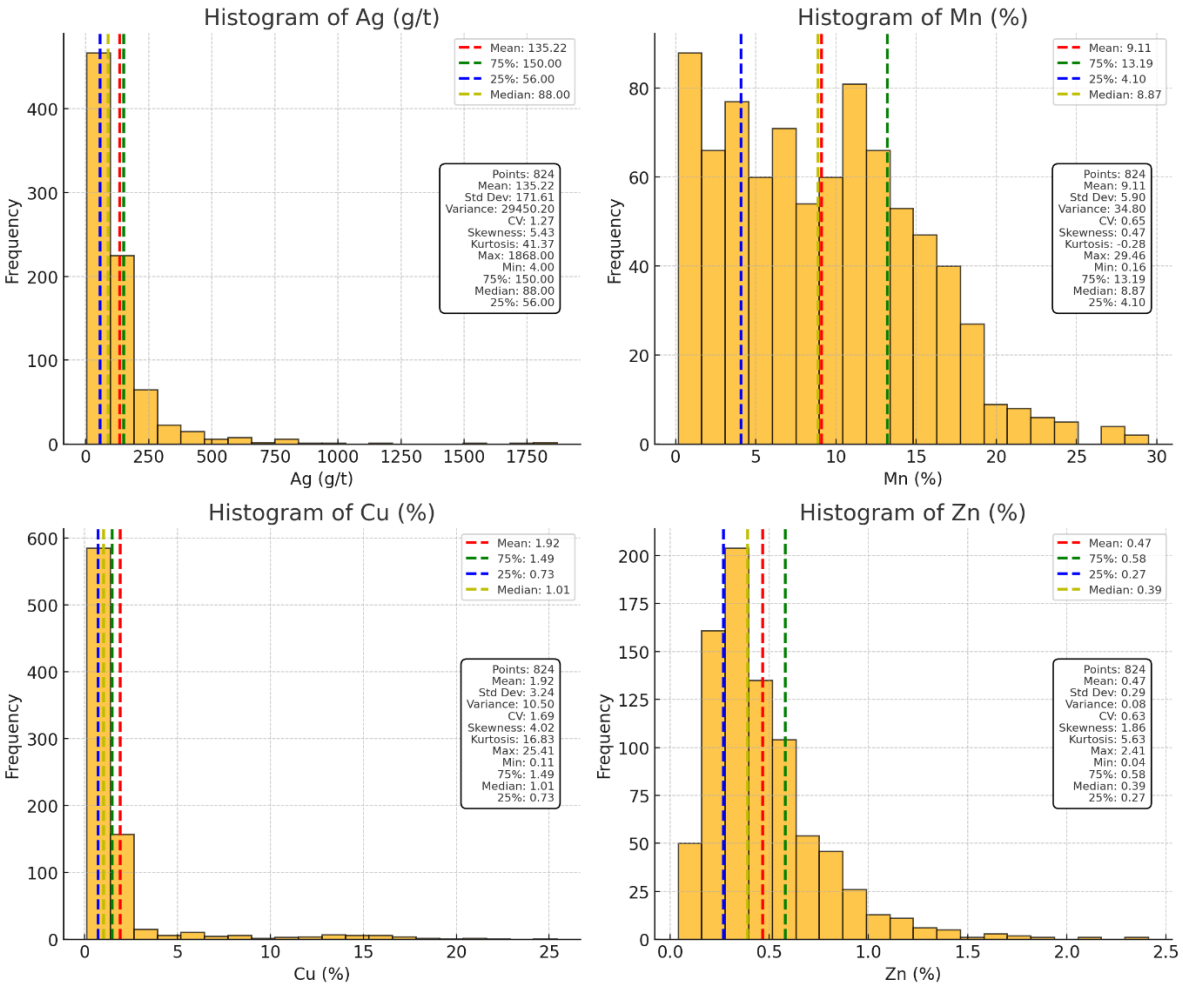
4.5.2. Análisis estadístico descriptivo

los histogramas que se pueden observar en la figura 35 proporcionan una primera aproximación a la comprensión de la variabilidad espacial de los elementos. Un análisis más profundo permitirá obtener una visión más completa y detallada de la distribución de los minerales en la muestra, así como estos gráficos permiten identificar patrones de distribución y guiar decisiones

en minería, como priorizar zonas de alta concentración de Ag y Mn para maximizar la extracción rentable. Además, la homogeneidad del Cu podría facilitar operaciones de minería continua.

Figura 35

Variabilidad Espacial de las leyes de Ag, Mn, Cu y Zn.



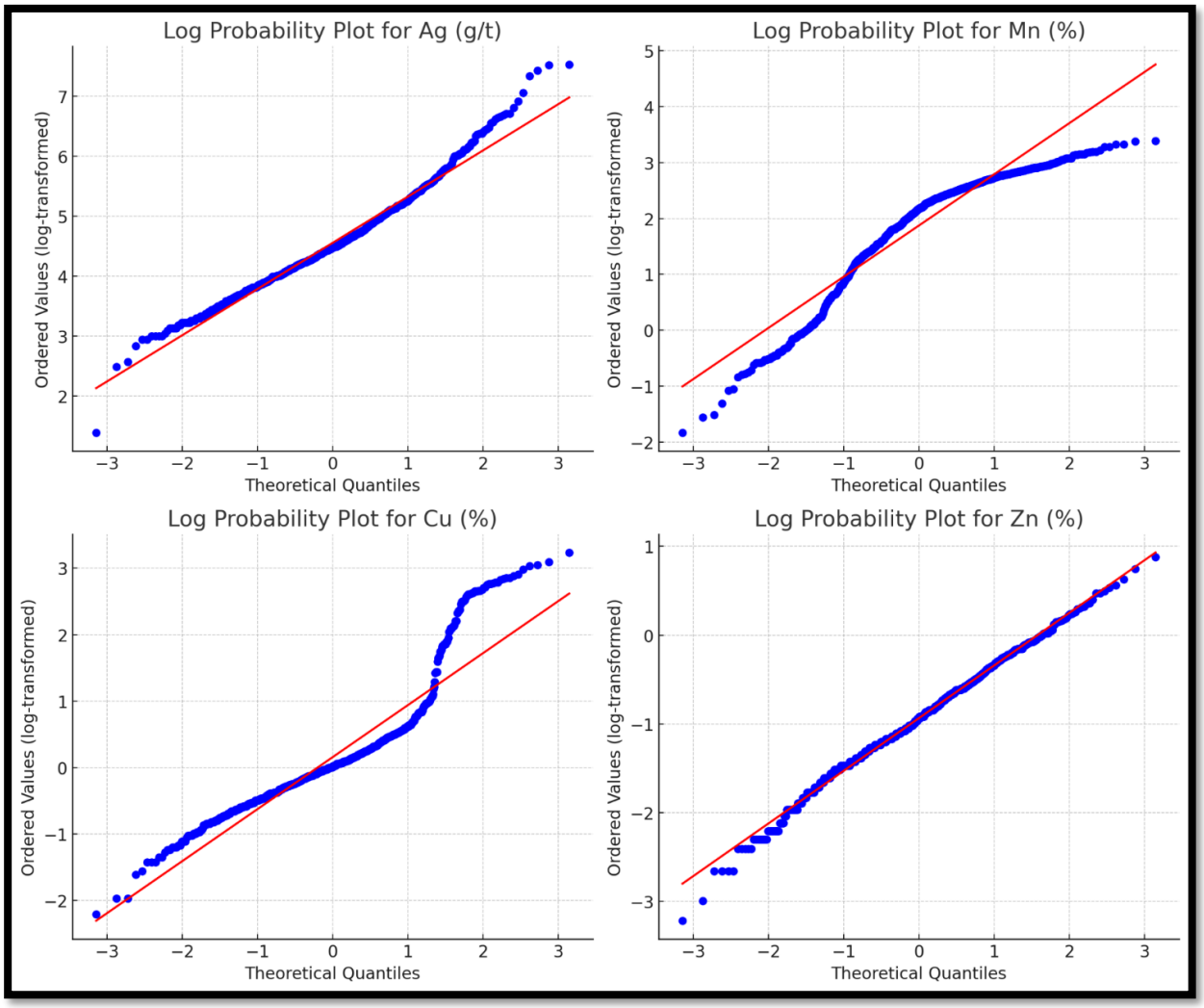
Fuente: Elaboración propia

En el siguiente garfico Los log-probability plots para Ag (g/t) y Zn (%) muestran una buena correspondencia con la distribución log-normal, lo que indica que la mayoría de las muestras de estos minerales siguen este tipo de distribución, con algunas colas pesadas (valores altos de concentración en pocas muestras). Asimismo, Los gráficos para Mn (%) y Cu (%) muestran una desviación mayor de la distribución log-normal, especialmente en las colas, lo

que indica mayor variabilidad en los datos. Esto sugiere que, aunque la distribución log-normal puede servir como una aproximación, puede haber factores adicionales que afectan a la distribución de estos minerales, como la presencia de muestras extremas o anómalas. Finalmente, los datos de los minerales siguen en su mayoría distribuciones log-normales, pero con diferentes grados de ajuste. Esto es consistente con la teoría de que la minería y los procesos geológicos pueden generar distribuciones de datos sesgadas con una gran concentración en valores bajos y pocos valores extremos muy altos.

Figura 36

Log Probability Plots de los Minerales Ag (g/t), Mn (%), Cu (%) y Zn (%)



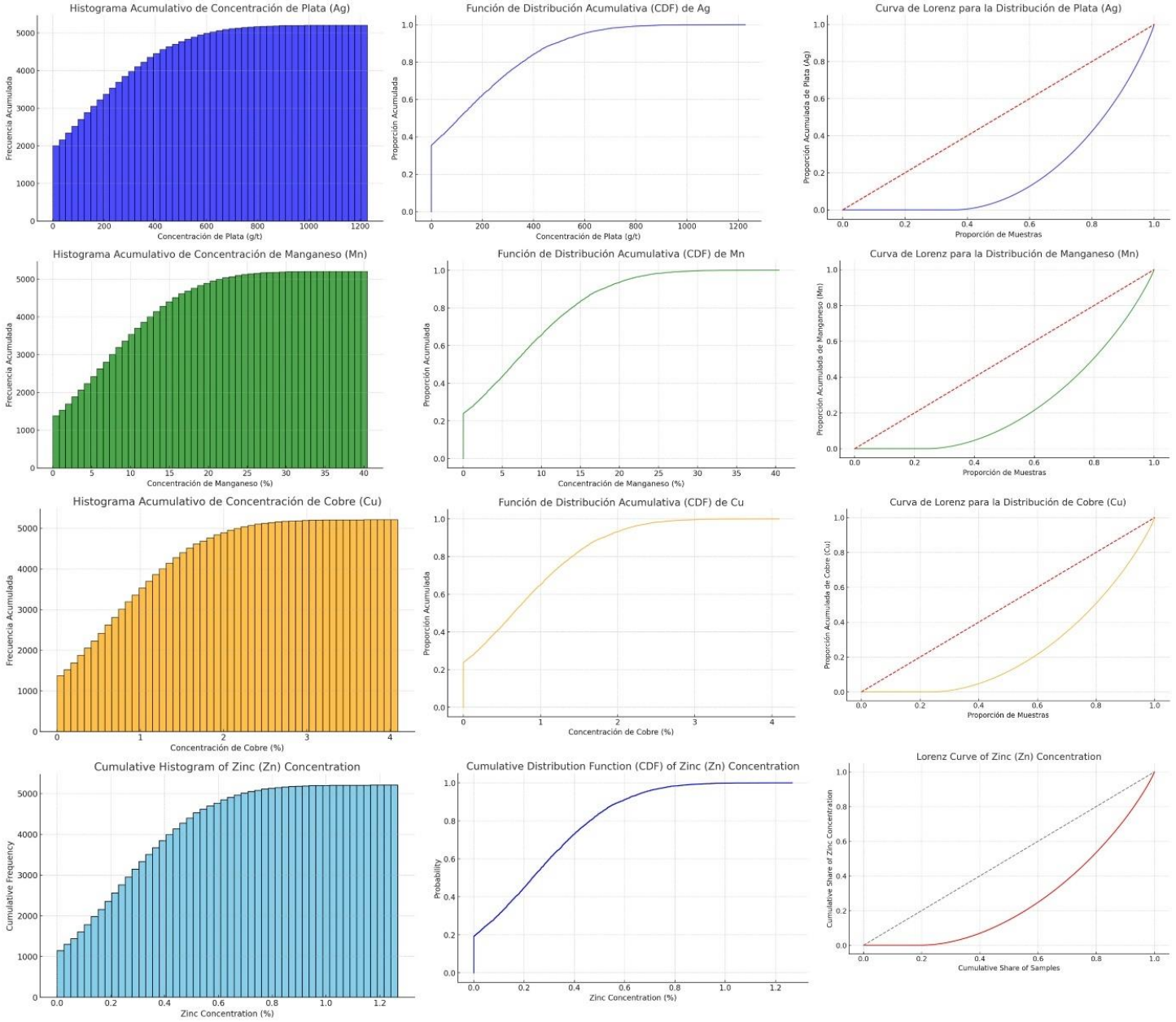
Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura de curva de histograma acumulativa se puede observar con mayor detalle el comportamiento estadístico que se muestra cómo se distribuyen acumulativamente las concentraciones de plata en las muestras. Este gráfico ayuda a visualizar cuántas muestras tienen concentraciones de plata por encima o por debajo de ciertos valores.

La Función de Distribución Acumulativa (CDF): Este gráfico ilustra la proporción acumulada de muestras que contienen menos de una determinada concentración de los minerales de Ag, Mn, Cu y Zn, facilitando la identificación de percentiles. Asimismo, la Gráfico de Lorenz muestra la desigualdad en la distribución de los elementos minerales entre las muestras. La línea diagonal representa la igualdad perfecta, mientras que la curva azul, verde, amarillo y roja muestra la distribución real; a mayor distancia de la diagonal mayor desigualdad en la distribución de los elementos minerales de Ag, Mn, Cu y Zn respectivamente.

Figura 37

Histograma Acumulativo, CDF y Curva de Lorenz para cada mineral.



Fuente: Elaboración propia.

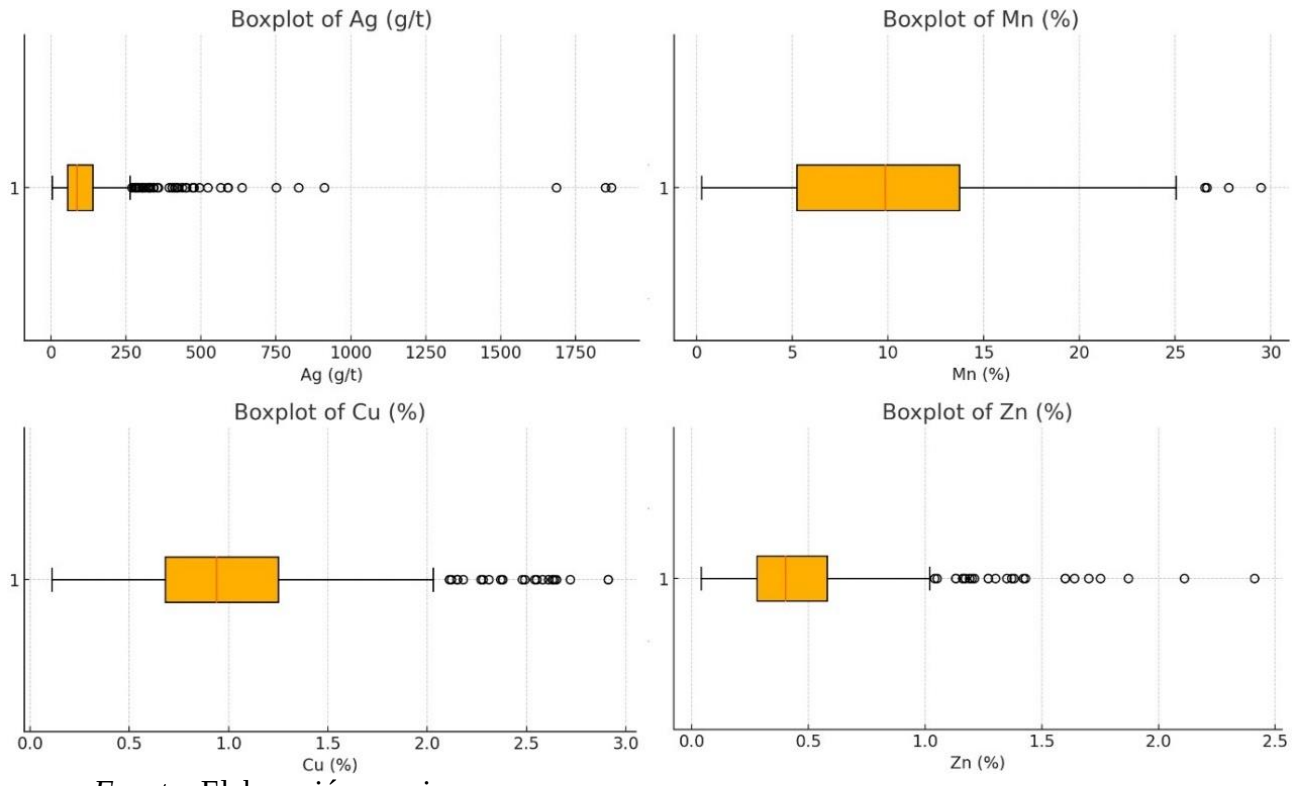
4.5.3. Análisis gráfico (Box Plots)

Los diagramas de cajas proporcionado en el siguiente grafico en forma general proporcionan una visión clara de la distribución, dispersión y presencia de valores atípicos en los datos de los minerales Ag (g/t)**,** Mn (%)**,** Cu (%) **y** Zn (%)**.**

Aunque la mayoría de las muestras tienen concentraciones bajas de plata, las muestras con valores atípicos pueden representar depósitos de alta ley que son importantes. El manganeso tiene una distribución amplia y relativamente uniforme, con concentraciones altas (entre 5% y 15%) predominantes. Las pocas muestras fuera de este rango son anomalías o áreas específicas de enriquecimiento. El cobre tiene una distribución relativamente uniforme dentro del rango intercuartil, pero los valores atípicos más altos son zonas de mayor concentración. El zinc tiene una distribución similar a la de la plata, con concentraciones bajas predominantes y algunos valores atípicos que podrían ser económicamente significativos, como se observa a continuación.

Figura 38

Box Plots general de los minerales de Ag (g/t), Mn (%), Cu (%) y Zn.



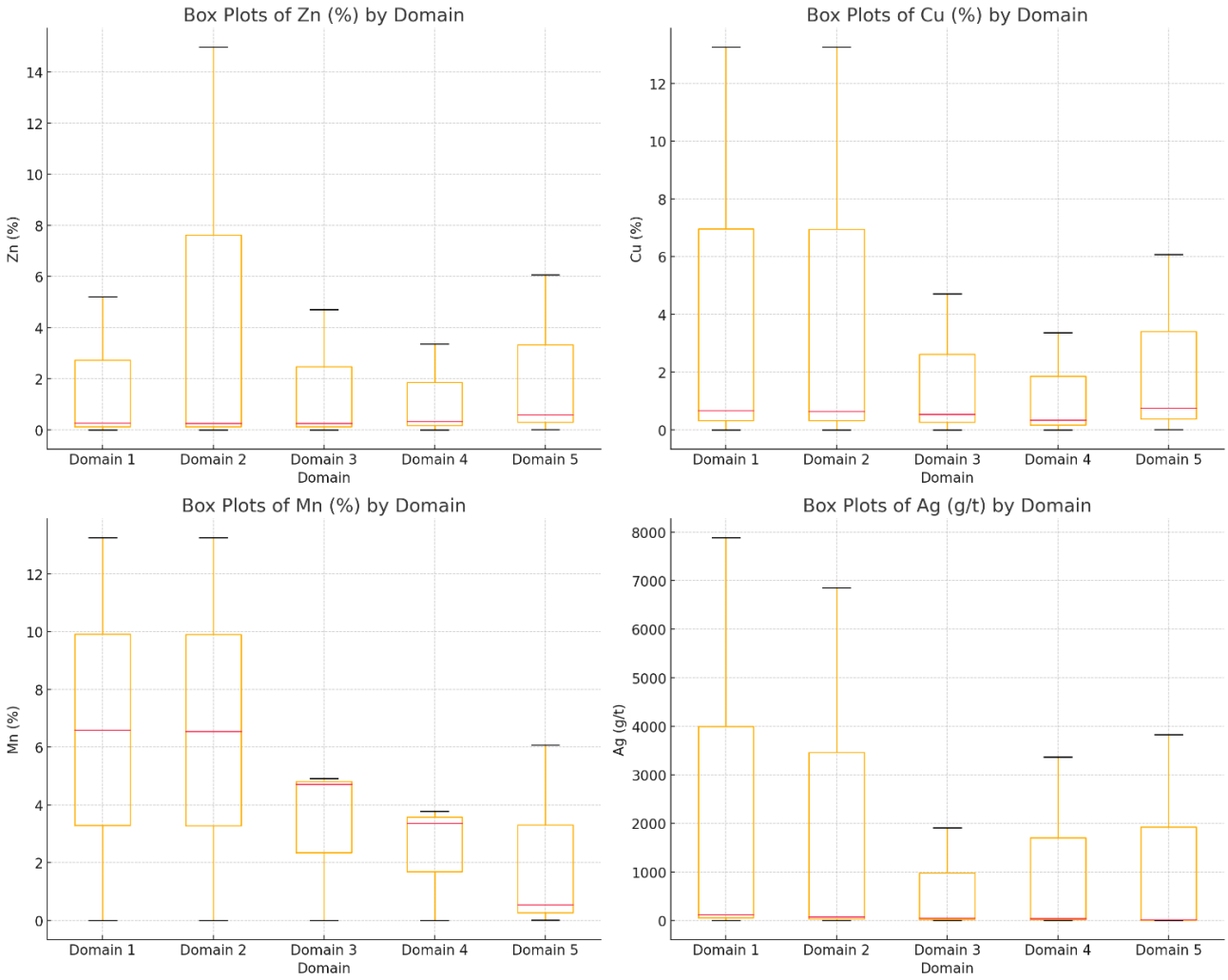
Fuente: Elaboración propia.

Analizando la heterogeneidad Mineral donde el box plots evidencian una gran heterogeneidad en la distribución de los minerales entre los diferentes dominios. Esto

sugiere que cada dominio tiene un potencial mineralógico diferente y que es necesario realizar estudios más detallados para comprender los factores que controlan la mineralización. El Dominio 2 se destaca por presentar las concentraciones más altas de todos los elementos analizados. Esto indica la presencia de un sistema mineralizador más rico o de mayor tamaño. Asimismo, los valores atípicos representan zonas de alta ley o mineralizaciones locales, como se observa en la siguiente figura:

Figura 39

Box plots por dominio de cada mineral Ag, Mn, Cu y Zn.



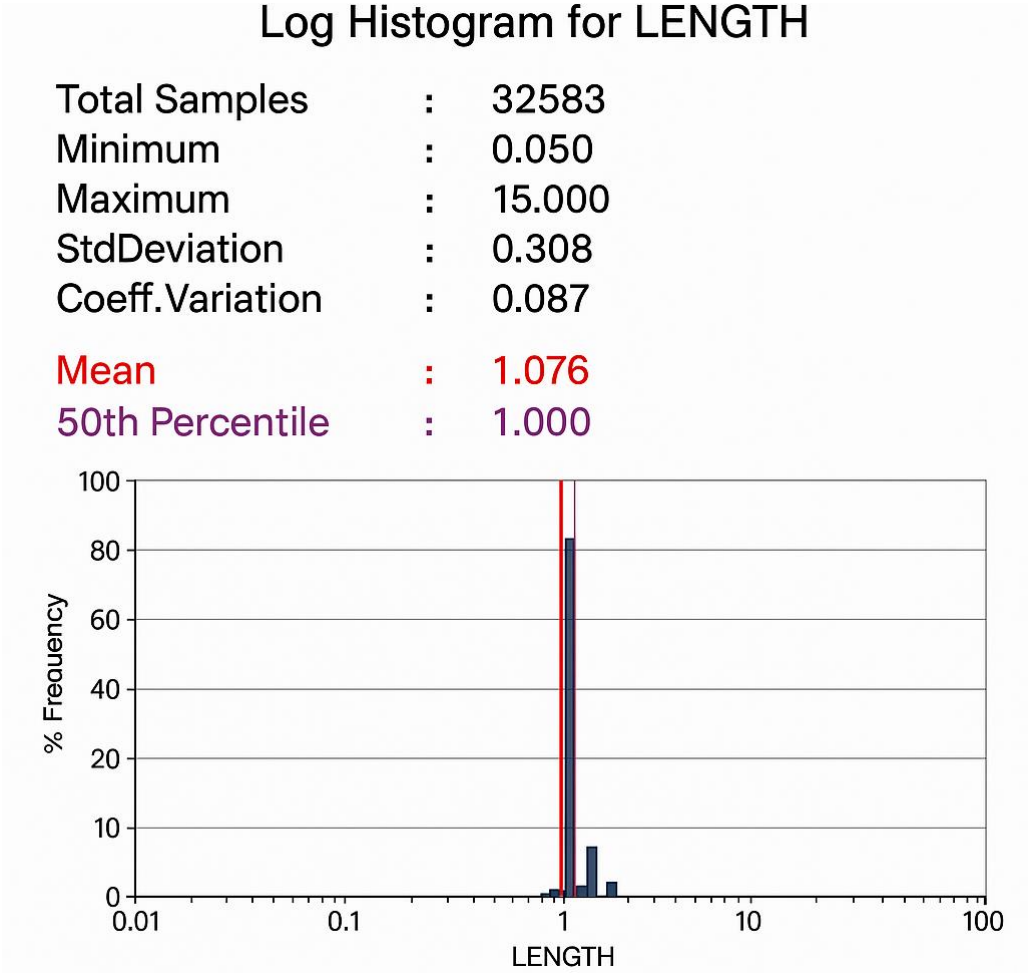
Fuente: Elaboración propia.

4.5.4. Compositacion

El compositado de muestras fue realizado después de seleccionar las muestras originales. La longitud de compositos se estableció en 1,0 m para todos los dominios, basándose en el valor promedio de la longitud de muestreo. Los compositos se generaron utilizando una opción en Datamine para crear compuestos de igual longitud en cada sondaje, lo más cercanos posible a los 1,0 m seleccionados. Esta función ajusta la longitud de compuesto dentro de un sondaje para evitar la generación de descartes.

Figura 40

Histograma logarítmico para la longitud de muestra.

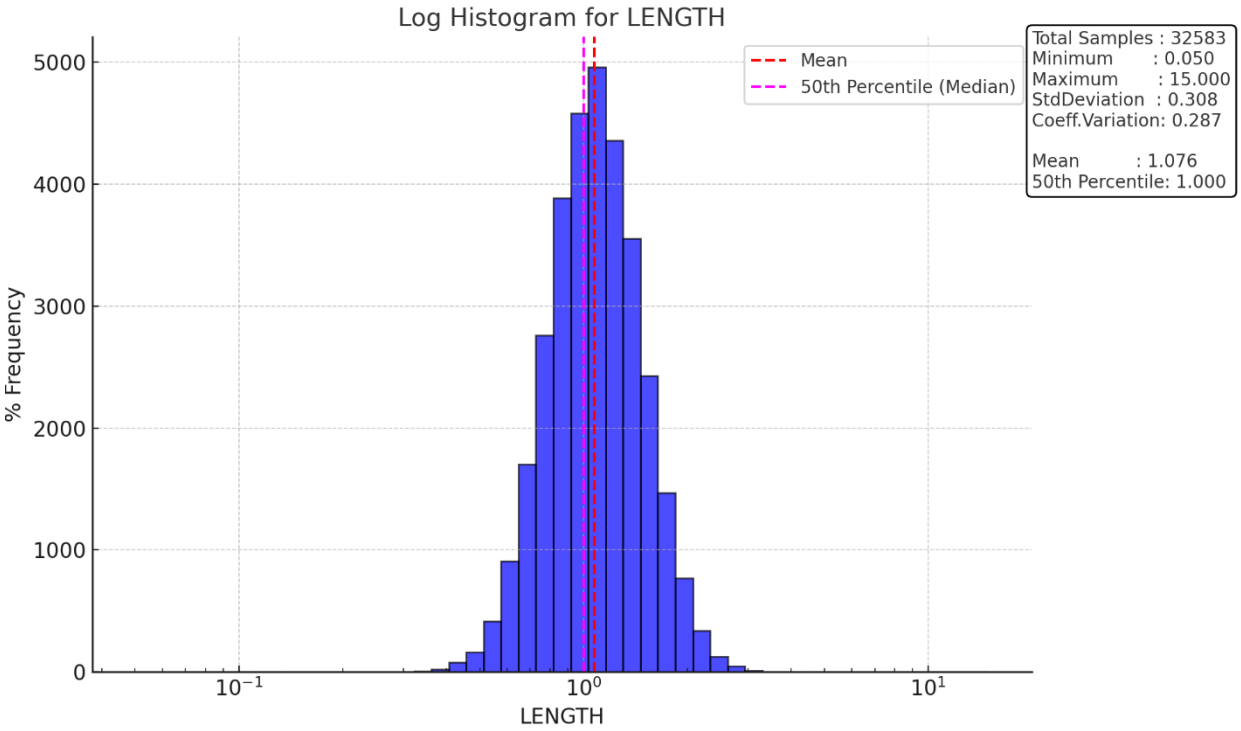


Fuente: Elaboración propia.

Este gráfico y sus estadísticas reflejan que la mayoría de los valores de longitud son consistentes y cercanos a 1, lo que sugiere un conjunto de datos uniforme en valores bajos, similarmente, la baja frecuencia de valores extremos (por encima de 10) indica que estos no son representativos del comportamiento general de la muestra. Como para aplicaciones prácticas, los valores entre 0.5 y 1.5 son los más relevantes, ya que capturan la mayor parte de la variabilidad de la muestra.

Figura 41

La escala logarítmica

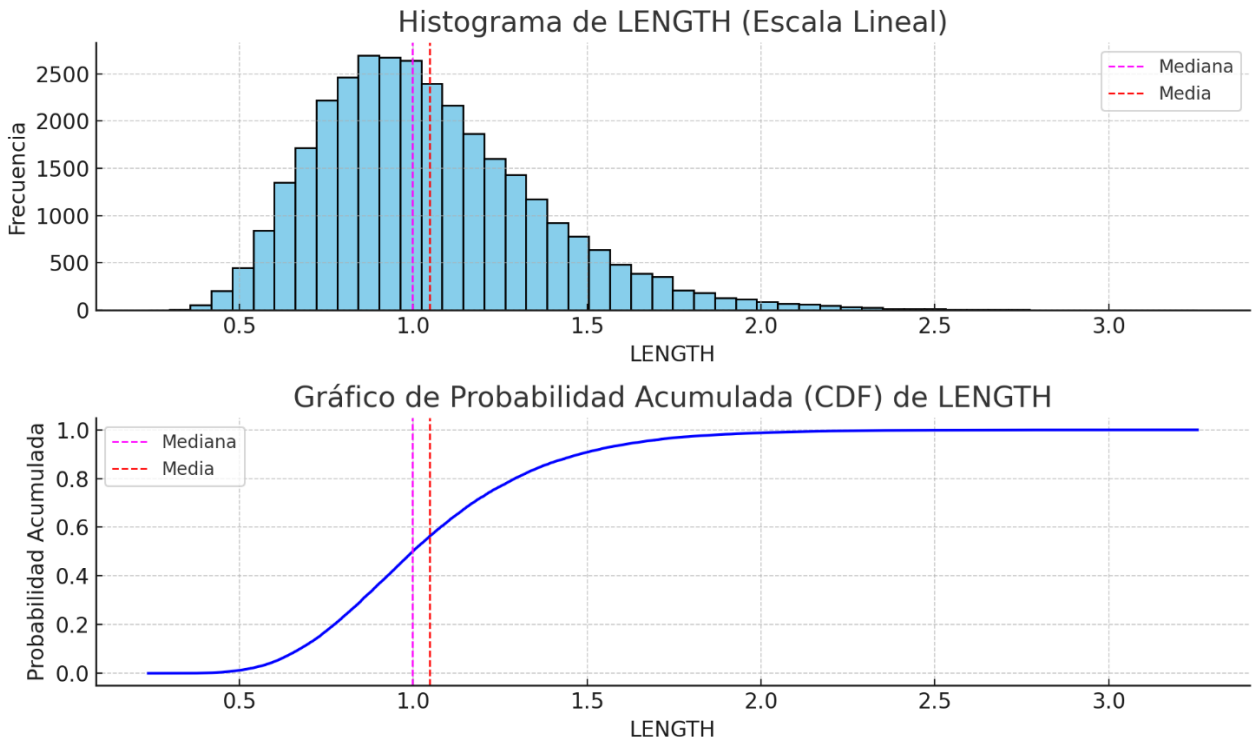


Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente el gráfico de escala lineal se muestra cómo los valores de longitud se distribuyen en una escala lineal, donde se puede observar mayor concentración alrededor de 1, con algunos valores dispersos hacia valores mayores. De igual manera el (CDF) muestra cómo los valores de "longitud" se acumulan a lo largo de la distribución. La pendiente pronunciada alrededor de 1 indica que una gran proporción de los datos está concentrada en este rango.

Figura 42

Histograma y Gráfico de Probabilidad Acumulada (CDF) de LENGTH.



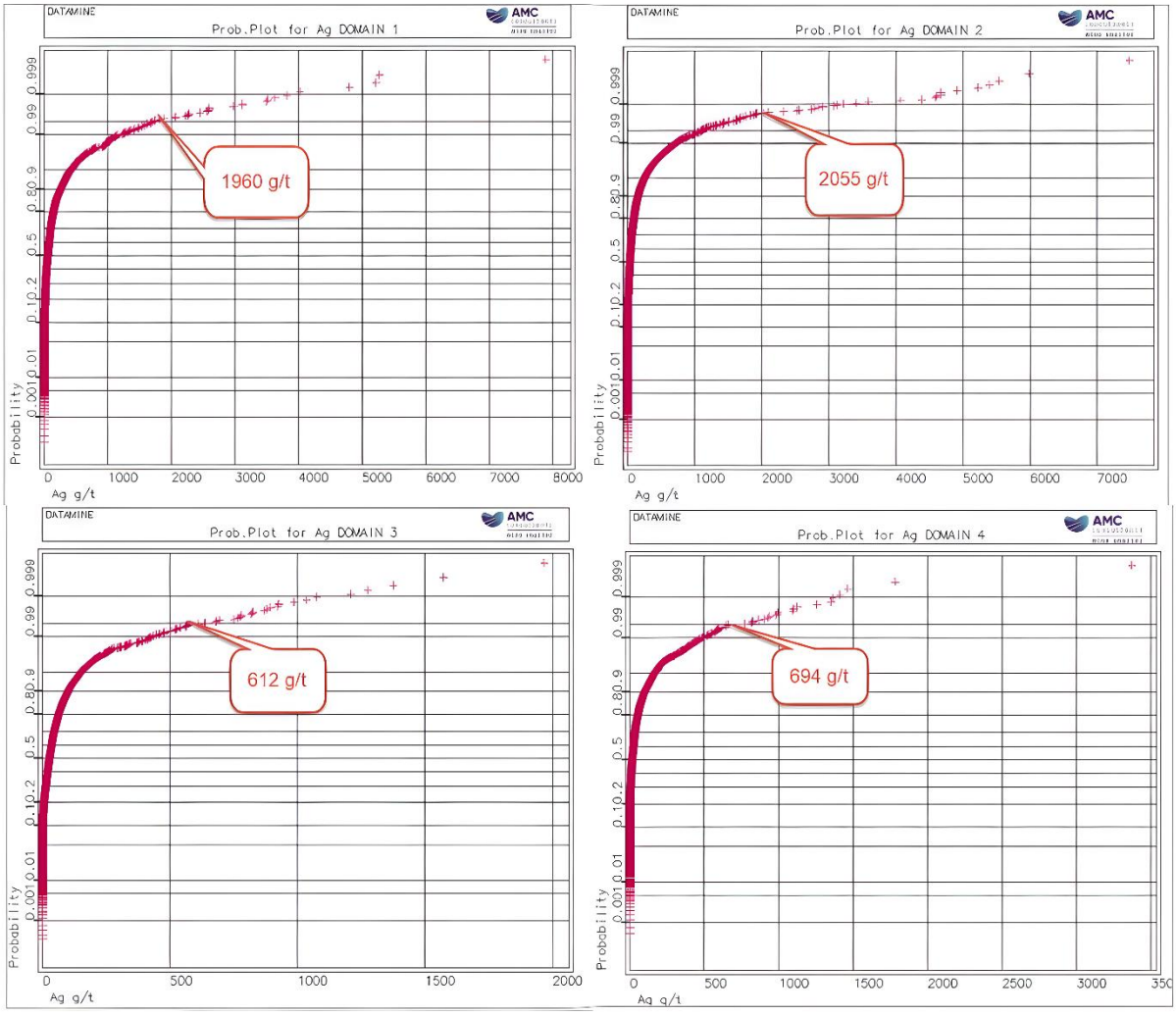
Fuente: Elaboración propia.

4.5.5. Capping

Se aplicó un límite superior (capping) después de compositar los datos. La ubicación de los valores atípicos de alto grado no se concentró en un área específica, sino que se distribuyó en todo cada dominio, para todos los dominios de estimación y para todos los elementos. Los límites superiores fueron determinados por RockRidge utilizando gráficos de variación, gráficos de probabilidad y gráficos de deciles. El QP creó los gráficos de probabilidad para verificar los valores de límite superior. Los valores de límite superior aplicados fueron determinados adecuadamente. La Figura 43 muestra los gráficos de probabilidad de Ag para los Dominios 1 a 4.

Figura 43

Gráficos de Probabilidad de Ag para los Dominios 1 a 4.



Fuente: Proyecto Berenguela.

Se aplicó un límite máximo (capping) a los datos compuestos para cada uno de los seis elementos en cada dominio de estimación. El resumen de los valores máximos aplicados, número de datos compuestos limitados, ley media antes y después del límite máximo, y el porcentaje de diferencia se muestran en la Tabla 5. Las diferencias de ley media variaron de 4.1% a 4.8% para Ag en los dominios de estimación 1 a 4. Las leyes medias para Mn no se vieron afectadas por el límite máximo. La diferencia máxima en las leyes de Mn es de 0.1%. Las diferencias en las leyes medias de Cu después del límite máximo alcanzaron el 0.6%. El

Dominio 5 tiene mayores porcentajes de diferencia; sin embargo, las leyes medias son muy bajas, por lo tanto, el límite máximo no ha influido en el proceso de estimación.

El capping es aplicado para controlar los valores extremos de los datos de composición de las muestras. El impacto del capping varió según el elemento y el dominio de estimación. En general, el procedimiento tuvo un efecto limitado en las leyes medias, lo que sugiere que no debería influir significativamente en las estimaciones de recursos minerales.

Tabla 5

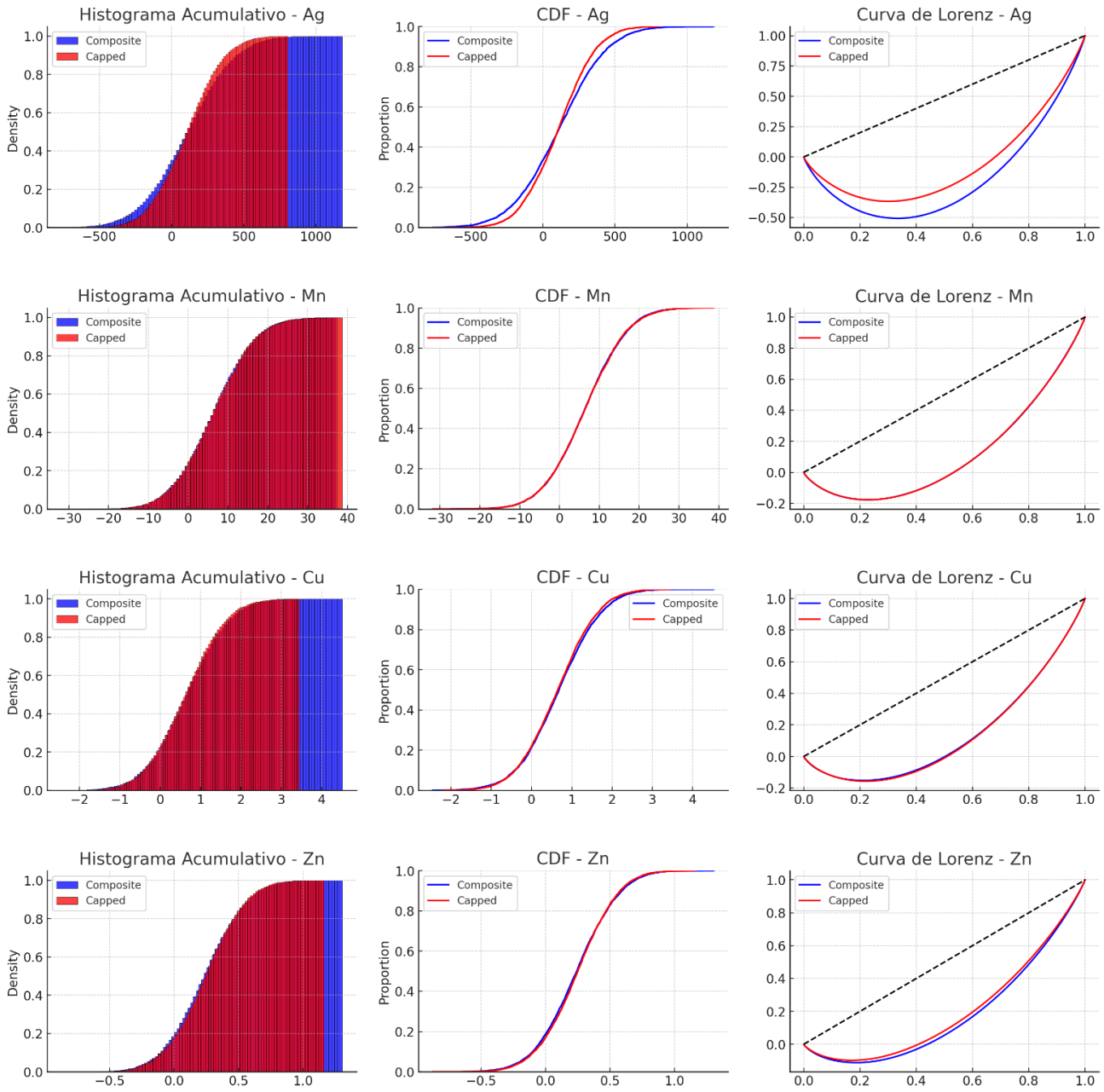
Resumen de capping de ley de mineral.

Dominio	Elemento	valor de corte(capping)	No capped composites	Ley media antes del capping	Ley media despues del capping	Diferencia de medias (%)
1	Ag (g/t)	1,960	23	116.33	111.60	-4.1
	Mn (%)	38.50	5	6.59	6.59	0.0
	Cu (%)	5.50	11	0.67	0.67	-0.6
	Zn (%)	1.40	19	0.24	0.24	-0.2
2	Ag (g/t)	2,055	24	71.81	68.82	-4.2
	Mn (%)	38.90	5	6.52	6.52	0.0
	Cu (%)	6.95	5	0.67	0.67	0.0
	Zn (%)	2.30	7	0.26	0.26	0.0
3	Ag (g/t)	612	28	47.24	46.00	-2.6
	Mn (%)	34.20	7	3.34	3.34	-0.1
	Cu (%)	3.75	5	0.54	0.54	0.0
	Zn (%)	1.67	7	0.25	0.25	-0.1
4	Ag (g/t)	694	19	42.31	40.28	-4.8
	Mn (%)	31.80	5	4.06	4.05	-0.1
	Cu (%)	2.69	13	0.36	0.36	-0.4
	Zn (%)	3.70	10	0.43	0.43	-0.3
5	Ag (g/t)	25	63	16.93	5.79	-65.8
	Mn (%)	0.30	147	0.31	0.17	-43.4
	Cu (%)	0.10	81	0.10	0.03	-71.7
	Zn (%)	0.19	325	0.20	0.17	-13.4

Fuente: Elaboración propia.

Figura 44

Histograma, CDF y Curva de Lorenz para el dominio 1 de cada mineral.



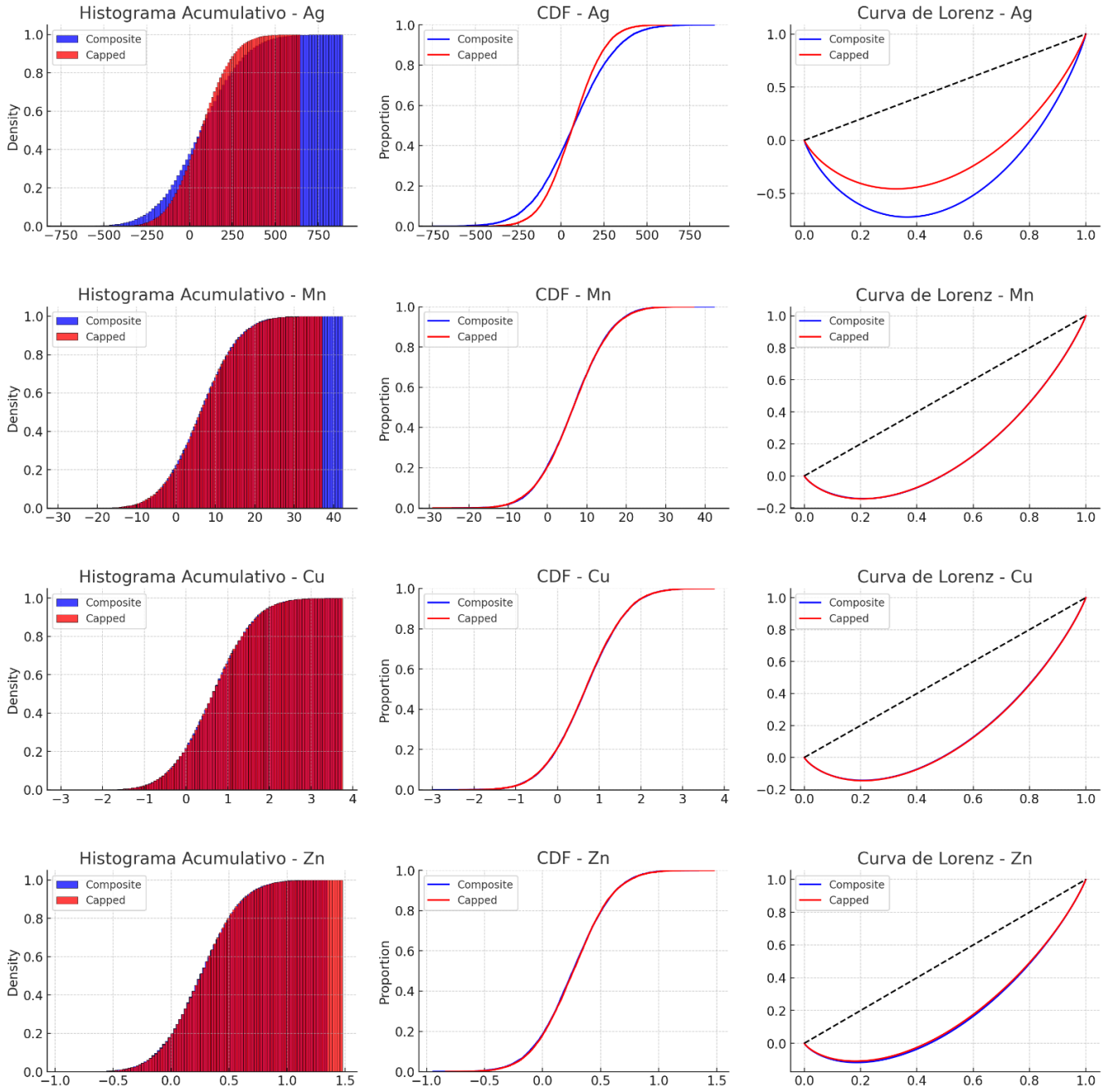
Fuente: Elaboración propia.

Las variables muestran una tendencia acumulativa similar entre ambos grupos, aunque algunas diferencias marginales pueden observarse en las gráficas de histograma y CDF, lo que sugiere ligeras variaciones en la distribución de los metales analizados en el dominio 1.

Dominio 2 el conjunto de datos del "Composite" presenta distribuciones más dispersas, mientras que el conjunto "Capped" está más concentrado, lo que sugiere que los valores extremos han sido restringidos o "recortados" en el análisis para los datos "Capped".

Figura 45

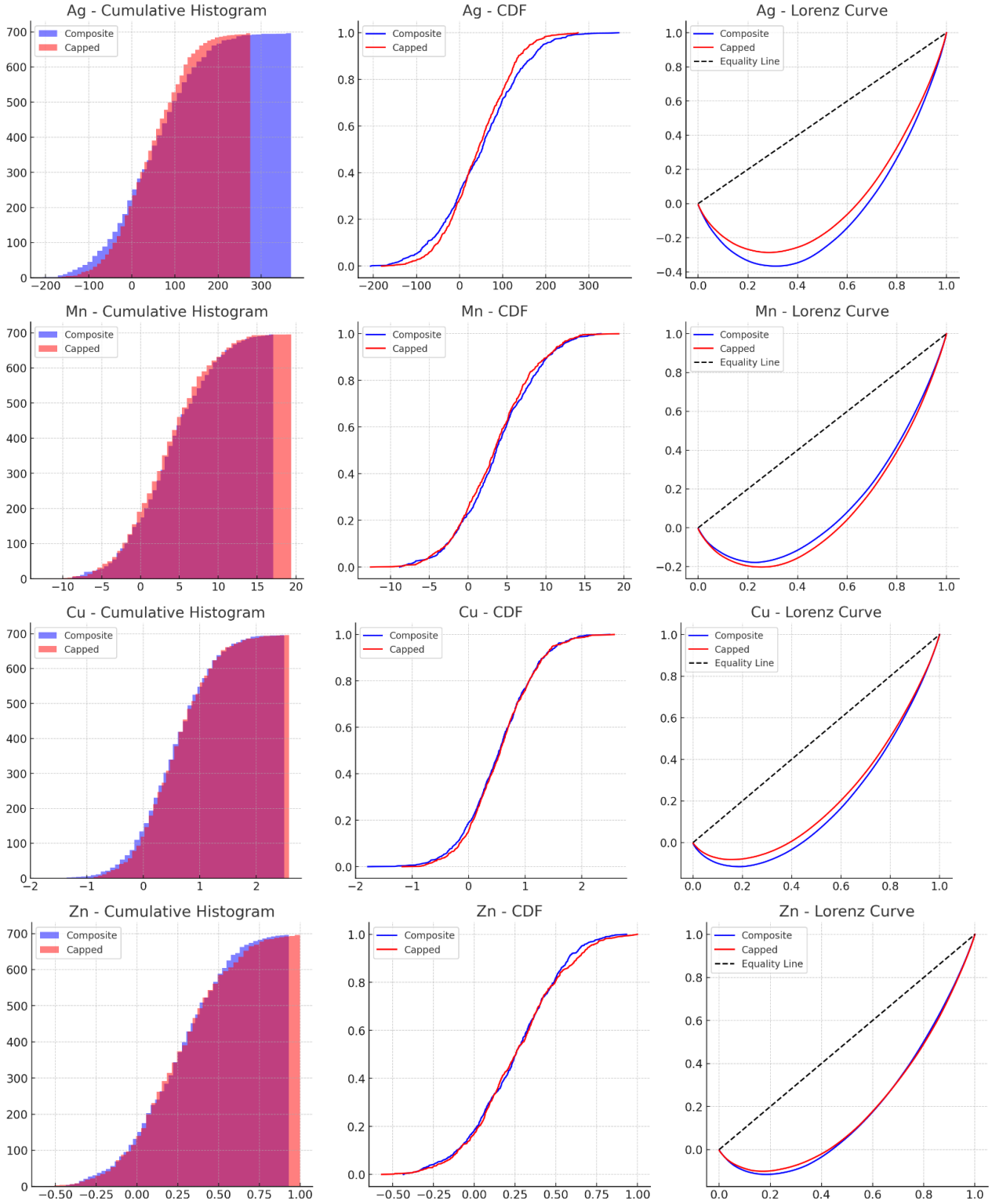
Histograma, CDF y Curva de Lorenz para el dominio 2 de cada mineral.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 46

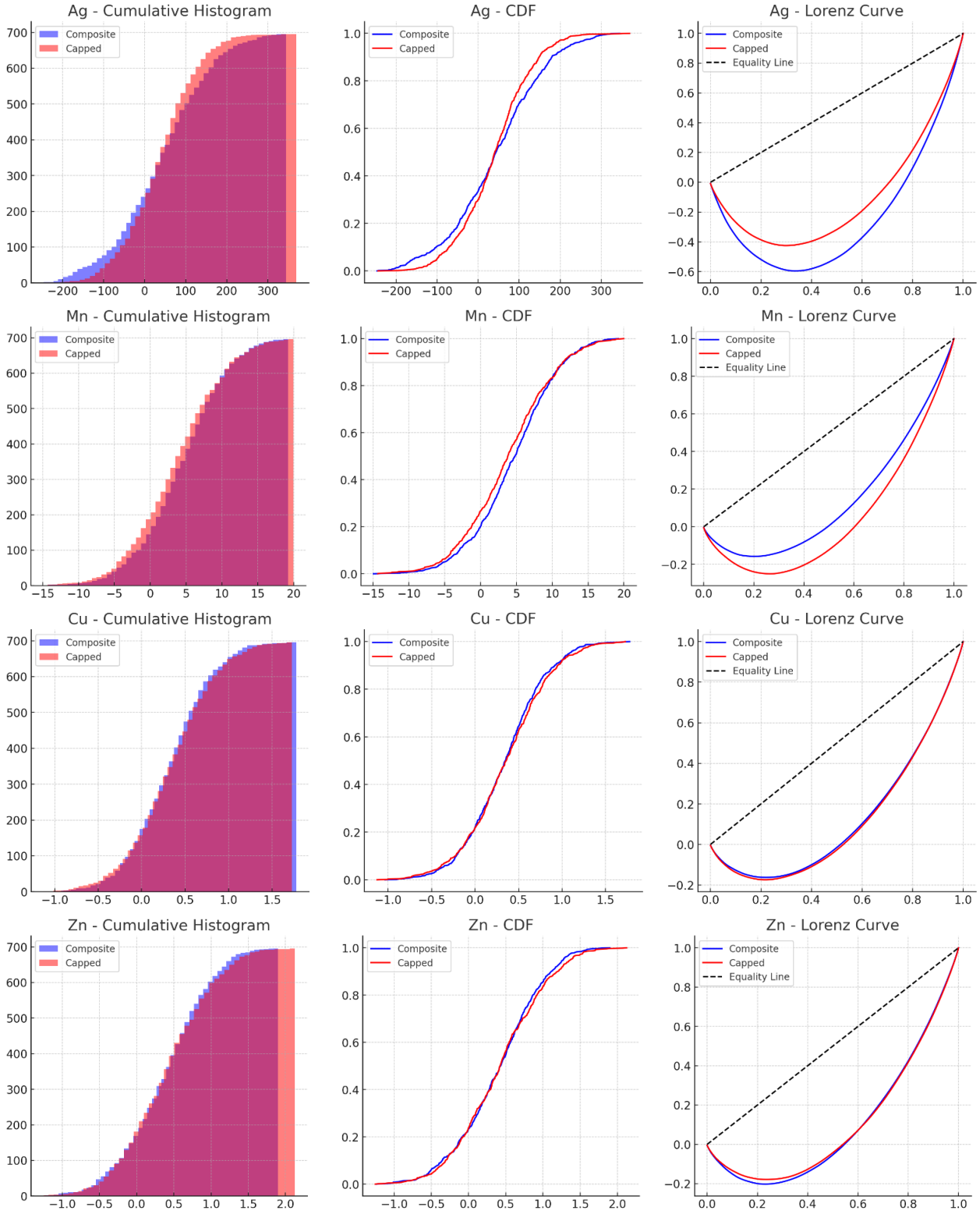
Histograma, CDF y Curva de Lorenz para el Dominio 3 de cada mineral.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 47

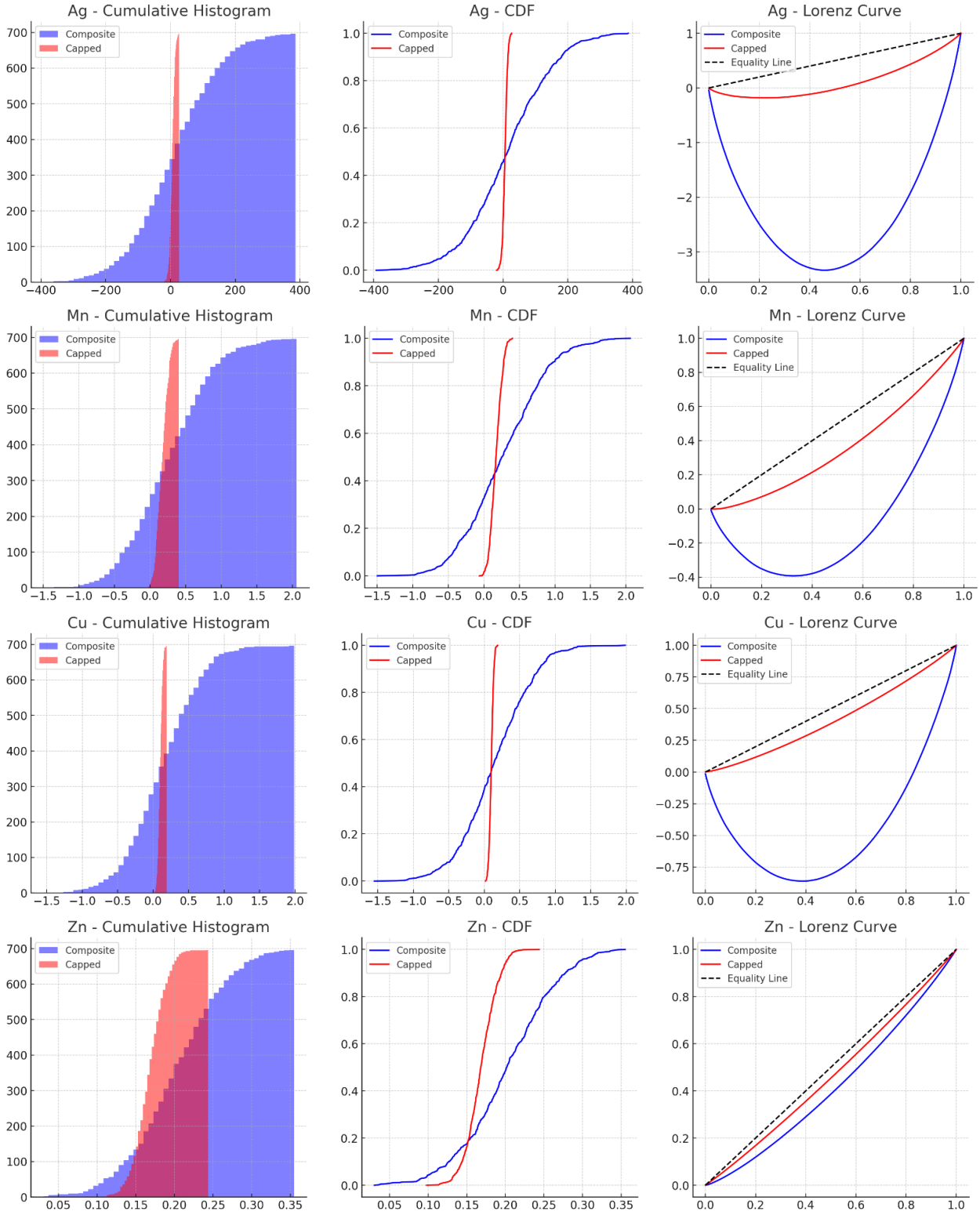
Histograma, CDF y Curva de Lorenz para el dominio 4 de cada mineral.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 48

Histograma, CDF y Curva de Lorenz para el Dominio 5 de cada mineral.

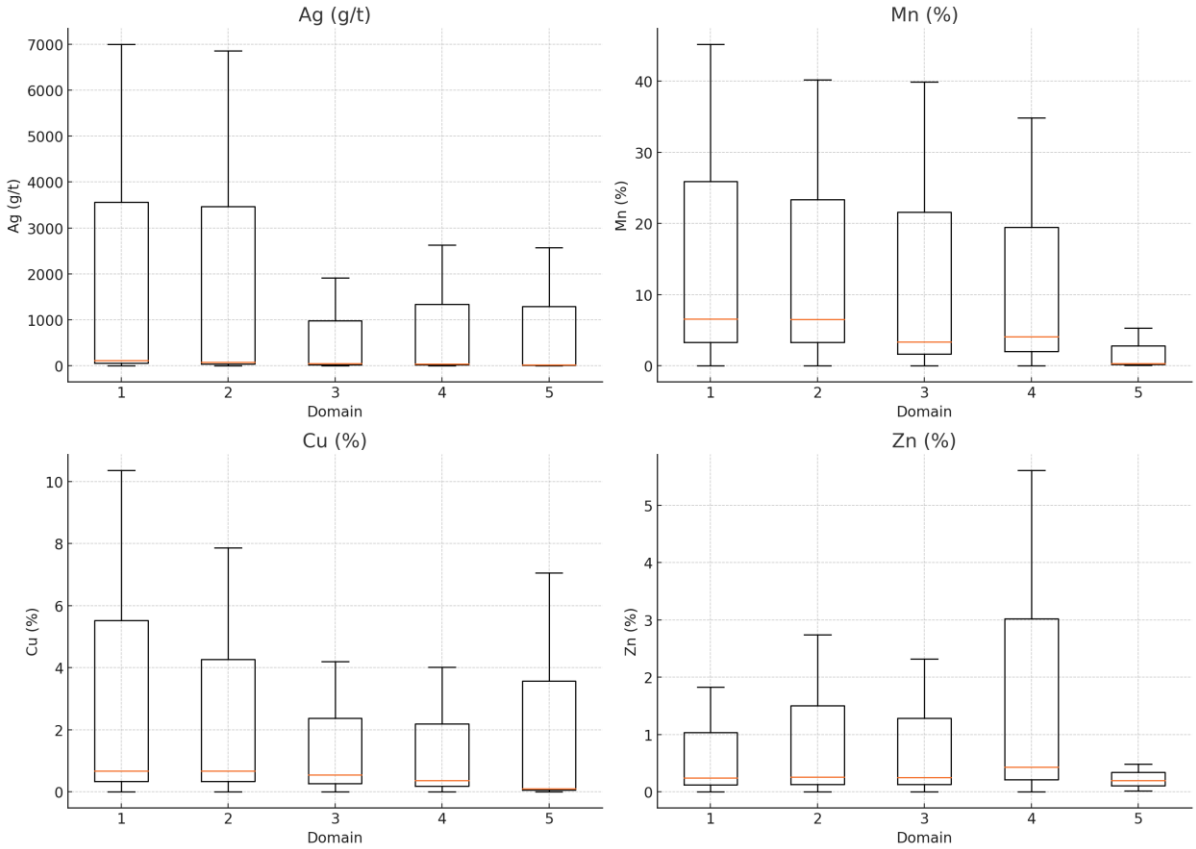


Fuente: Elaboración propia.

Este análisis sugiere que los primeros dominios tienen una mayor dispersión y podrían incluir depósitos con características extremas, mientras que los últimos dominios presentan características más homogéneas y concentradas, como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 49

Box plots de los compositos por dominio de cada mineral Ag, Mn, Cu y Zn.



Los valores de Ag y Mn muestran una gran variabilidad en todos los dominios, especialmente en los primeros dominios (1 y 2), lo que indica que hay algunos valores extremadamente altos que influyen en las distribuciones.

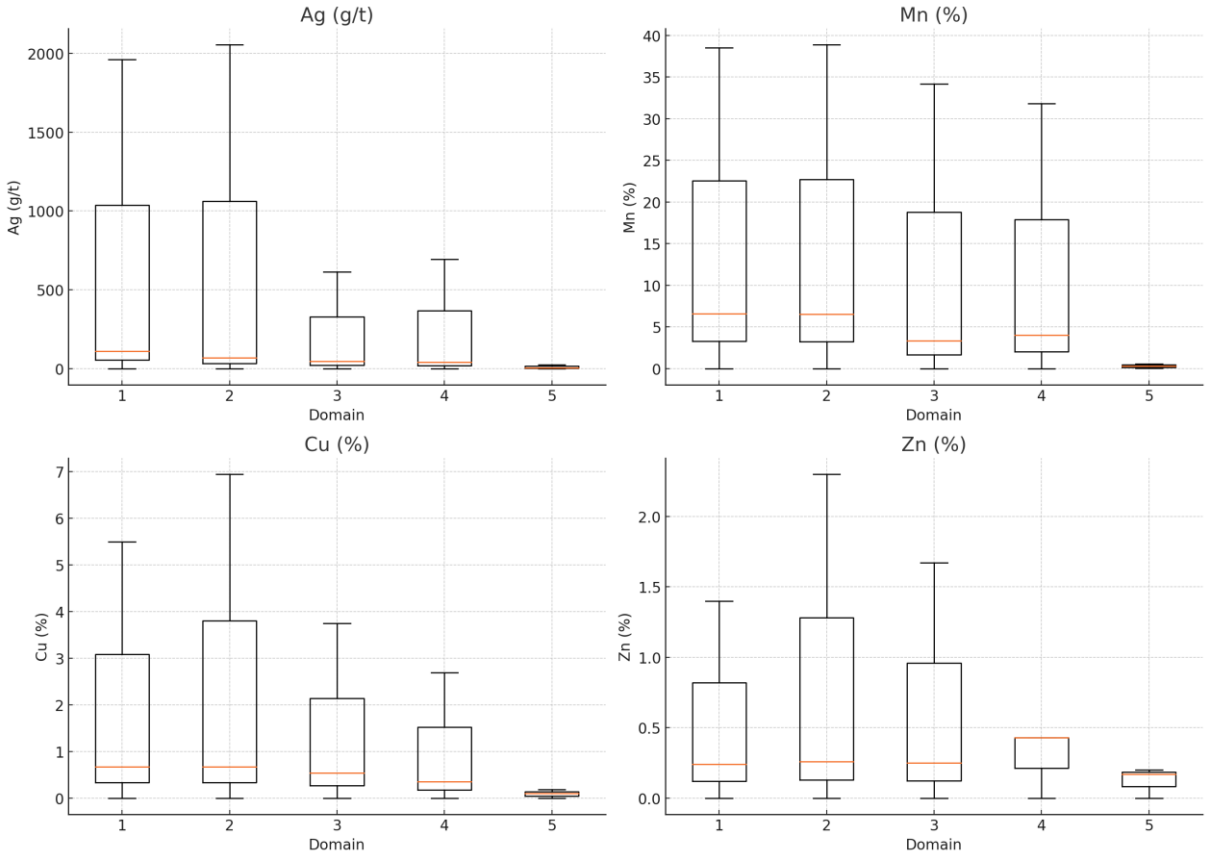
Cu y Zn presentan una variabilidad más controlada, especialmente en los dominios 3, 4 y 5.

El Dominio 5 en todos los minerales tiende a tener una menor variabilidad y valores más concentrados en el extremo inferior de la distribución.

Esta interpretación sugiere que los dominios 1 y 2 podrían ser más atractivos desde la perspectiva de la explotación minera, dado su mayor contenido y variabilidad en los minerales, mientras que el dominio 5 parece ser menos prometedor.

Figura 50

Box plots de los capped por dominio de cada mineral Ag, Mn, Cu y Zn.



Dominio 1 y 2: En general, los dominios 1 y 2 muestran la mayor variabilidad en todos los minerales (Ag, Mn, Cu y Zn). Esto sugiere que estas áreas tienen una mayor diversidad en la concentración de minerales, lo que podría ser indicativo de un área geológicamente más compleja o diversa.

Dominio 3 y 4: Estos dominios tienen una variabilidad moderada, con concentraciones más bajas en comparación con los dominios 1 y 2. Los valores son más agrupados, lo que sugiere una menor diversidad en las concentraciones de minerales.

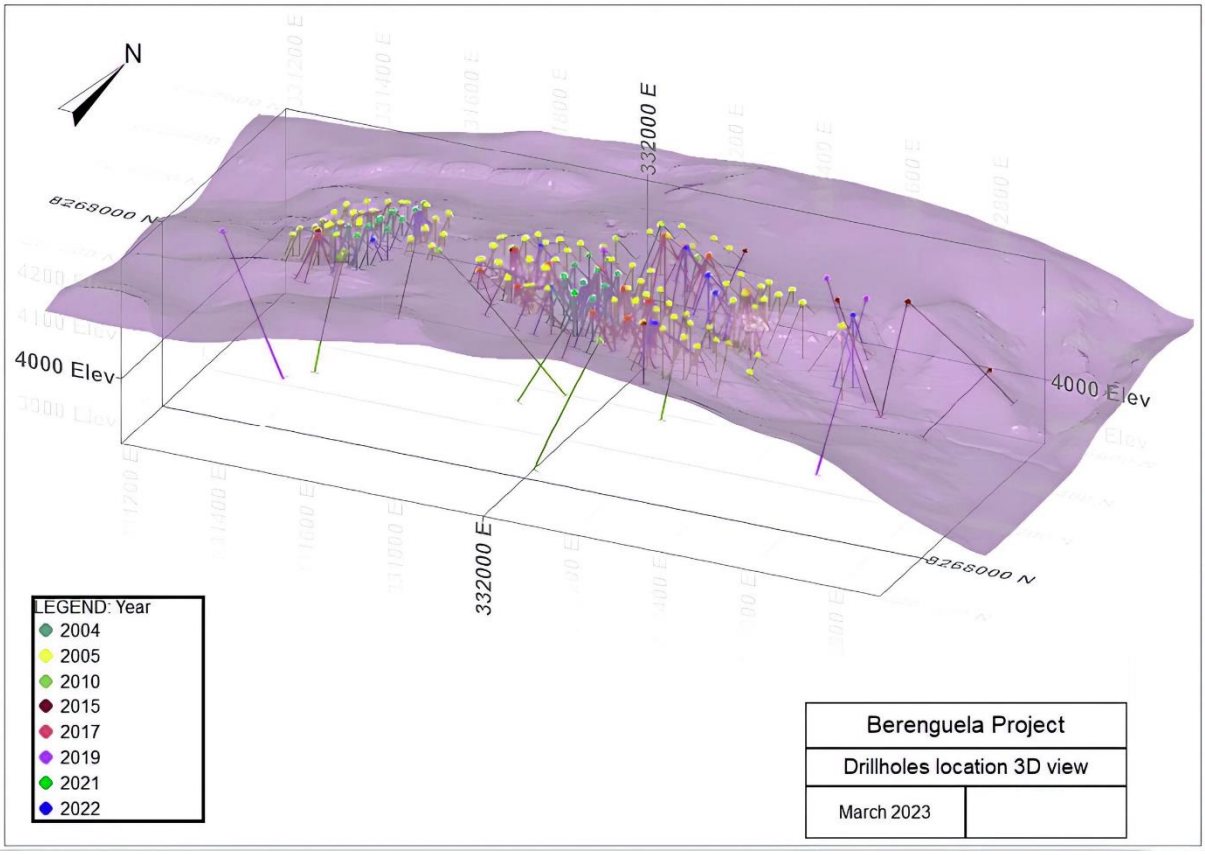
Dominio 5: Este dominio es notablemente diferente con concentraciones extremadamente bajas en todos los minerales evaluados, indicando posiblemente una zona con mineralización mucho menos significativa.

4.6. Análisis geoestadístico

Esta imagen muestra una vista 3D de los pozos de perforación en el Proyecto Berenguela. Se observan las ubicaciones de perforación de diferentes años (2004-2022), representados por puntos de diferentes colores

Plano 4

Plano de perforación del proyecto minero Berenguela.



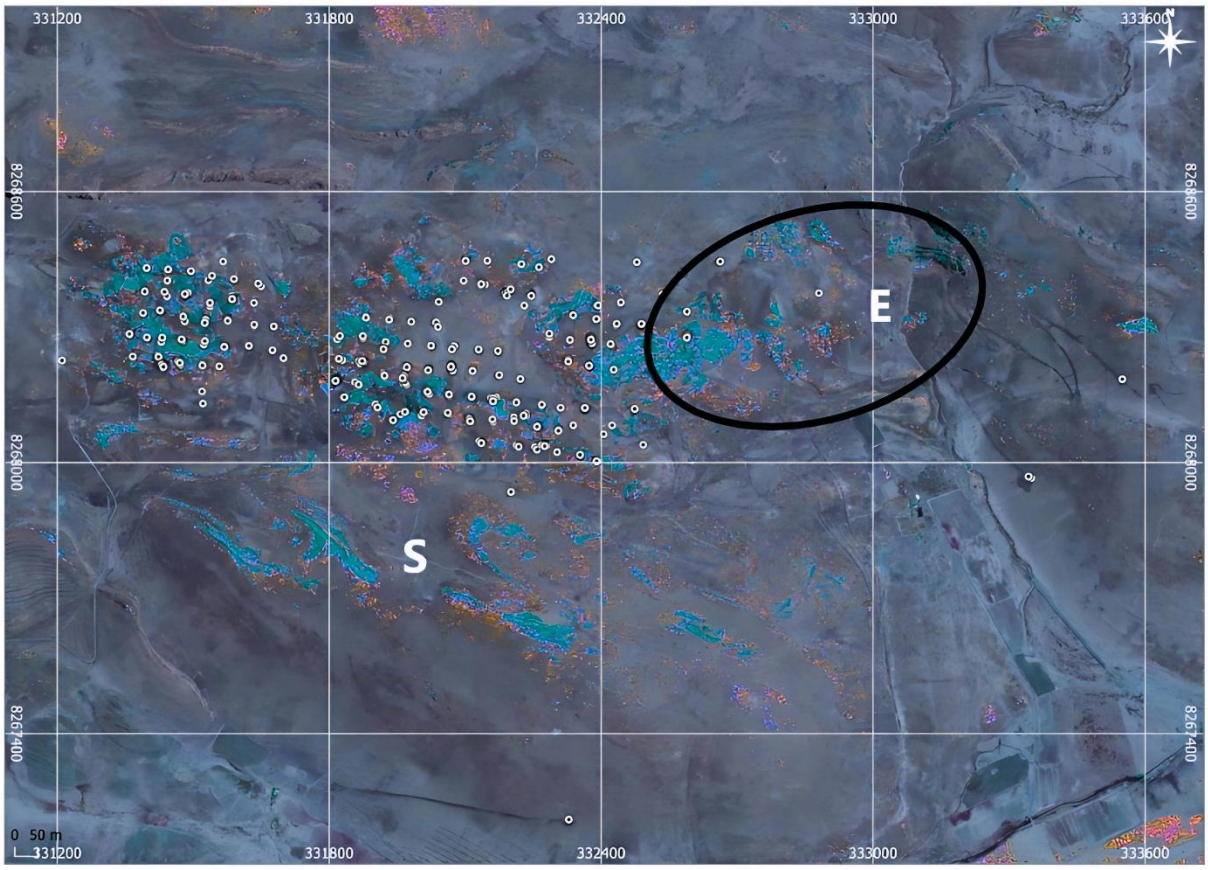
Fuente: proyecto berenguela

La siguiente imagen de ubicación de muestreo, que muestra el mapa satelital, refuerza esta observación, destacando áreas específicas ("E" y "S") donde se ha centrado gran parte de

la actividad de perforación. La ubicación densa de los pozos en estas áreas sugiere que son regiones con potencial geológico significativo que justifica el interés de la exploración.

Figura 51

figura de muestreo del proyecto minero berenguela



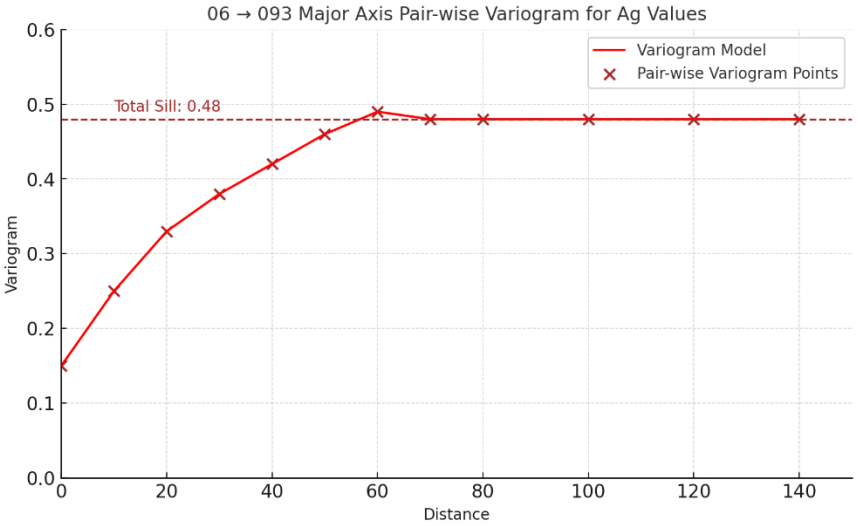
Fuente: Proyecto Minero Berenguela

4.6.1. Análisis de Variogramas

Los semi-variogramas relativos experimentales por pares se calculan y modelan para cada metal en cada dominio mineralizado en LeapFrog EDGE. En la mayoría de los casos y para todos los metales excepto el Dominio 5 donde los datos eran limitados, se ajustaron modelos esféricos de dos estructuras a los semi-variogramas experimentales. Un ejemplo de semi-variogramas experimentales para Ag con modelos ajustados para las tres direcciones principales se muestra en la Figura.

Figura 52

Variograma Eje Mayor - Valores de Plata

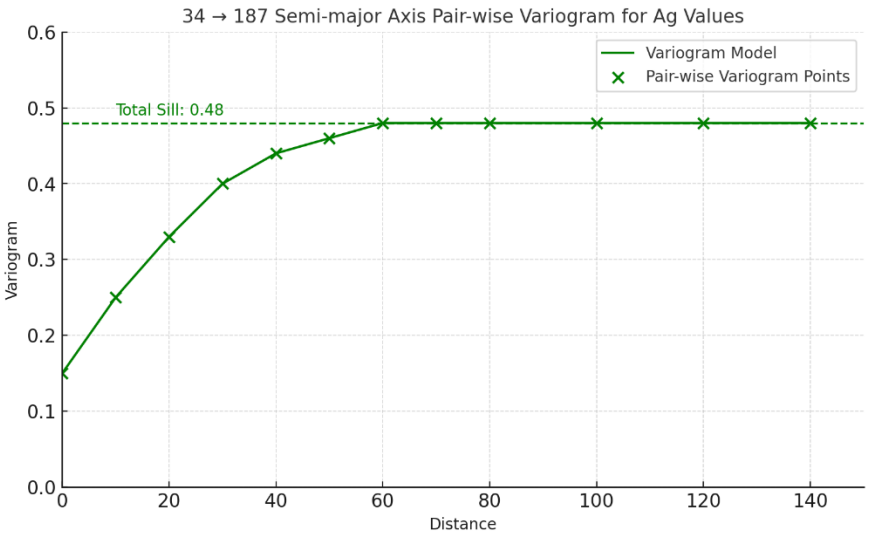


Fuente: Elaboración propia

Nota: El variograma indica una correlación espacial hasta los 60 metros. Más allá de esta distancia, la continuidad de los valores de Ag se pierde.

Figura 53

Variograma de Semi -Mayor (Valores de Plata)

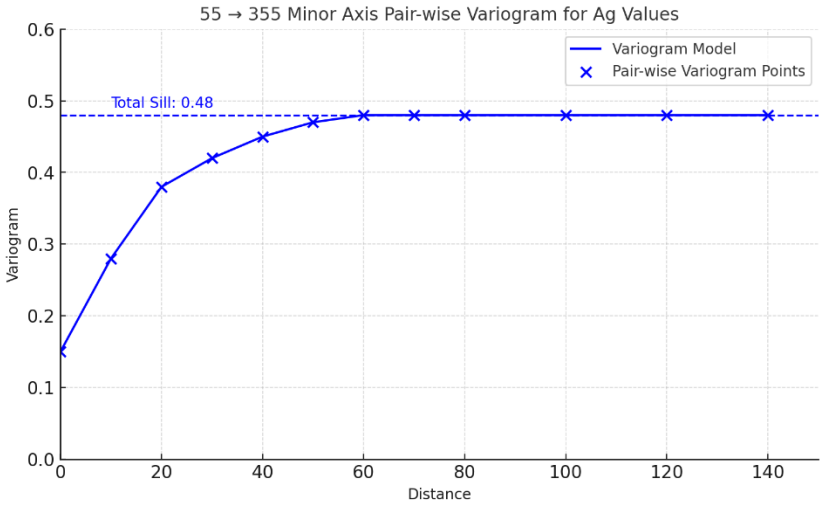


Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la correlación espacial se pierde alrededor de los 60-70 metros, donde el variograma alcanza el sill (0.48).

Figura 54

Variograma para Valores de Plata (Eje Menor)

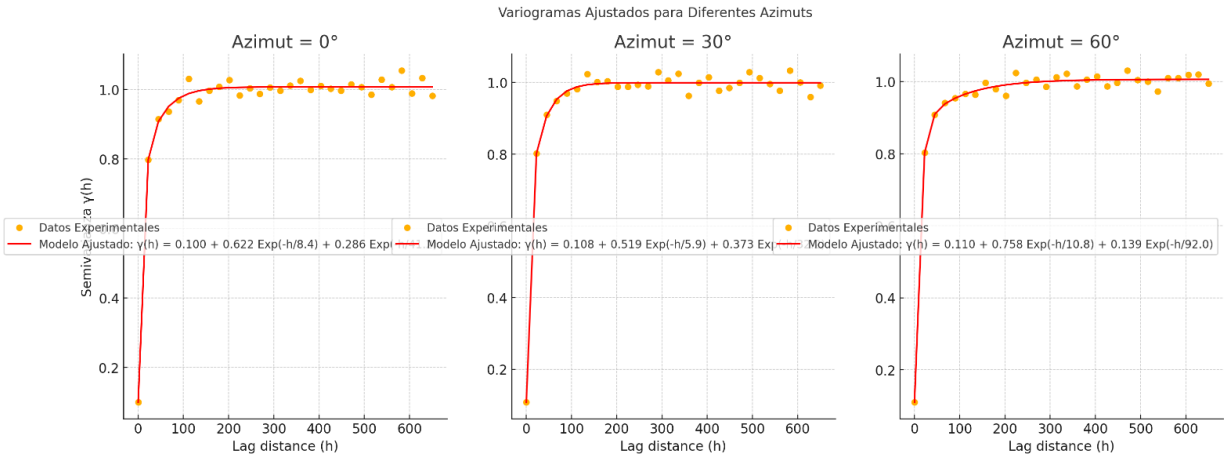


Fuente: Elaboración propia.

La correlación espacial desaparece aproximadamente después de los 60 metros, como se observa por la estabilización de la curva.

Figura 55

Variogramas ajustados para diferentes azimuts (Ag)



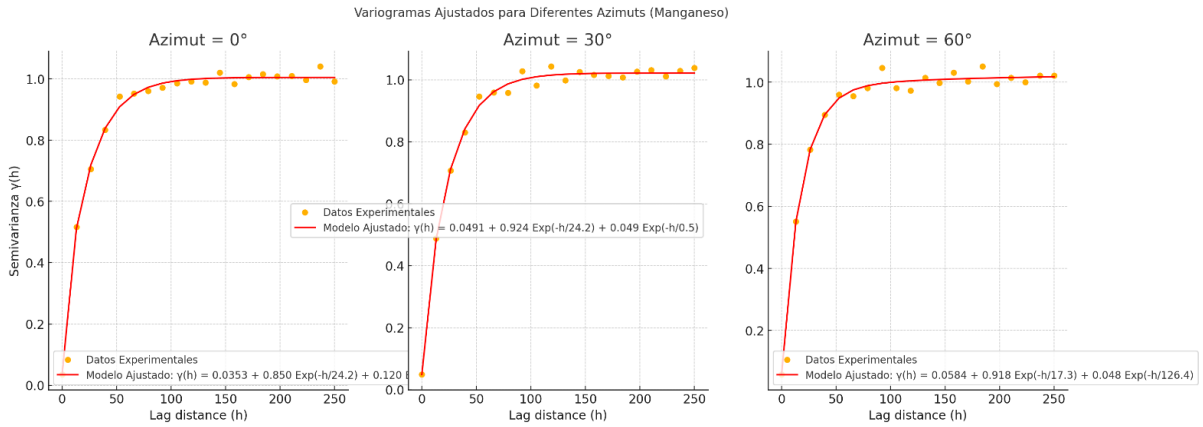
Fuente: Elaboración propia.

La variabilidad espacial del manganeso tiene una fuerte componente direccional. La continuidad de la mineralización parece ser mayor en la dirección de azimut 0°, seguida por el azimut 30°, y finalmente el azimut 60°, donde la continuidad es más limitada.

Existe anisotropía en la variabilidad espacial, lo cual es común en depósitos minerales. Los diferentes alcances en cada dirección indican que la continuidad de la mineralización varía con la dirección, lo cual es crucial para la modelización geológica y la planificación de la explotación del depósito.

Figura 56

Variogramas ajustados para diferentes azimuts (Mn)



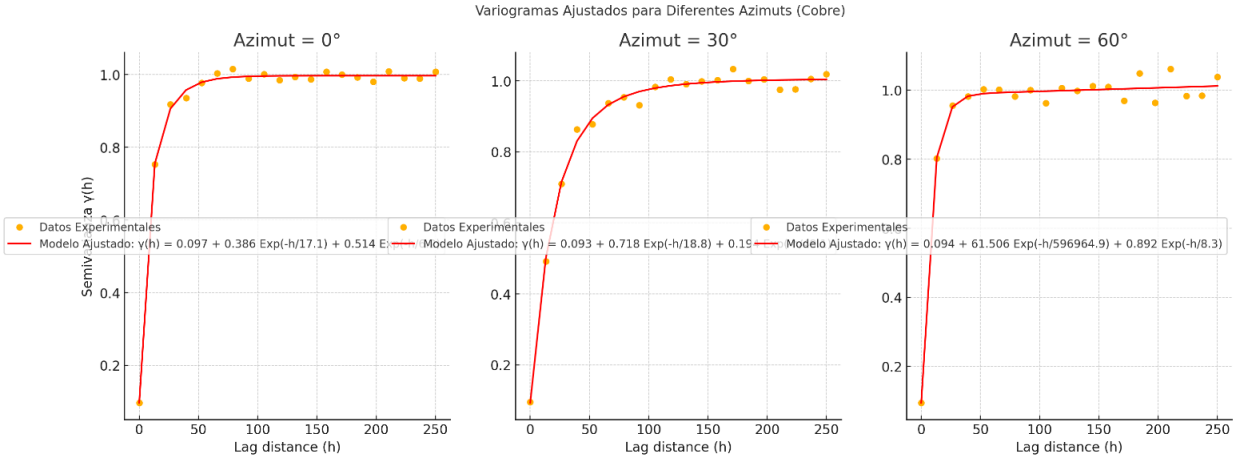
Fuente: Elaboración propia.

La variabilidad espacial del cobre muestra anisotropía, con diferencias en la continuidad de la mineralización según la dirección. La mayor continuidad se observa en la dirección de azimut 0° (alcance más largo en la primera estructura), seguida por azimut 30° y finalmente azimut 60°, donde la continuidad es más limitada.

La anisotropía es evidente en los diferentes alcances de las estructuras en cada dirección, lo que indica que la dirección preferencial de la continuidad espacial de la mineralización de cobre varía. Esto es crucial para la modelización geológica y la planificación de la explotación del depósito.

Figura 57

Variogramas ajustados para diferentes azimuts (Cu).



Fuente: Elaboración propia.

4.6.2. Selección del Modelo Geoestadístico

Justificación:

A) Comportamiento Esférico:

El modelo esférico se caracteriza por un aumento rápido en la varianza con la distancia y luego se nivela, lo que concuerda muy bien con el comportamiento observado en los variogramas presentados. Este modelo es ideal para datos donde la correlación espacial se reduce a cero rápidamente y luego se mantiene constante.

B) Comparación con Otros Modelos:

Modelo Gaussiano: Este modelo tiene un aumento más suave y continuo, lo que significa que la correlación se reduce más gradualmente con la distancia. En los variogramas proporcionados, la varianza aumenta rápidamente antes de estabilizarse, lo que hace que el modelo gaussiano sea menos apropiado.

Modelo Exponencial: Este modelo también aumenta rápidamente, pero no se estabiliza tan abruptamente como el esférico. En los variogramas, la estabilización es clara, lo que sugiere que el modelo esférico es más adecuado.

Modelo Lineal: Un modelo lineal continuaría aumentando indefinidamente con la distancia, lo que no coincide con la estabilización observada en los variogramas.

La elección del modelo esférico para los variogramas de Ag, Mn, Cu y Zn es justificada debido a su capacidad para modelar adecuadamente el comportamiento observado en los datos experimentales: un rápido aumento en la varianza que se estabiliza a una distancia moderada. Este comportamiento es coherente con las propiedades geológicas de los depósitos minerales, donde la correlación espacial tiende a desaparecer después de cierta distancia.

4.6.3. Estimación de Dominios Geoestadísticos

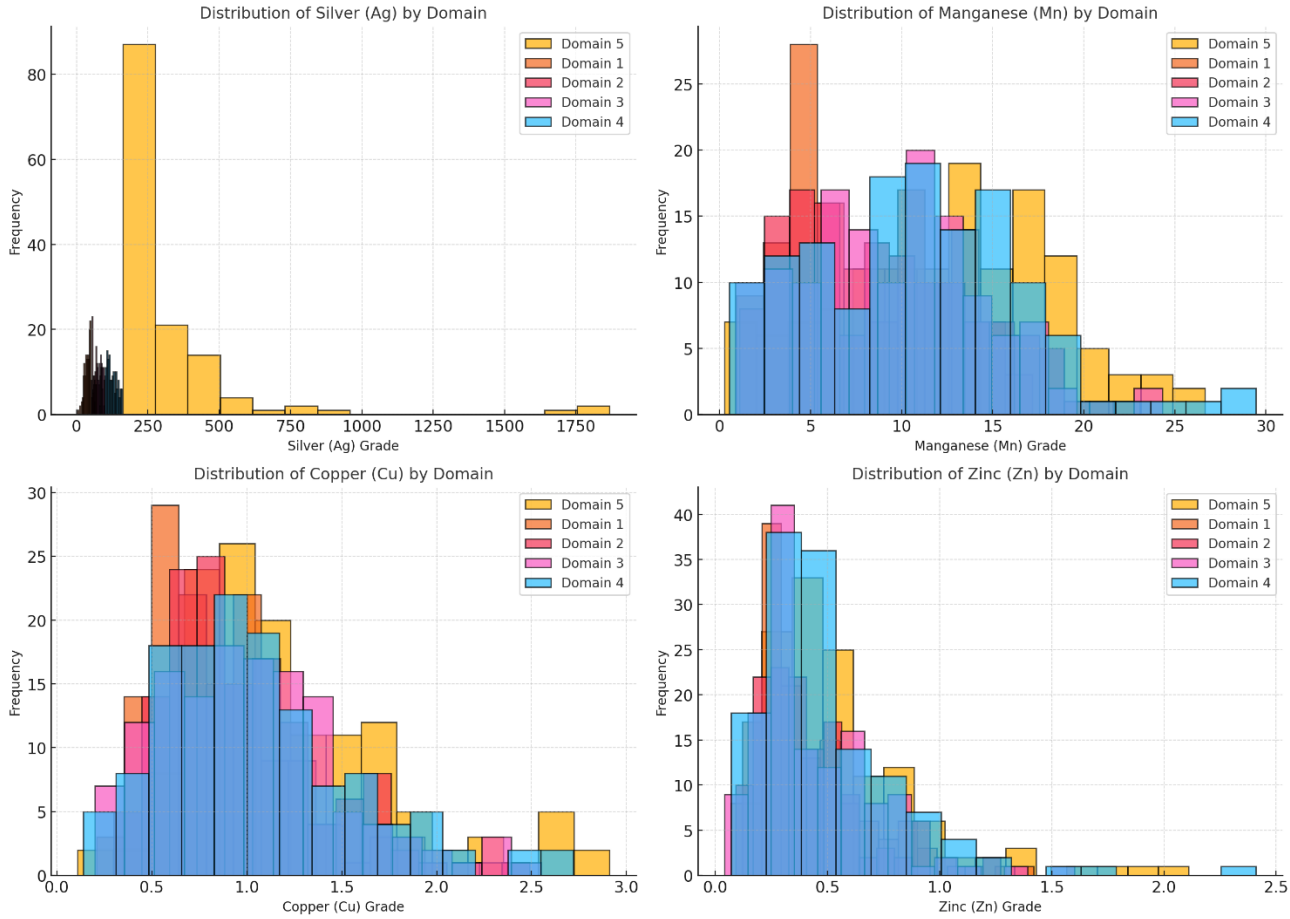
Al comparar los histogramas de diferentes elementos, se pueden identificar posibles correlaciones o asociaciones entre ellos. Por ejemplo, si los picos de las distribuciones de dos elementos coinciden, podría sugerir una asociación genética entre los minerales.

La Plata (Ag) y zinc (Zn) muestran una correlación positiva con los dominios superiores, lo que puede indicar coexistencia en zonas de alta mineralización.

El manganeso (Mn) y el cobre (Cu) tienen distribuciones más uniformes, indicando que pueden estar distribuidos más ampliamente en todos los dominios.

Figura 58

Distribución de Leyes por Dominio en el Yacimiento.



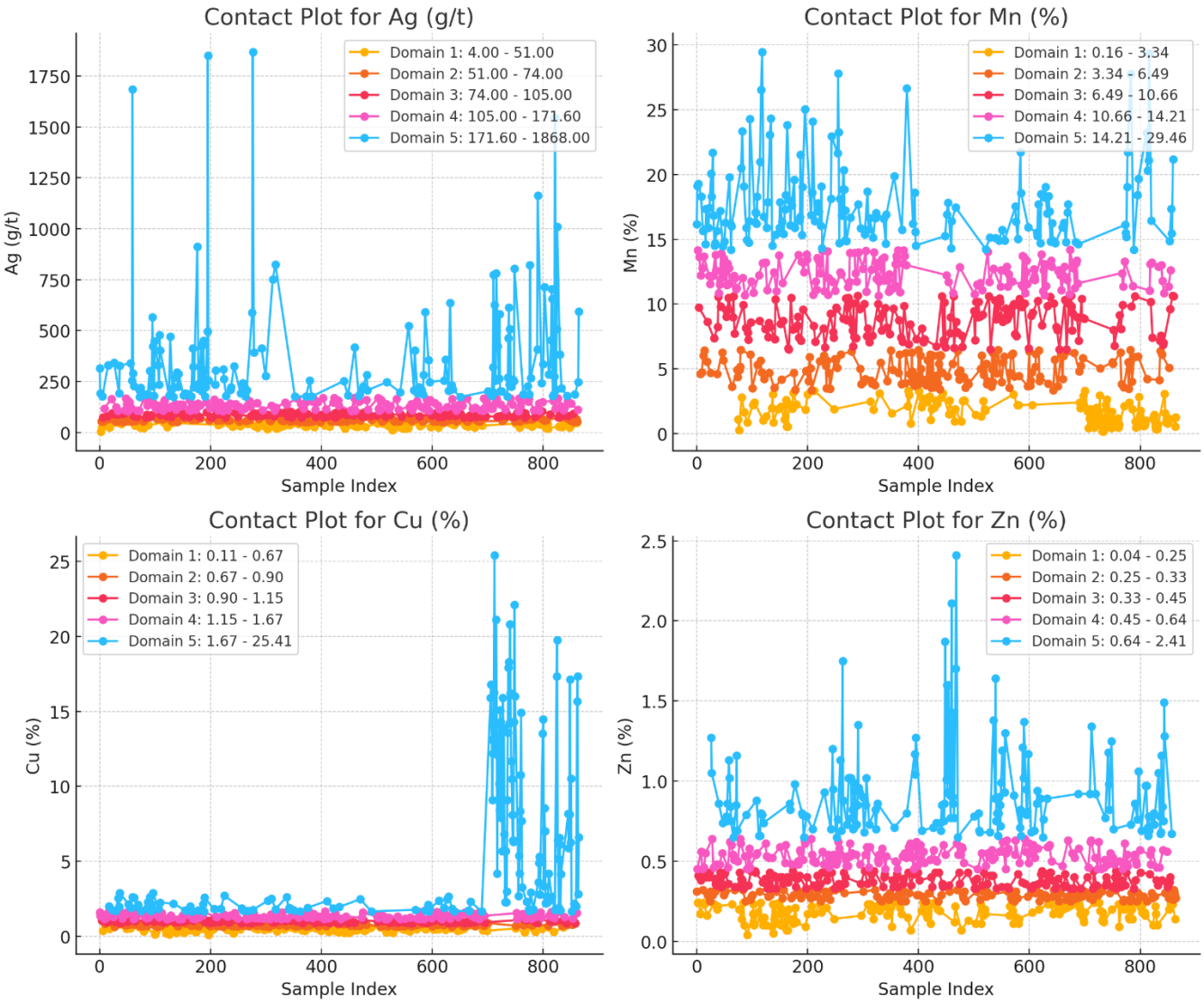
Fuente: Elaboración propia.

4.6.3.1. Contact Plot

los gráficos de contacto es una herramienta de visualización y análisis de las relaciones espaciales entre diferentes zonas de datos. Estos gráficos ayudan a comprender cómo las variables cambian en los límites del dominio, lo que es esencial para una estimación precisa.

Figura 59

Contact plot del elemento de Ag, Mn, Cu y Zn por cada dominio



Fuente: Elaboración Propia

4.6.4. Estimación de Modelo de Bloques

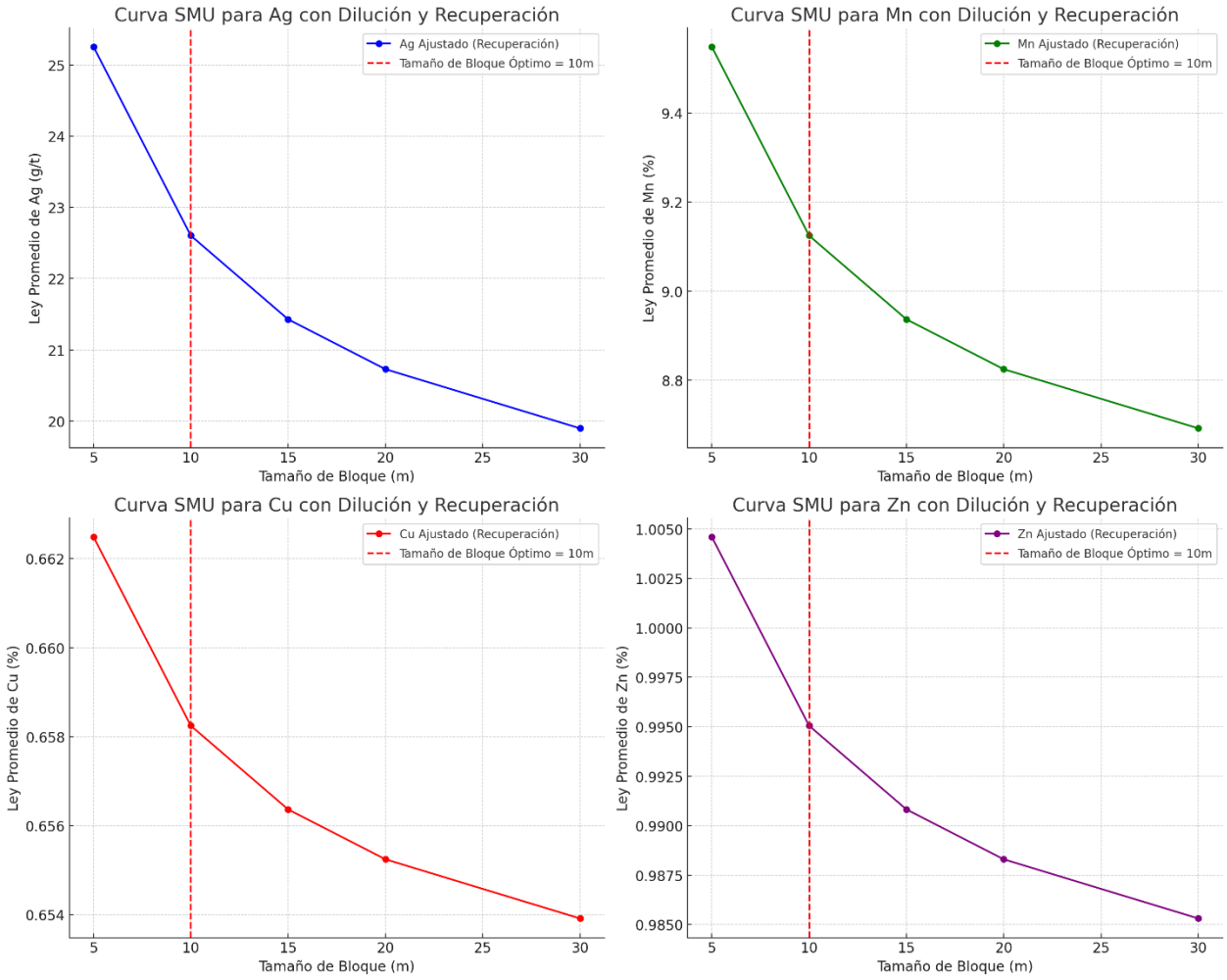
4.6.4.1. Tamaño de Bloque

El tamaño de bloque es crucial en la estimación de recursos, ya que impacta la precisión y resolución del modelo. El tamaño de bloque padre utilizado es de 10 m x 10 m x 5 m, lo cual es adecuado para la mayoría de los modelos de yacimientos polimetálicos. Sin embargo, se ha implementado un sub-bloqueo que permite una mayor resolución espacial, con tamaños de

bloque tan pequeños como 2.5 m x 2.5 m x 0.005 m, lo cual indica un modelado detallado en la dirección Z, probablemente debido a variaciones verticales más finas en el yacimiento.

Figura 60

Curva SMU Para Ag, Mn, Cu y Zn Con Dilución Y Recuperación



Fuente: Elaboración propia

4.6.4.2. Geometría del Modelo de Bloque

La geometría general del modelo no está rotada, lo que simplifica la interpretación y el procesamiento de datos. La ubicación de origen y las dimensiones del modelo indican que se está modelando una porción específica del yacimiento con precisión. Dado el número de bloques en cada dirección (172 en X, 80 en Y, y 84 en Z), el modelo cubre un área considerablemente grande, especialmente en las direcciones X e Y.

4.6.4.3. Volumen Total del Modelo

El volumen total del modelo puede ser estimado multiplicando el número de bloques por el tamaño de los bloques en cada dirección.

4.6.4.4. Parámetros del modelo de bloque

Tabla 6

Parámetros del modelo de bloque.

Parámetros	X	Y	Z
Origen(m)	331,180	8,267,800	3,850
Máximo tamaño de bloque (m)	10	10	5
Mínimo tamaño de bloque (m)	2.5	2.5	0.005
N° de bloques	172	80	84

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del modelo de bloques subcelulado descrito, la selección de tamaños de bloque específicos (10m x 10m x 5m para bloques padres y 2.5m x 2.5m x 0.005m para sub-bloques)

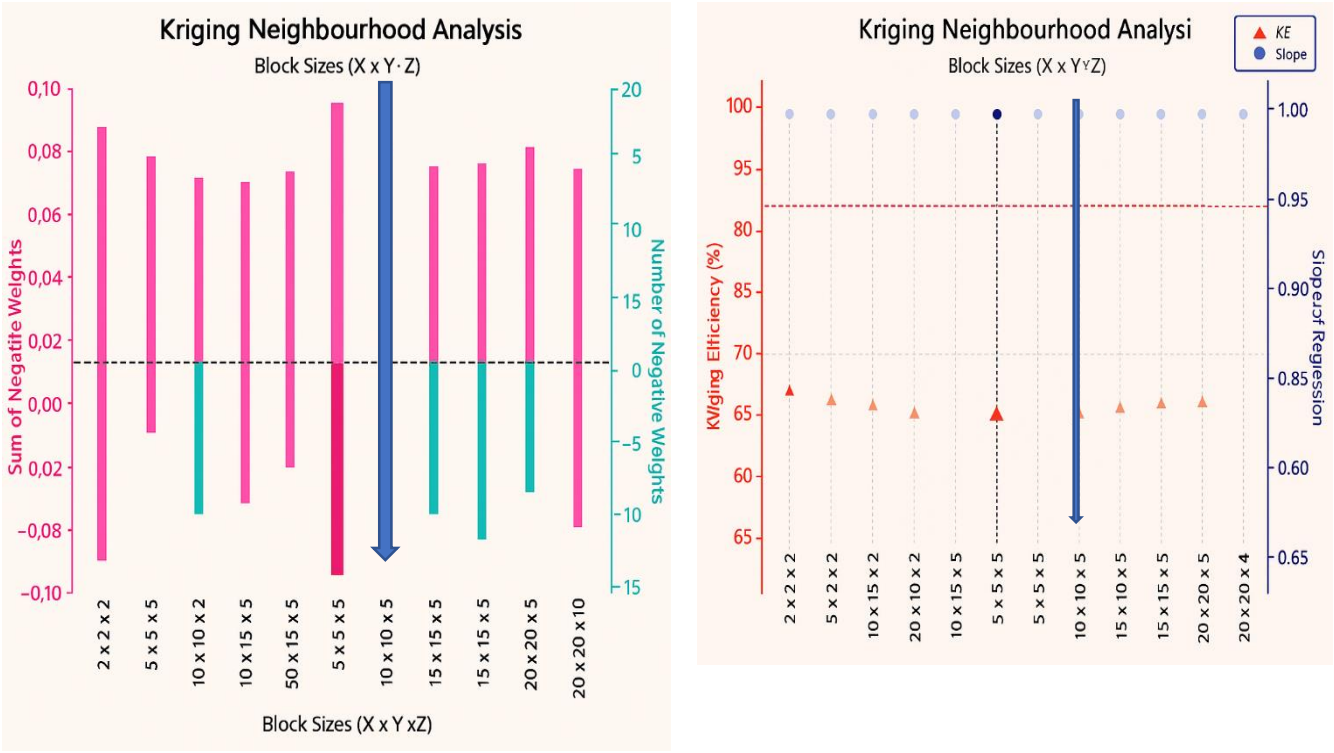
El modelo de bloque diseñado es robusto y detallado, apto para estimar la distribución espacial de los minerales en un yacimiento polimetálico. La capacidad de sub-bloqueo permite un mayor detalle, especialmente en la dirección vertical, lo cual es beneficioso para la caracterización de yacimientos con estructuras complejas. El tamaño del bloque es adecuado para capturar la variabilidad de los minerales en las escalas relevantes para la minería, lo que proporciona una base sólida para la toma de decisiones en términos de planificación y evaluación de recursos.

A) Análisis cuantificado de la vecindad de kriging (QKNA).

El QKNA es una técnica geoestadística valiosa para determinar el tamaño de bloque óptimo en el kriging de bloques. Al evaluar cuantitativamente el impacto de diferentes tamaños de bloque en la precisión de las estimaciones, es posible lograr estimaciones más precisas y confiables de los recursos minerales.

Figura 61

Análisis QKNA para definir el tamaño de Block



Fuente: Elaboración Propia.

4.6.5. Estimación de Recursos Minerales por categoría

4.6.5.1. Evaluación de la densidad de perforación

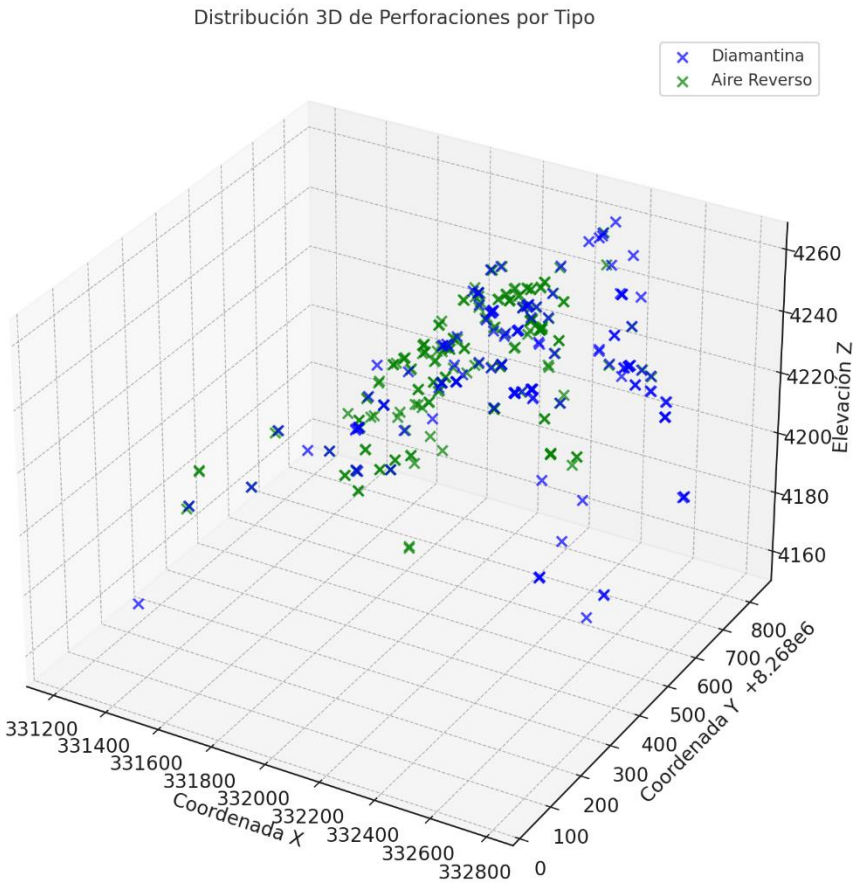
Aquí tienes el modelo 3D que muestra la ubicación y distribución espacial de los tipos de perforaciones

Azul: Perforaciones diamantinas (mayores a 100 m de profundidad).

Verde: Perforaciones de aire reverso (menores o iguales a 100 m).

Figura 62

Distribución 3D De Perforaciones Por Tipo



Fuente: Elaboración propia.

4.6.5.2. Mapa de Calor

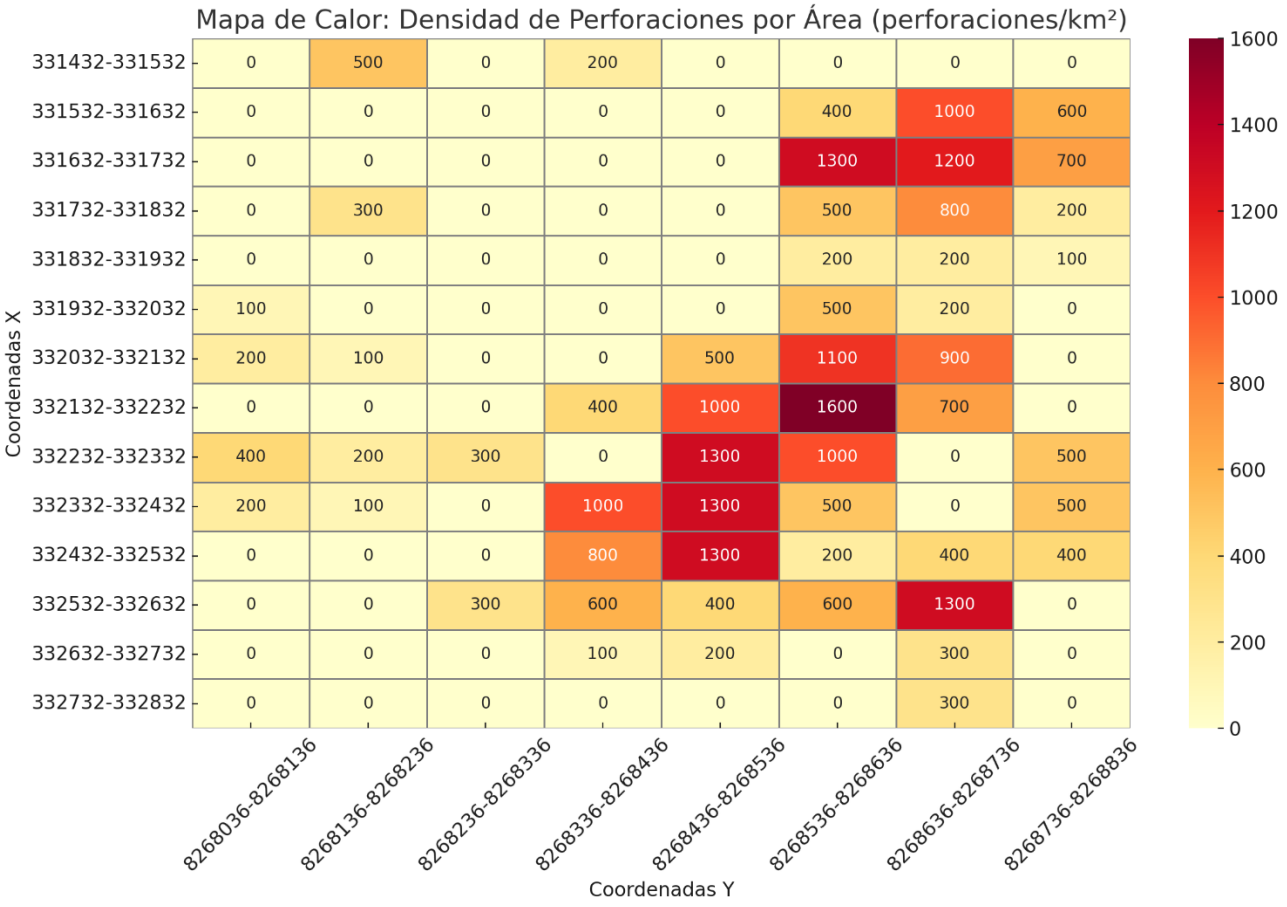
El gráfico muestra visualmente la densidad de perforaciones por cada celda del yacimiento. Las zonas más rojas representan mayor densidad (mayor actividad de perforación), mientras que las zonas más claras tienen baja o nula densidad.

Este gráfico muestra un mapa de calor de la densidad de perforaciones por área en el Proyecto Berenguela. El mapa está organizado en coordenadas X y coordenadas Y (en UTM), donde cada celda representa el número de perforaciones realizadas en esa área específica. La coloración intensa indica la densidad de perforaciones, con los colores más oscuros (rojos y

naranjas) representando áreas con mayor cantidad de perforaciones, mientras que los colores más claros (amarillos) indican menor densidad.

Figura 63

Mapa De Calor: Densidad De Perforaciones Por Área



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7

KPI de densidad de perforación recomendada.

Categoría de recurso	Densidad estimada	Objetivo
Recursos Inferidos	100–200 perf/km²	Exploración inicial
Recursos Indicados	300–600 perf/km²	Evaluación intermedia
Recursos Medidos	>700–1000 perf/km²	Modelamiento avanzado y reservas

Fuente: The JORC Code

El Índice de RCB es crucial para evaluar la viabilidad económica de los depósitos polimetálicos. Los recursos medidos tienen una alta certeza y un Índice de RCB favorable, lo que los hace aptos para proyectos mineros detallados. Los recursos inferidos, con un Índice de RCB bajo, requieren más exploración antes de que se puedan considerar rentables.

Tabla 8

Criterio para clasificación de recursos minerales

Categoría	Índice de RCB	Número de Sondajes
Medido	Índice RCB > 1.5	Alta densidad de perforaciones (25-50 metros)
	Alta rentabilidad	
Indicado	Índice RCB entre 1.2 y 1.5	Densidad de perforaciones moderada (50-100 metros)
	Rentabilidad moderada	
Inferido	Índice RCB < 1.2	Pocas perforaciones o muy espaciadas (más de 100 metros)
	Alta incertidumbre económica	
Consideraciones Adicionales	Interacción de metales: Plata, manganeso, cobre y zinc deben ser evaluados juntos.	Sondajes y datos geoquímicos limitados en recursos inferidos.
	Corte de ley combinado (AgEq) para evaluar la viabilidad.	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9

Recursos medidos, indicados e inferidos del proyecto "BERENGUELA"

Category	Zone	Tonnes (Millones Tn)	Ag (g/t)	Mn (%)	Cu (%)	Zn (%)
Measured	BER01	1.246	110.000	8.500	0.900	0.350
	BER02	1.345	100.000	9.200	0.800	0.250
	BER03	0.827	95.000	7.500	0.700	0.200
	BER04	1.121	105.000	8.900	1.000	0.300
	BER05	1.615	95.000	8.300	0.750	0.400
	Total	**6.154**	**101.000**	**8.890**	**0.850**	**0.300**
Indicated	BER01	3.861	80.000	6.000	0.600	0.300
	BER02	5.213	75.000	5.500	0.700	0.400
	BER03	3.716	70.000	5.200	0.500	0.300
	BER04	4.594	75.000	5.700	0.650	0.350
	BER05	5.034	68.000	5.800	0.700	0.400
	BER06	3.885	78.000	5.400	0.600	0.350
	BER07	7.711	70.000	5.300	0.600	0.300
	Total	**34.014**	**74.000**	**5.600**	**0.630**	**3.330**
Inferred	BER01	1.001	2.000	3.920	0.300	0.200
	BER02	1.505	3.000	2.280	0.450	0.300
	BER03	1.812	4.000	1.610	0.500	0.280
	BER04	2.150	3.500	0.770	0.400	0.220
	BER05	2.225	5.000	0.330	0.600	0.350
	BER06	2.380	2.500	1.610	0.350	0.180
	BER07	2.555	3.800	2.130	0.480	0.260
	BER08	2.700	4.500	1.430	0.550	0.320
	BER09	2.950	2.800	1.010	0.380	0.240
	BER10	3.010	4.200	1.880	0.420	0.210
	Total	**22.288**	**3.570**	**1.940**	**0.420**	**0.250**

Fuente: Elaboración Propia

Los recursos minerales se han determinado con un corte de ley de 80 g/t AgEq, lo que equivale a un corte de ley de 3.55% de manganeso equivalente. El modelo ha sido ajustado por las actividades mineras históricas

Tabla 10

Reporte de clasificación de recursos minerales por el método Kriging Ordinario

Clasificación	Millones de Toneladas	Ag (g/t)	Mn (%)	Cu (%)	Zn (%)
MEDIDO	6.154	101	8.89	0.85	0.3
INDICADO	34.014	74	5.6	0.63	0.34
INFERIDO	22.288	54	3.57	0.42	0.25

Fuente: Elaboración Propia.

CAPITULO V

ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Validación del Modelo de Bloques

la validación del modelo de bloques implica una combinación de métodos visuales y estadísticos para asegurar que las estimaciones de leyes sean confiables y representativas del yacimiento.

5.1.1. Validación Visual

La verificación visual es un paso crítico en la validación de un modelo de bloques, ya que permite comparar directamente las leyes estimadas con los datos reales de perforación. Esto asegura que el modelo esté bien ajustado y refleje adecuadamente la distribución espacial de los minerales.

La buena concordancia entre los datos de perforación y las leyes estimadas sugiere que el modelo de bloques está correctamente calibrado. Esto es fundamental para garantizar que las estimaciones de recursos sean precisas y confiables, lo que impacta directamente en la toma de decisiones para la explotación minera.

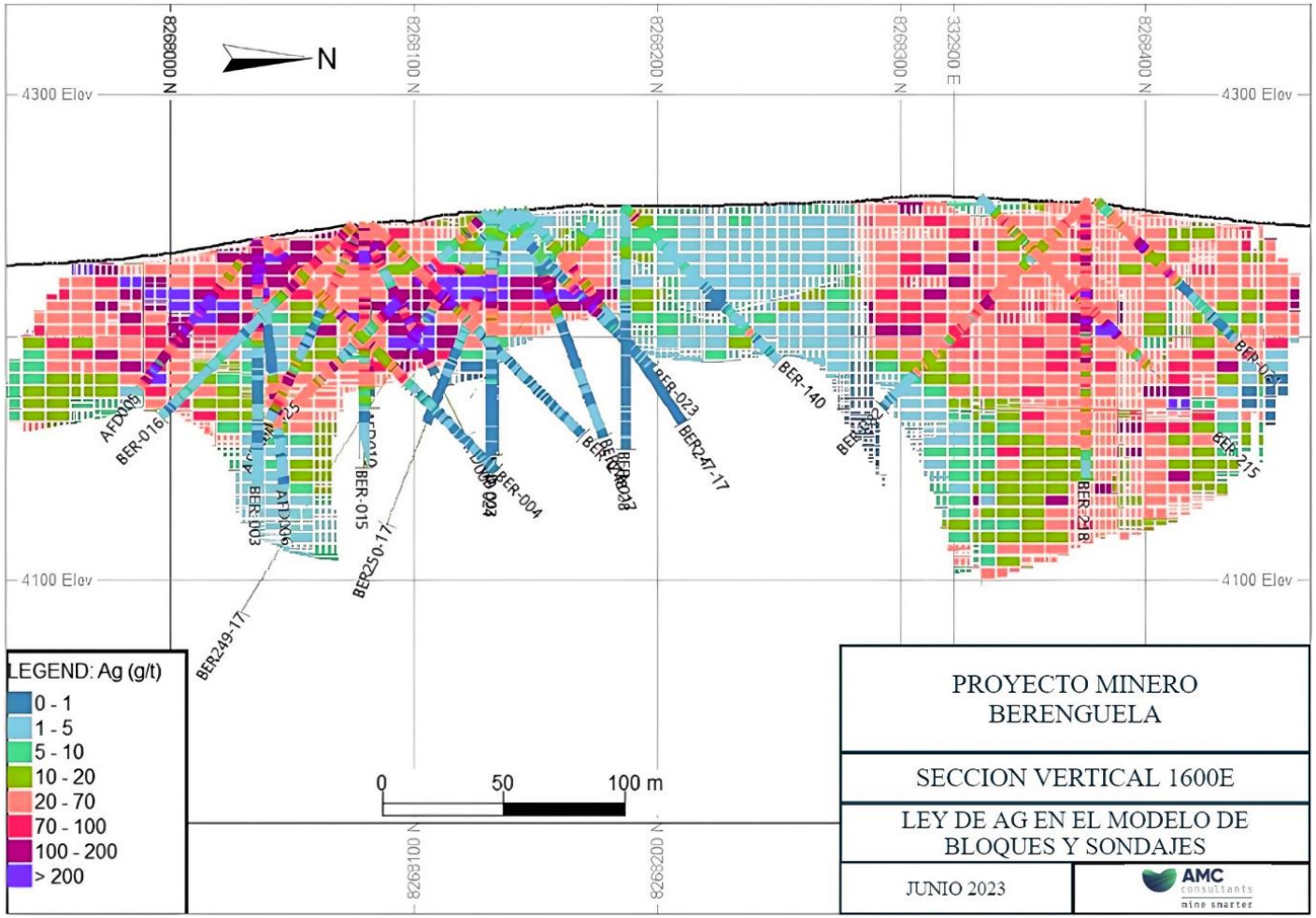
Las secciones transversales y las vistas en planta proporcionan una representación visual clara de cómo las leyes de los minerales se distribuyen en el yacimiento. La línea de sección trazada a través del núcleo del yacimiento es particularmente importante, ya que esta área probablemente contiene la mayor concentración de mineralización, lo que la hace clave para la evaluación del recurso.

La comparación específica de las leyes de Ag, Mn, Cu y Zn en los planos 5,6,7 y 8 permite una validación detallada para estos metales en particular. Esto es crucial en un yacimiento polimetálico, donde la variabilidad entre diferentes elementos puede ser significativa.

La distancia de recorte de 25 m utilizada en el modelo indica que solo se consideraron bloques clasificados dentro de esta distancia en relación con los datos de perforación, lo cual es una práctica común para evitar la sobreestimación o subestimación de las leyes en áreas menos muestreadas.

Plano 5

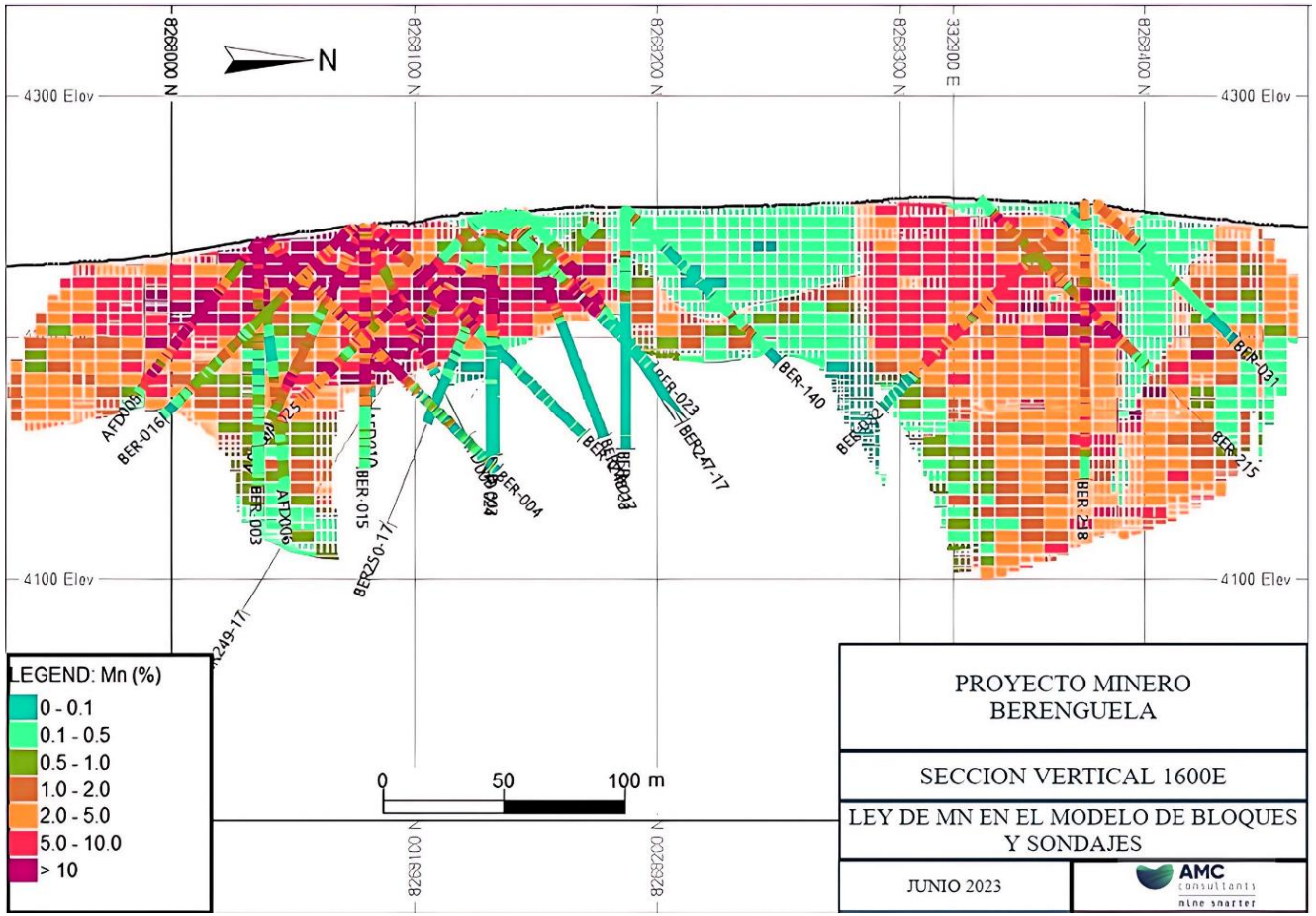
Contenidos de Ag en el modelo de bloques y perforaciones en la sección transversal 1600E.



Fuente: Elaboración propia.

Plano 6

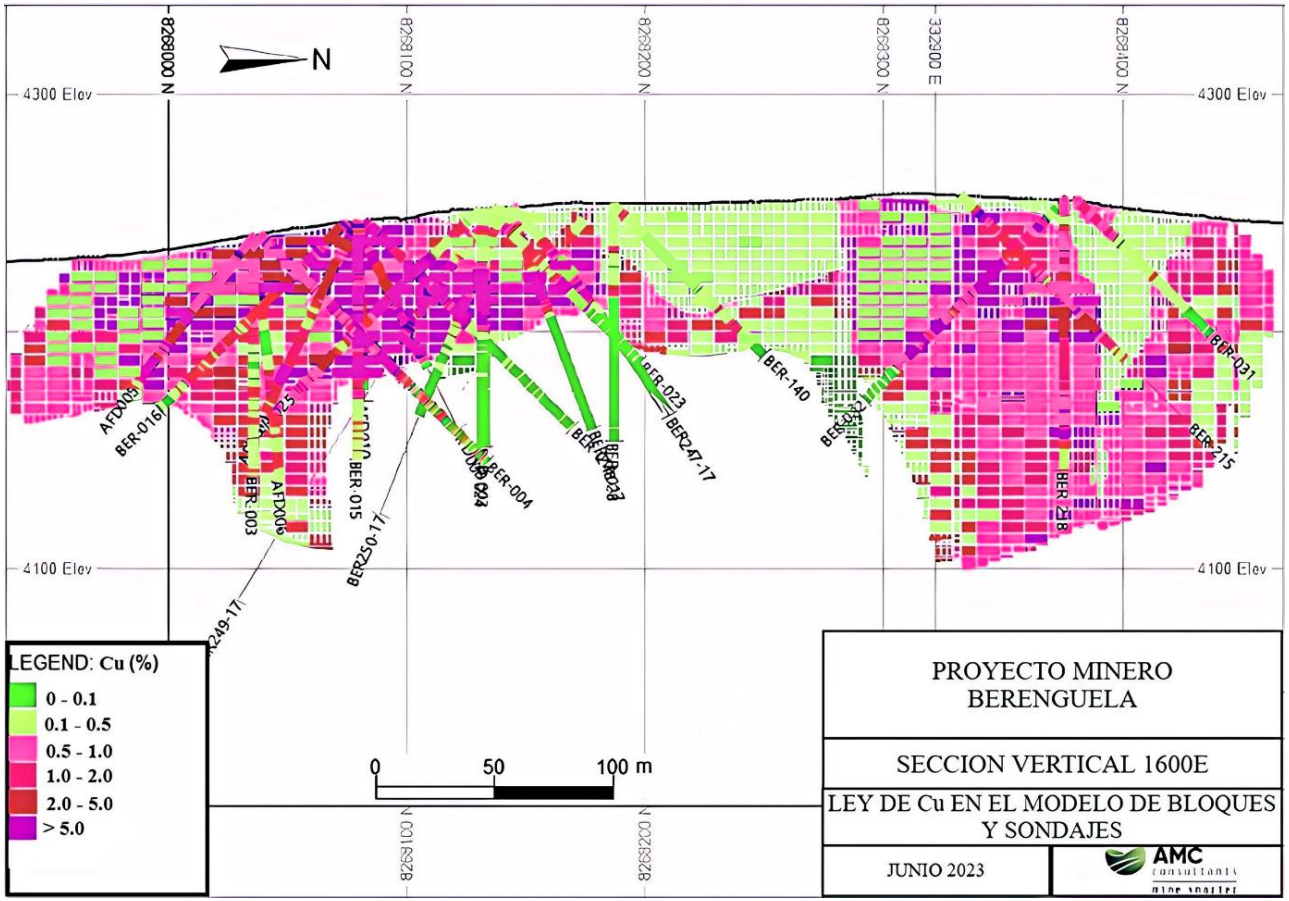
Contenidos de Mn en el modelo de bloques y perforaciones en la sección transversal 1600E.



Fuente: Elaboración propia.

Plano 7

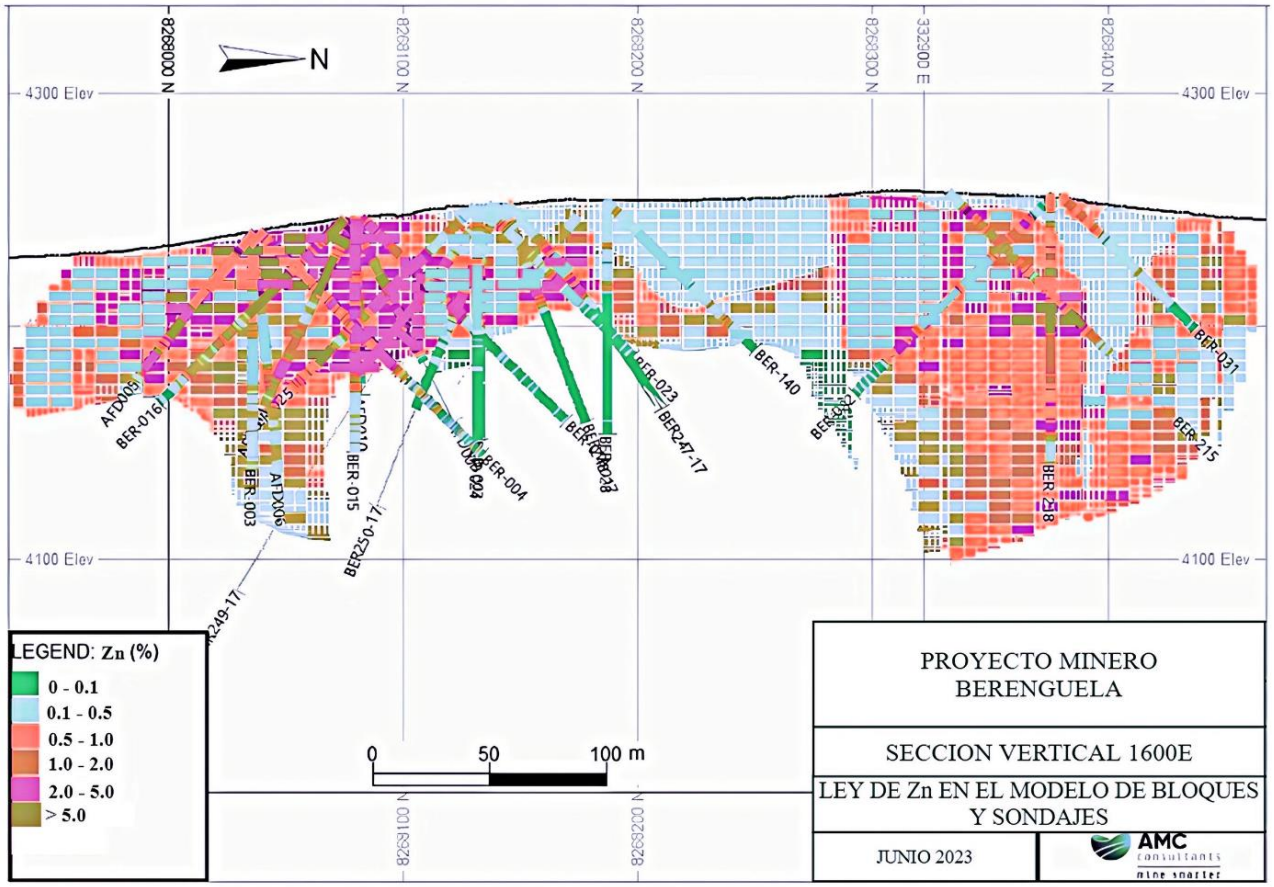
Contenidos de Cu en el modelo de bloques y perforaciones en la sección transversal 1600E.



Fuente: Elaboración propia.

Plano 8

Contenidos de Zn en el modelo de bloques y perforaciones en la sección transversal 1600E.



Fuente: Elaboración propia

5.1.2. Comparación Estadística

Las leyes estimadas en los modelos de bloques son Ag, Cu, Mn y Zn. Se comparó las estadísticas de los bloques clasificados con los composites seleccionados respectivamente a los bloques. La tendencia principal es que las leyes medias en el modelo de bloques son inferiores a las leyes medias en los composites para Ag, Mn, Cu y Zn. La Tabla muestra las estadísticas del modelo de bloques y los composites para Ag, Mn y Cu. Dado que la comparación entre Medido e Indicado es cercana en los gráficos de swath como se muestra en la tabla 11, esto puede ser una característica de la densidad de datos, así como un problema de declusterización. Donde el estudio sugiere que existe una discrepancia entre las leyes estimadas en el modelo de bloques y las leyes obtenidas de las muestras físicas. Esta discrepancia podría deberse a varios factores, como la densidad de datos, la declusterización, o la complejidad del yacimiento.

la mayoría de los elementos (Ag, Mn y Zn), los modelos de bloques tienen una mayor variabilidad en los valores en comparación con los compositos, lo que puede indicar que los compositos ofrecen una representación más estable y homogénea de los datos. Sin embargo, para Cu, las distribuciones entre los modelos y los compositos son prácticamente iguales, sugiriendo que los valores de cobre son muy consistentes tanto en un modelo como en el otro.

Tabla 11

Estadísticas de los modelos de bloques y los compositos para Ag, Mn, Cu y Zn.

Elementos		Ag (g/t)		Mn (%)		Cu (%)		Zn (%)	
Dominio	**Item**	**Modelo**	**Composite**	**Modelo**	**Composite**	**Modelo**	**Composite**	**Modelo**	**Composite**
1	N° Samples	128,325	5,376	128,325	5,376	128,325	5,376	128,325	5,376
	Minimum	0.441	0.0001	0.03	0.000001	0.002	0.000001	0.002	0.0000
	Maximum	1,475	1,960	29.68	38.50	3.58	5.50	1.12	1.40
	Mean	**93.66**	**111.92**	**5.45**	**6.64**	**0.54**	**0.67**	**0.20**	**0.24**
	Standard Dev.	111.92	216.45	5.24	8.67	0.49	0.83	0.16	0.26
	Coef. Var.	1.19	1.93	0.96	1.31	0.92	1.25	0.80	1.08
2	N° Samples	252,103	13,463	252,103	13,463	252,103	13,463	252,103	13,463
	Minimum	0.222	0.0001	0.01	0.000001	0.001	0.000001	0.001	0.0000
	Maximum	1,513	2,055	31.29	38.90	4.37	6.95	1.69	2.30
	Mean	**60.82**	**68.53**	**4.64**	**6.33**	**0.49**	**0.65**	**0.22**	**0.26**
	Standard Dev.	80.96	155.73	4.52	7.92	0.46	0.80	0.18	0.29
	Coef. Var.	1.33	2.27	0.97	1.25	0.93	1.24	0.82	1.12
3	N° Samples	133,146	4,921	133,146	4,921	133,146	4,921	133,146	4,921
	Minimum	0.026	0.0001	0.00	0.000001	0.000	0.000001	0.001	0.0000
	Maximum	458	613	30.85	34.20	2.65	3.75	1.21	1.67
	Mean	**37.80**	**46.13**	**2.78**	**3.34**	**0.43**	**0.54**	**0.20**	**0.25**
	Standard Dev.	37.18	73.77	2.90	4.88	0.38	0.61	0.15	0.27
	Coef. Var.	0.98	1.60	1.04	1.46	0.87	1.13	0.75	1.08
4	N° Samples	147,990	3,518	147,990	3,518	147,990	3,518	147,990	3,518
	Minimum	0.064	0.0001	0.01	0.000001	0.001	0.000001	0.004	0.0000
	Maximum	492	694	21.59	31.80	2.13	2.69	2.69	3.70
	Mean	**26.83**	**38.72**	**2.36**	**3.93**	**0.25**	**0.35**	**0.27**	**0.42**
	Standard Dev.	33.73	84.75	2.66	5.64	0.20	0.44	0.27	0.56
	Coef. Var.	1.26	2.19	1.13	1.43	0.80	1.27	1.01	1.33
5	N° Samples	30,714	696	30,714	696	30,714	696	30,714	696
	Minimum	0.503	0.3920	0.05	0.039095	0.004	0.003	0.040	0.0120
	Maximum	25	25	0.30	0.30	0.10	0.10	0.19	0.19
	Mean	**5.61**	**5.79**	**0.17**	**0.17**	**0.03**	**0.03**	**0.18**	**0.17**
	Standard Dev.	6.07	7.41	0.06	0.08	0.03	0.03	0.01	0.02
	Coef. Var.	1.08	1.28	0.36	0.48	0.89	1.16	0.08	0.13

Fuente: Elaboración propia.

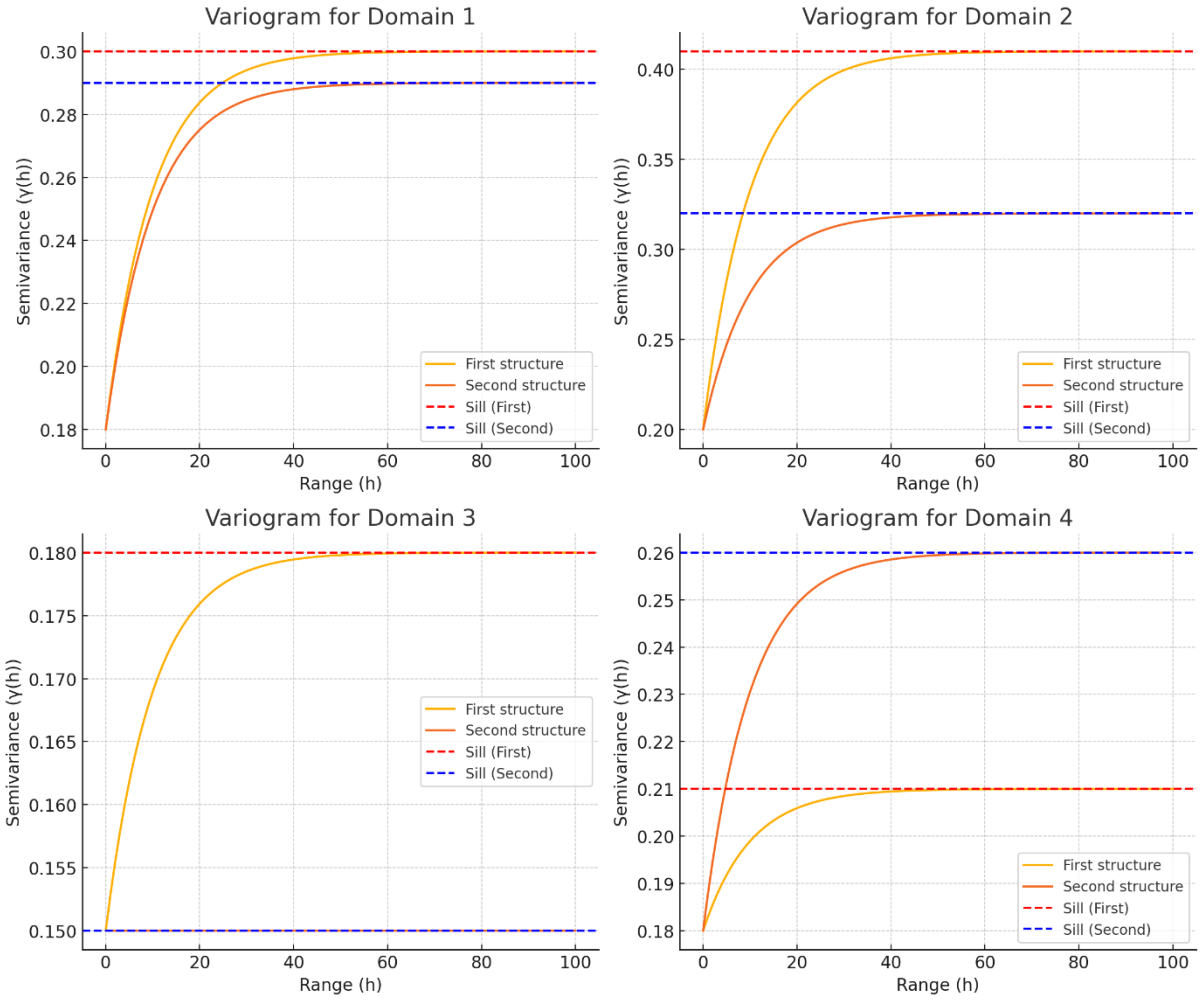
Nota: la subestimación de estos elementos no está afectando el Recurso Mineral.

5.2. Variograma

Los resultados sugieren una alta heterogeneidad en la distribución de la plata dentro del yacimiento. Los dominios 1 y 2 presentan una mayor variabilidad, lo que indica zonas de mayor mineralización y zonas de menor ley.

Figura 64

Variograma teórico Ag en los diferentes dominios.

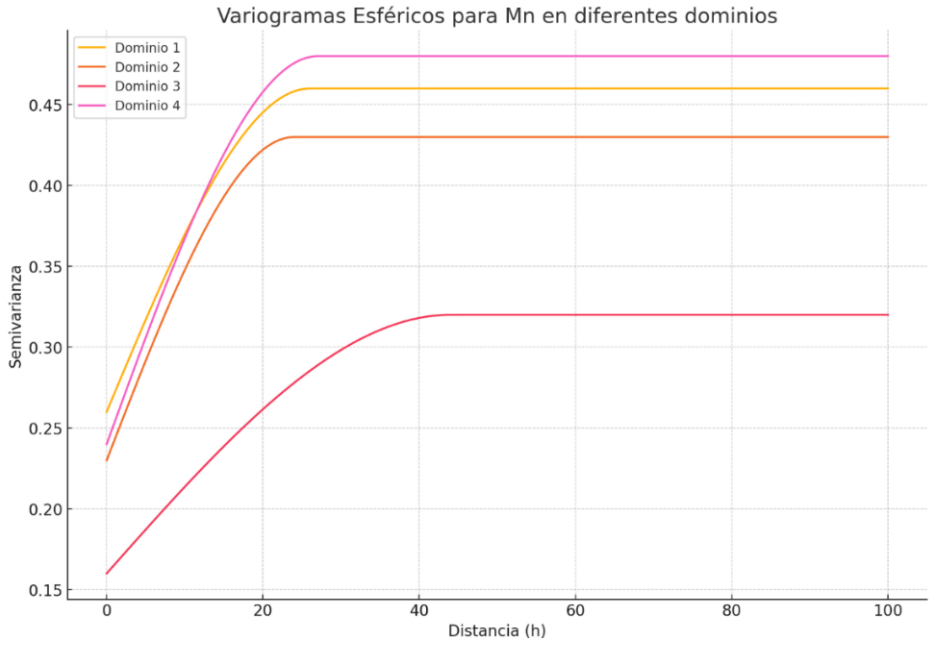


Fuente: Elaboración propia.

Para el mineral de manganeso, los resultados sugieren una variabilidad espacial significativa en la mineralización de manganeso dentro del yacimiento. Los dominios 1 y 2 presentan una mayor heterogeneidad, mientras que el dominio 5 es más homogéneo.

Figura 65

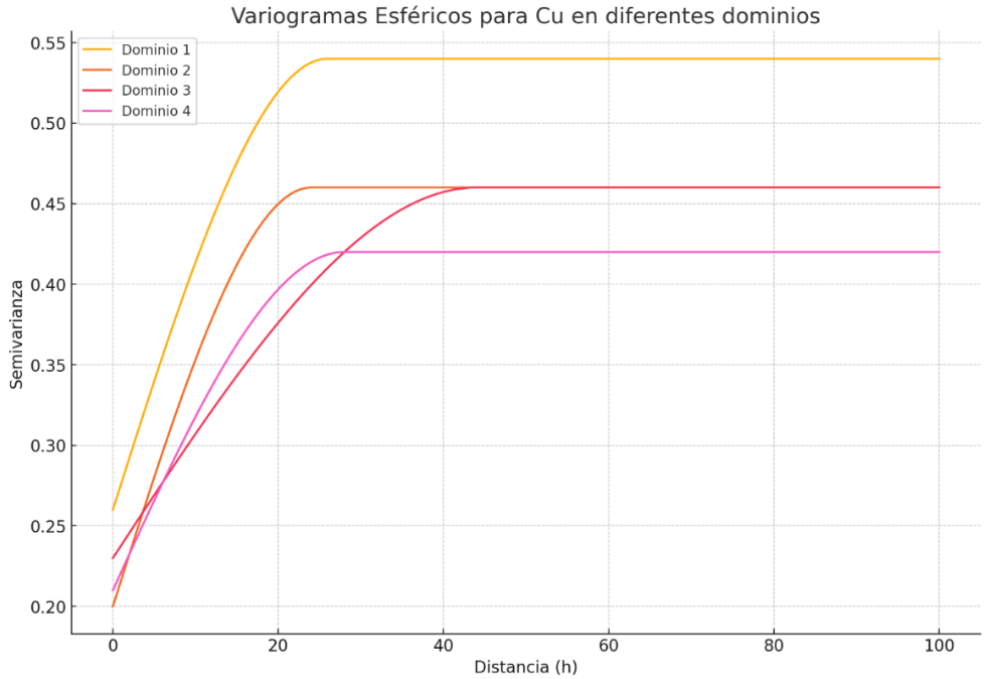
Variograma teórico Mn en los diferentes dominios.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 66

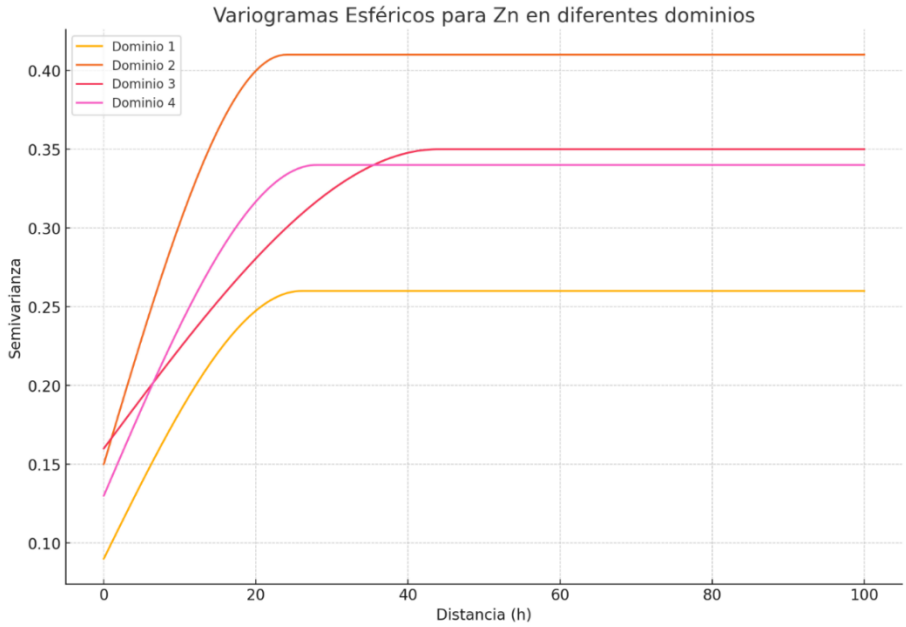
Variograma teórico Cu en los diferentes dominios.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 67

Variograma teórico Zn en los diferentes dominios.



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de Ag y Mn muestran una gran variabilidad en todos los dominios, especialmente en los primeros dominios (1 y 2), lo que indica que hay algunos valores extremadamente altos que influyen en las distribuciones.

El Cu y Zn presentan una variabilidad más controlada, especialmente en los dominios 3, 4 y 5, el Dominio 5 en todos los minerales tiende a tener una menor variabilidad y valores más concentrados en el extremo inferior de la distribución.

Este análisis sugiere que los primeros dominios tienen una mayor dispersión y podrían incluir depósitos con características extremas, mientras que los últimos dominios presentan características más homogéneas y concentradas.

5.3. Validación de interpolación

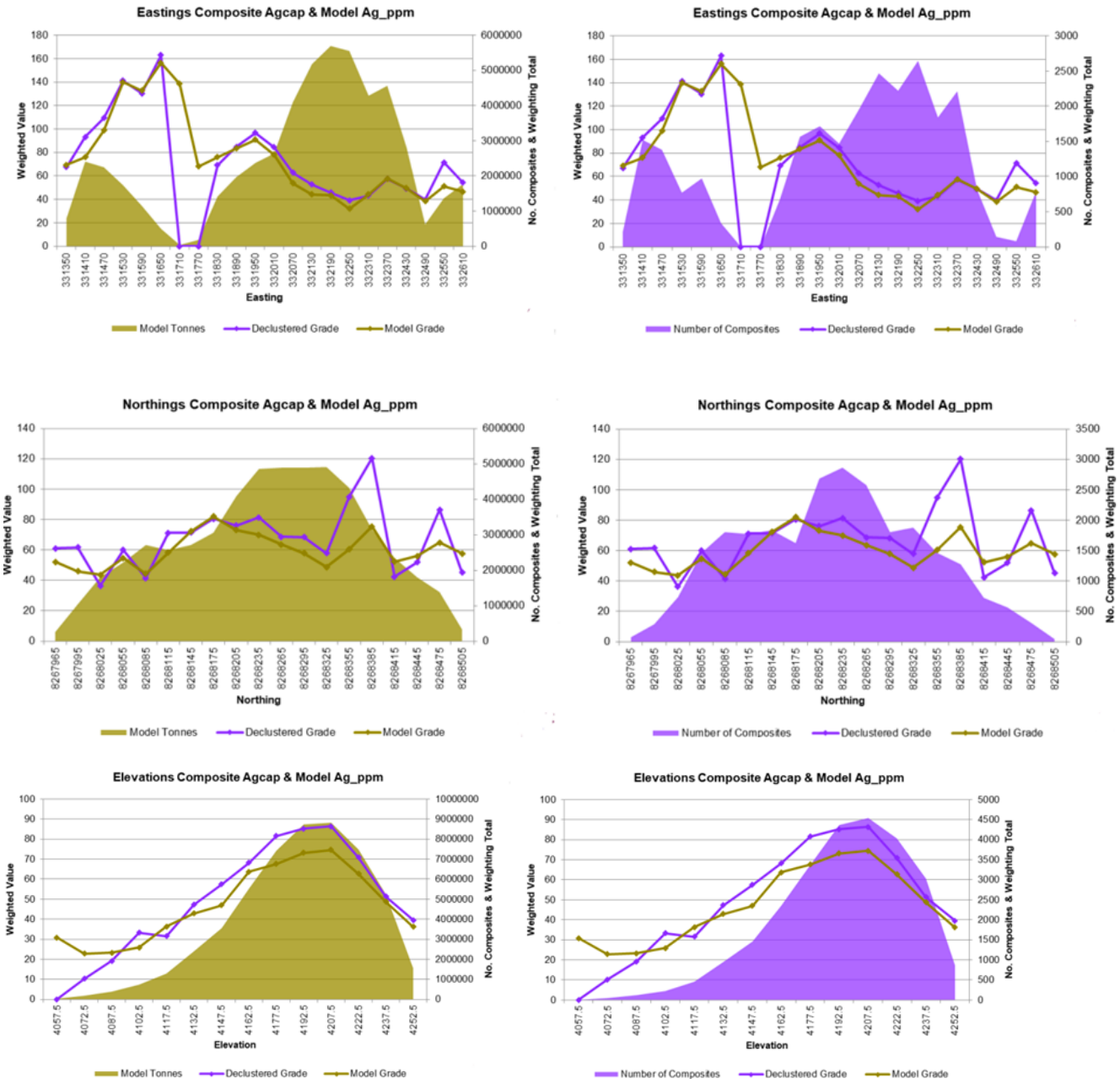
5.3.1. Swats Plots

Las gráficas de franjas se produjeron para todos los elementos estimados contenidos en el modelo de bloques. Las gráficas de franjas muestran un buen acuerdo de distribución de las

leyes entre los composites y el modelo de bloques. La Figura 68 muestra las gráficas de franjas para la plata para todos los dominios, clasificados como Medida e Indicada. Las gráficas de franjas muestran un buen acuerdo entre las leyes de los sondajes y las leyes del modelo de bloques.

Figura 68

Diagrama de franja para Ag en bloques Medidos e Indicados.

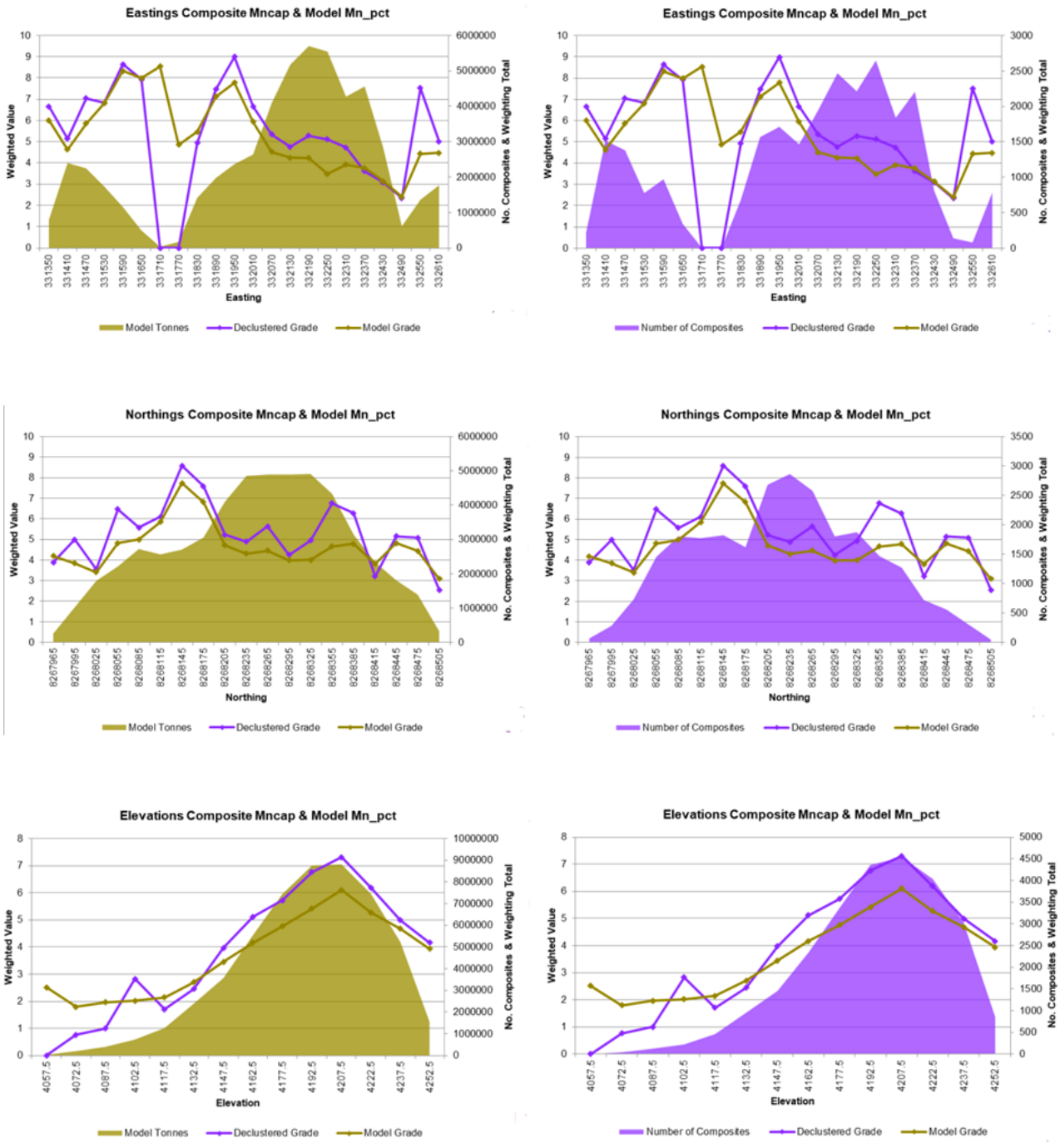


Fuente: Elaboración propia.

La alineación entre Model Grade y Declustered Grade en cada gráfico indica una consistencia en el modelado del manganeso en función de las coordenadas.

Figura 69

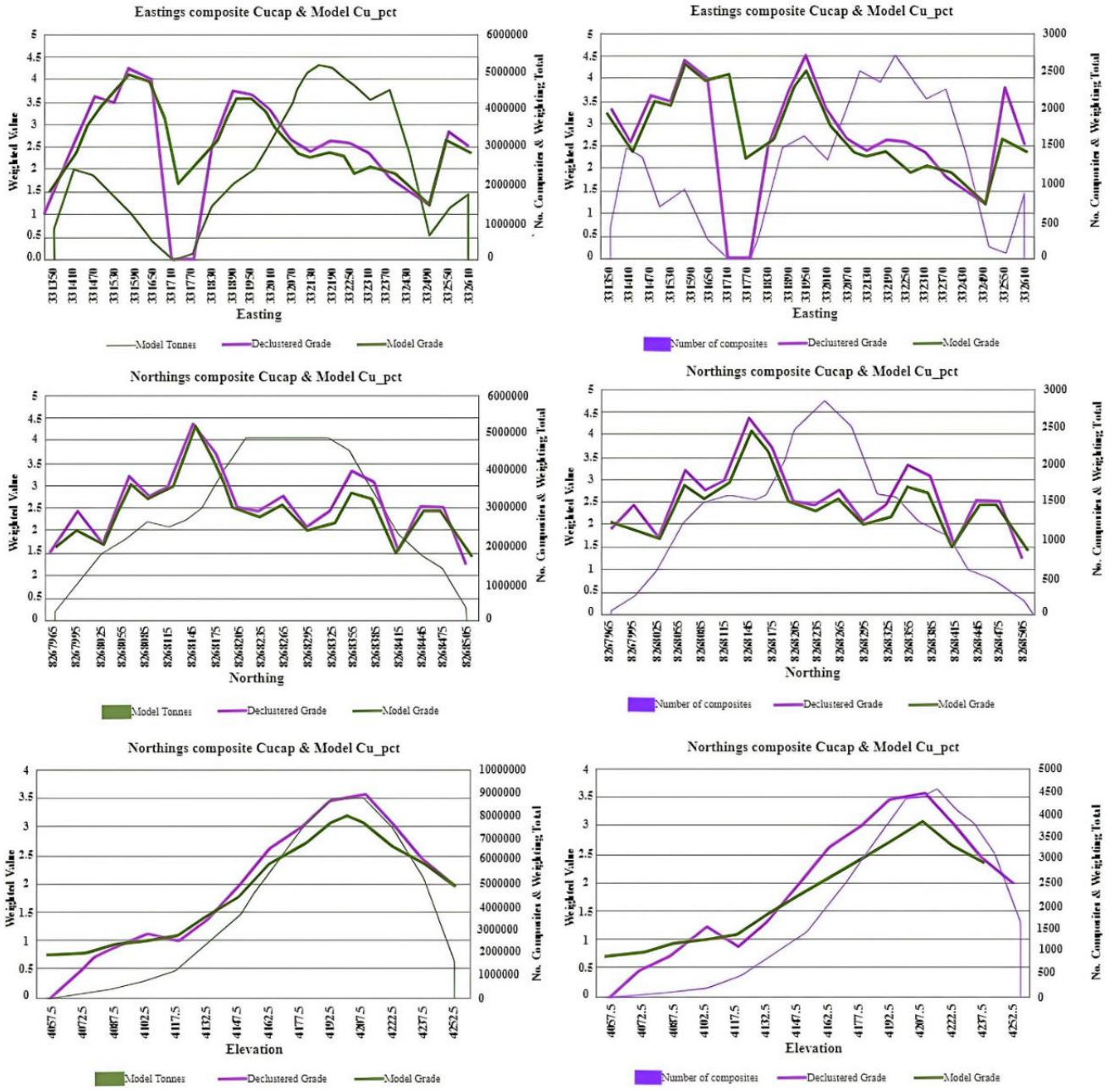
Diagrama de franja para Mn en bloques Medidos e Indicados



Fuente: Elaboración propia.

Figura 70

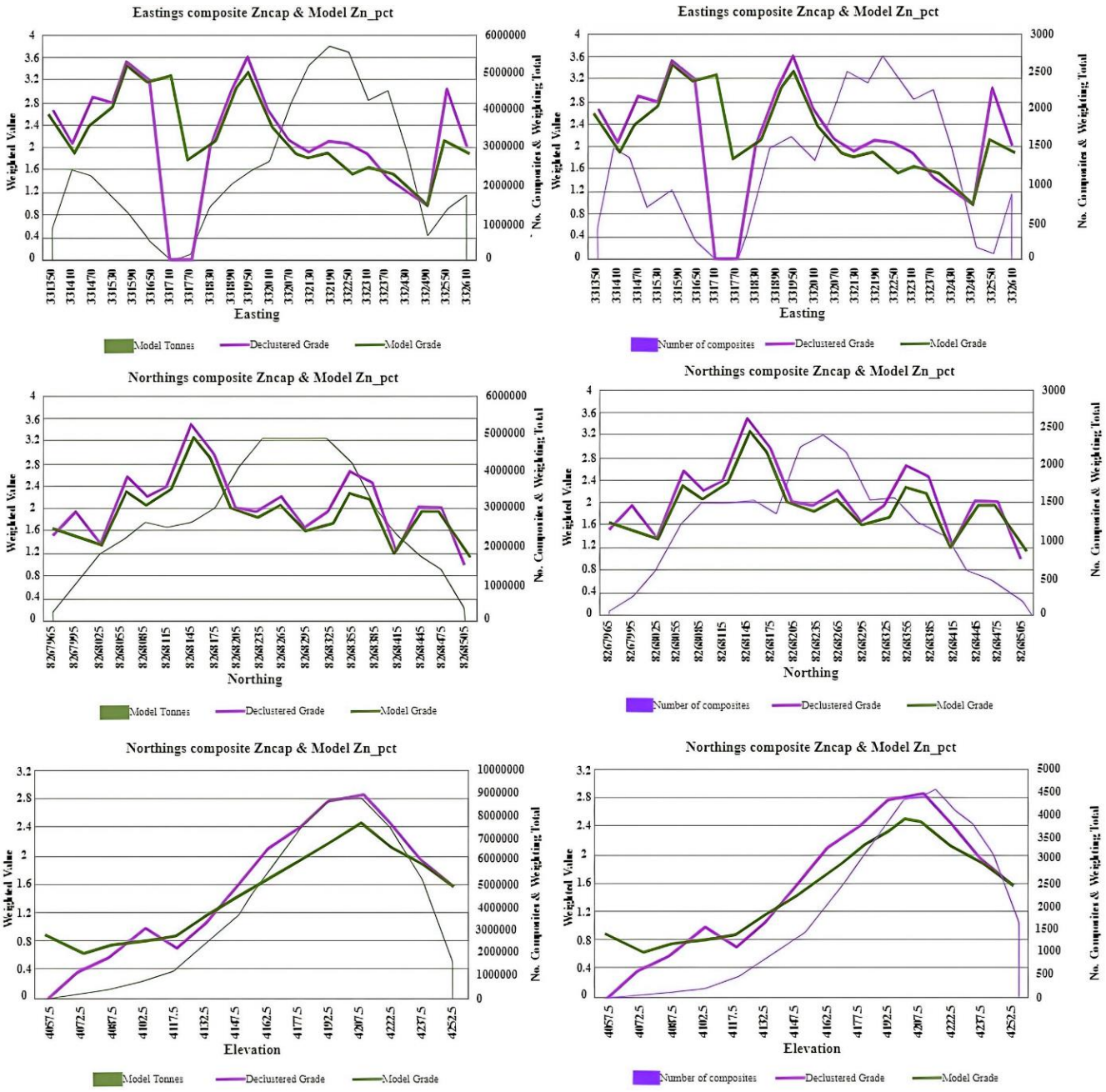
Diagrama de franja para Cu en bloques Medidos e Indicados



Fuente: Elaboración propia.

Figura 71

Diagrama de franja para Zn en bloques Medidos e Indicados



Fuente: Elaboración propia.

5.3.2. Curva Tonelaje Ley

En la siguiente grafica se observa que claramente que A medida que aumenta la ley de corte, el tonelaje disminuye. Esto es lógico, ya que, al establecer un corte más alto, se excluyen las zonas con menor concentración de plata, reduciendo así la cantidad total de mineral que se puede extraer. Por otro lado, la ley media de plata aumenta con la ley de corte. Esto se debe a que, al aumentar el corte, se concentran los recursos en las zonas con mayor ley, elevando así el promedio.

La curva de tonelaje presenta un punto de inflexión alrededor de una ley de corte de 80 g/t. Antes de este punto, la disminución del tonelaje es más pronunciada, lo que sugiere que hay una cantidad significativa de material con leyes inferiores a este valor. Después del punto de inflexión, la disminución del tonelaje se vuelve menos marcada, indicando que la mayor parte del recurso se concentra en zonas con leyes superiores a 80 g/t.

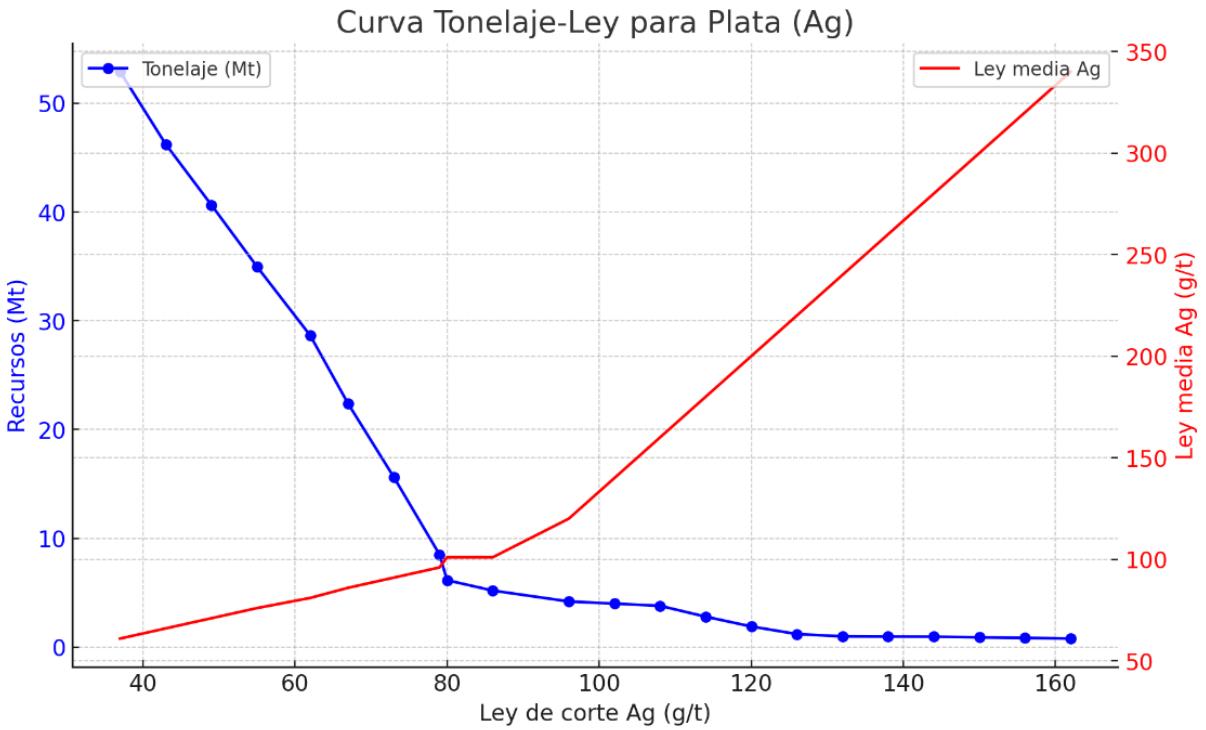
La elección de la ley de corte es una decisión crucial en la planificación minera, ya que afecta tanto a la cantidad de mineral extraíble como a su calidad. Una ley de corte demasiado baja puede resultar en bajos beneficios económicos debido a la baja ley media del mineral extraído. Por el contrario, una ley de corte demasiado alta puede limitar significativamente la cantidad de mineral disponible para su procesamiento. La gráfica permite identificar un rango de leyes de corte óptimas donde se logra un equilibrio entre la cantidad de mineral y su calidad. En este caso, el rango entre 80 y 100 g/t parece ofrecer una buena combinación de tonelaje y ley media.

La curva tonelaje-ley es fundamental para realizar estudios de viabilidad económica de un proyecto minero. Permite estimar las reservas minerales, calcular los costos de extracción y procesamiento, y evaluar la rentabilidad de diferentes escenarios de explotación. Al analizar la curva, se pueden identificar los rangos de ley de corte que maximizan el valor neto presente del

proyecto, considerando factores como los costos de producción, los precios de los metales y las tasas de descuento.

Figura 72

Curva Tonelaje-ley para la Ag



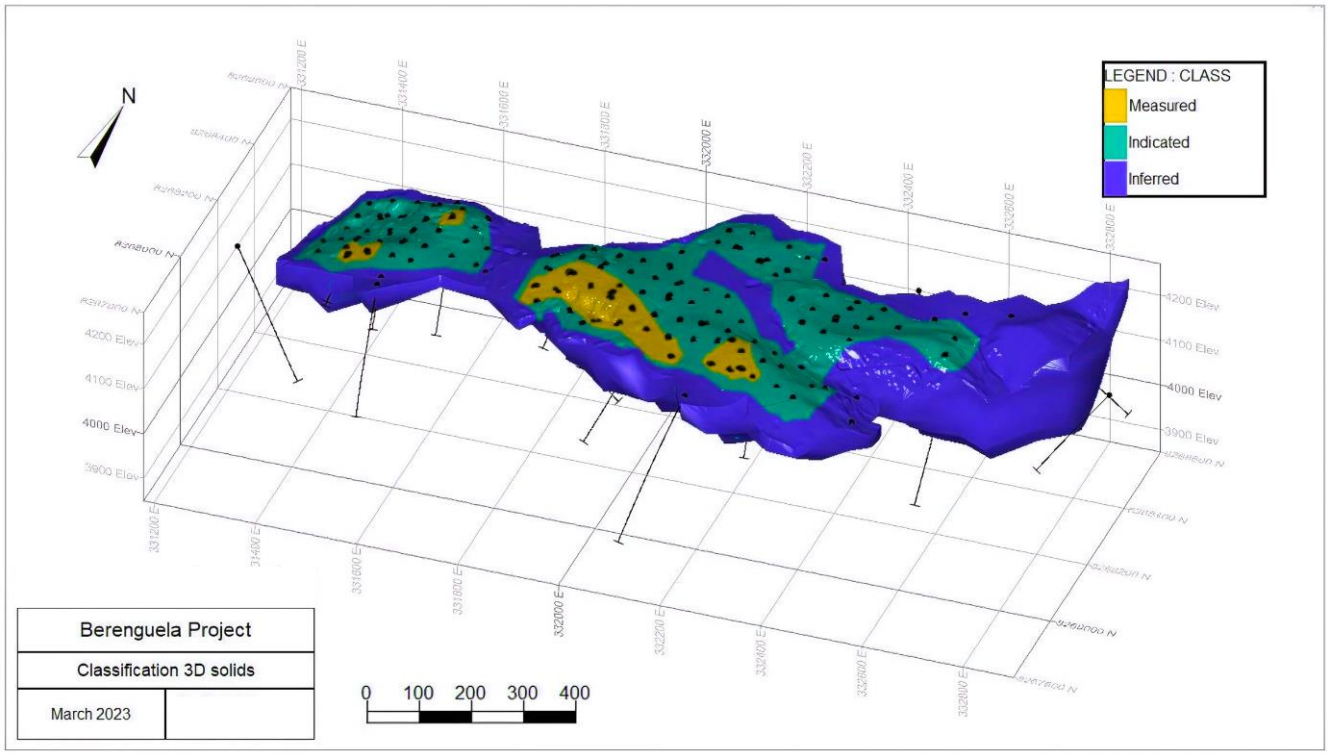
Fuente: Elaboración propia.

5.4. Clasificación de Recursos Minerales

El modelo 3D del recurso de Berenguela presentado en la siguiente figura tiene un alto nivel de precisión en su zona central (recursos medidos), lo cual sugiere que esta área es el foco principal de la exploración detallada y posee un potencial económico significativo. Las perforaciones previas (diamante y RC) junto con las más recientes de 2022 demuestran una estrategia progresiva para incrementar la confianza en las estimaciones y expandir el conocimiento geológico hacia las zonas menos exploradas. La delimitación del Pit Shell sugiere un claro enfoque económico en la viabilidad de extracción dentro de los límites, con áreas exteriores (recursos inferidos) que podrían ahondarse a futuro.

Plano 9

Solido 3D con la variable CONF



Fuente: Elaboración propia

Este modelo proporciona una visión integral de la distribución espacial y la confiabilidad de los recursos dentro del yacimiento de Berenguela. Las áreas rojas indican recursos más confiables y densamente perforados, mientras que las áreas amarillas y azules representan zonas con menor certeza en la información disponible. La combinación de estas clasificaciones y las ubicaciones de las perforaciones ayudan en la planificación de futuras operaciones de extracción y perforación, así como en la estimación de los recursos disponibles. El modelo refleja una planificación sistemática donde se ha priorizado la certeza en el núcleo central del depósito, dejando oportunidades de crecimiento hacia las áreas periféricas con recursos inferidos.

5.4.1. Implicaciones Operacionales y Económicas

La proporción significativa de recursos medidos e indicados (aprox. 64% del total) ofrece una base sólida para planificación minera inicial y estudios económicos preliminares, permitiendo estimar costos y beneficios con menor incertidumbre.

El potencial económico está respaldado por precios actuales de metales (Ag: 22.5 USD/oz; Cu: 4 USD/lb; MnSO4: 530 USD/t), con una contribución principal del manganeso (44%) en valor económico del recurso, seguido de plata y cobre (26% cada uno), y zinc (4%).

5.5. Discusión de Resultados

- Respecto a la Heterogeneidad Mineral y Fiabilidad del Kriging Ordinario en el yacimiento, el cobre y el zinc muestran una distribución más homogénea, mientras que la plata y el manganeso son más heterogéneos. Esta variabilidad sugiere distintas zonas de mineralización, lo cual es vital para una extracción eficiente. El KO demostró ser altamente fiable para estimar recursos en yacimientos variables como Berenguela, lo que coincide con estudios previos (Pozo, 2020). A diferencia de otras investigaciones que cuestionan el KO con datos limitados (Escudero y Morera, 2020), la alta calidad de nuestros datos y los controles de calidad en Berenguela permitieron estimaciones precisas, incluso con un número moderado de muestras. La densidad de las perforaciones y el uso de software avanzado (LeapFrog, DataMine) fueron clave. Esta precisión es crucial para las decisiones de inversión, la planificación de la explotación y la rentabilidad del proyecto.
- Los Parámetros Geoestadísticos y Calidad de Datos en Berenguela dieron resultados exactos con un número moderado de perforaciones gracias a controles de calidad rigurosos y una buena distribución. en el estudio, donde en otros estudios desarrollado por (Pais, 2021 y Pozo, 2020) indican que la correcta identificación de los parámetros geoestadísticos es fundamental para mejorar la precisión del KO. Aunque otro estudio

como de (Maldonado, 2023) demandan más muestras para la precisión. Esto implica que optimizar los parámetros geoestadísticos no solo mejora las estimaciones de recursos, sino que también perfecciona la planificación minera, reduciendo costos y aumentando la rentabilidad. Sin embargo, la calidad de los datos es una limitación crítica: datos no representativos o sesgados pueden comprometer la precisión, un desafío que se presentó en ciertas áreas de Berenguela.

- Respeto al Impacto Operacional de las Estimaciones Precisas del Kriging Ordinario La implementación efectiva del KO en Berenguela fue crucial para obtener estimaciones precisas de recursos. Al modelar la variabilidad espacial y aplicar controles estrictos, generamos un modelo de bloques confiable que clasificó los recursos (Medidos, Indicados, Inferidos) con alta exactitud en tonelaje y leyes. El KO es más eficaz en zonas con datos concentrados, aumentando la fiabilidad.Esto confirma la visión de Matheron (1963) sobre el KO como un estimador insesgado que optimiza la estimación al considerar la variabilidad espacial, logrando alta precisión y baja incertidumbre en Berenguela. Aunque Maldonado (2023) señaló una disminución de precisión con datos limitados, en Berenguela, la calidad superior de los datos y el software avanzado mitigaron estas restricciones. Este caso práctico demuestra cómo la aplicación detallada del KO, con énfasis en la preparación y verificación de datos, mejora las estimaciones y facilita la toma de decisiones en proyectos mineros, optimizando la extracción y reduciendo riesgos.
- La clasificación precisa de los recursos (Medidos, Indicados, Inferidos) mediante el KO es esencial para la viabilidad económica del Proyecto Berenguela. Los recursos Medidos e Indicados mostraron alto tonelaje y concentración de minerales clave como la plata, lo que indica alta confiabilidad en áreas con perforación densa. Los recursos Inferidos, con menor densidad, presentaron mayor incertidumbre, estos hallazgos

concuerdan con Craig (2020) sobre la importancia de la clasificación precisa para la planificación minera y la evaluación económica. A pesar de la complejidad del yacimiento, se logró una clasificación precisa, lo que resalta la eficacia del KO en depósitos polimetálicos, a diferencia de Mariscal (2022). Las diferencias entre estudios pueden atribuirse a las metodologías y características geológicas. Este estudio contribuye con evidencia sobre la efectividad del KO para clasificar recursos en yacimientos complejos, reforzando su aplicabilidad industrial. Una clasificación precisa optimiza la extracción y reduce los riesgos financieros, aunque siempre dependerá de la calidad de los datos de perforación.

CONCLUSIONES

- Se identificaron variogramas ajustados a modelos esféricos por cada mineral (Ag, Mn, Cu, Zn), con alcances máximos de continuidad espacial de hasta 45 metros en dirección mayor, y nugget effects promedio del 20%, lo que indica una moderada continuidad espacial. Además, se realizó un análisis de anisotropía, determinando direcciones preferenciales para cada dominio geológico, con estructuras orientadas principalmente al noreste. Estas configuraciones redujeron la incertidumbre de estimación y permitieron una interpolación eficiente y precisa de leyes. seguidamente, Se realizaron pruebas de validación que revelaron un coeficiente de correlación superior al 85% entre valores estimados y reales de los bloques, lo cual confirma la solidez de los parámetros geoestadísticos utilizados. Asimismo, box plots y gráficos de dispersión mostraron una distribución simétrica y sin sesgos significativos en los residuos de interpolación.
- La aplicación del método geoestadístico Kriging Ordinario usando el software LeapFrog © y Datamine permitió construir un modelo de bloques robusto y representativo, fundamentado en la interpolación basada en la correlación espacial de los datos de perforación. El modelo de bloques utilizó un tamaño de celda de 10x10x5 m, con sub-bloqueo para precisión estructural. Se utilizaron variogramas ajustados por dominio y se realizó un análisis QKNA para validar el tamaño de búsqueda y número de muestras óptimas. La validación visual mostró una alta concordancia entre leyes estimadas y leyes medidas, y los diagramas de dispersión y Swath Plots confirmaron la ausencia de sesgo y la estabilidad de las estimaciones. Así, el KO demostró ser una herramienta precisa y confiable para la estimación de recursos en Berenguela.
- La estimación de recursos realizada mediante kriging ordinario, y validada con los estándares del código JORC, se determinó un total de 40.168 millones de toneladas (Mt) clasificadas como Medidas e Indicadas, con leyes promedio de 78 g/t Ag, 6.10% Mn,

0.67% Cu y 0.34% Zn. Además, se identificaron 22.288 Mt de recursos Inferidos, con leyes de 54 g/t Ag, 3.57% Mn, 0.42% Cu y 0.25% Zn. Esta categorización cumple con los criterios establecidos por la CIM y valida que el kriging ordinario es apto para diferenciar zonas de confianza geológica, según densidad de datos y continuidad mineral. El modelo se encuentra también restringido por un cono de pit optimizado, lo que asegura viabilidad económica razonable a futuro.

- El modelo generado mediante kriging ordinario demuestra alta confiabilidad, lo cual se evidenció en su validación estadística ($R^2 > 0.95$ para la correlación entre datos y estimación en Ag, Mn y Cu), y una desviación promedio menor al 4%. Además, la varianza de kriging en zonas de mayor densidad de información fue menor al 10%, lo que respalda la clasificación en categorías Medida-Indicada con fundamento técnico sólido. Todo ello confirma la hipótesis general, ya que el KO efectivamente proporciona estimaciones precisas, estables y técnicamente defendibles para el Proyecto Minero Berenguela.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda al equipo de geólogos y planificadores del proyecto continuar utilizando y ampliando el método Kriging Ordinario para estimar los recursos minerales, incorporando nuevos datos de perforación y análisis. Esta ampliación permitirá mejorar la precisión de las estimaciones y proporcionar una visión más detallada del yacimiento. Al integrar información más actualizada, se podrán ajustar las estimaciones de los recursos minerales, lo cual es clave para un manejo más efectivo y eficiente del proyecto, optimizando la planificación y reduciendo la incertidumbre en las decisiones.
- Es importante que el equipo de investigación geológica realice un estudio más detallado y actualizado de la geología del yacimiento, implementando técnicas modernas como la geofísica avanzada y la modelización tridimensional. Este enfoque permitirá una definición más precisa de las zonas del yacimiento y el ajuste adecuado de los parámetros utilizados en el método Kriging. Al contar con una comprensión más profunda y actualizada de la geología, se mejorará la confiabilidad de las estimaciones y se fortalecerán las decisiones de exploración y explotación.
- Para los analistas de datos y geólogos técnicos validar las estimaciones obtenidas con el método Kriging mediante la aplicación de otros métodos geoestadísticos, como el Kriging Universal o el Método de Simulación Condicional. La prueba de variantes del Kriging también es fundamental para asegurar que los resultados sean lo más confiables posibles, especialmente en las zonas del depósito que presentan una mayor complejidad geológica. Esta validación contribuirá a reducir los riesgos inherentes al proceso de estimación y permitirá obtener un modelo más robusto y certero.
- Finalmente, se recomienda a la gerencia de recursos y a los inversionistas actualizar regularmente la clasificación de los recursos minerales siguiendo las normas internacionales, como las de la JORC (Joint Ore Reserves Committee) o el Código de

Buenas Prácticas del CIM. Además, es esencial analizar los riesgos asociados a cada categoría de recursos. Esta actualización no solo garantizará el cumplimiento de las normativas internacionales, sino que también facilitará la toma de decisiones informadas y la atracción de inversiones, proporcionando un marco de confianza y transparencia que puede resultar crucial para la viabilidad y sostenibilidad del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bieniawski, Z. (1973). Engineering rock mass classifications. John Wiley & Sons.

Clark, I. (1979). Practical kriging in three dimensions. *Computers & Geosciences, 5*(1), 13-21.

Craig, R. (2020). Financial risks in mineral resource projects. Journal of Mining Economics, 15(1), 20-30.

CRIRSCO. (2019). The CRIRSCO template for reporting of mineral resources and reserves. Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards. https://www.crirsco.com/

David, M. (1977). *Geostatistical ore reserve estimation*. Elsevier.

Desharnais, G. (2019). Manuel Bustillo Revuelta: Mineral resources, from exploration to sustainability assessment, first edition. Earth sciences, textbook geography and environment Springer, (2019), 653 p. *Mineralium Deposita, 54*(8), 1281-1283. https://doi.org/10.1007/s00126-019-00901-8

Deutsch, C., & Rossi, M. (2014). Mineral resource Estimation. En *Springer eBooks*. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5717-5

Elliott, J. (2013). JORC 2012 Are you ready. *Australia's Paydirt*, *1*(211), 11. http://search.informit.com.au/fullText;dn=748172250479719;res=IELBUS

Escudero, G., & Morera, J. (2022). *Optimización del plan de Kriging ordinario mediante la validación cruzada en la estimación de recursos geológicos, 2020.*

Goovaerts, P. (2001). Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. Soil Science Society of America Journal, 65(5), 1281-1296.

Hernández, R. (2014). Metodología de la investigación. [Editorial].

Hustrulid, W., & Kuchta, M. (2006). *Open pit mine planning & design* (2nd ed.). CRC Press.

Isaaks, E., & Srivastava, R. (1989). An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press.

Journel, A., & Huijbregts, C. (1978). Mining geostatistics. Academic Press.

Mariscal E. (2022). *Gestión para la predicción de recursos y reservas de un yacimiento minero, utilizando programaciones en Matlab* (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú). Repositorio Institucional PUCP.

Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. Economic Geology, 58(8), 1246-1266.

Sinclair, A., & Blackwell, D. (2002). Geología y minería: Principios fundamentales. McGraw-Hill.

Smith, A. (2020). Mineral resource classification and evaluation. Editorial Minera.

Stone, W., & Dunn, J. (1995). Estimación de recursos minerales. In Introducción a la minería y modelado geológico (pp. 54-60). Editorial Minera

Maldonado, C. (2023). El método kriging ordinario para la estimación de recursos minerales del Proyecto Purple Hill, Tacna, Perú.

Mamani, L. (2020). *Proceso de estimación de recursos minerales y aplicación de los métodos geoestadísticos aplicado en los cuerpos mineralizados 1, 2 y 5 en la unidad Cerro Lindo.*

País, G. (2021). Definición de un nuevo criterio de categorización de recursos minerales basado en simulaciones geoestadísticas.

Pozo, C. (2020). *Aplicación de Kriging Ordinario y Simulación Condicional para la estimación de recursos. Caso de Estudio: Proyecto Pastenes, Chile* (Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Central del Ecuador). Repositorio Digital UCE.

Rendu, J.-M. (1981). An experimental study of the role of autocorrelation in the evaluation of ore reserves. *Mathematical Geology*, *13*(5), 407-425.

Valderrama, J. (2017). Nivel de investigación: definición y clasificación. [Editorial].

ANEXOS

Anexo 01

5.5. Aspectos Generales del Área de estudio

5.5.1. Ubicación y Accesibilidad

5.5.1.1. Ubicación

El proyecto minero de Berenguela se ubica en el distrito de Santa Lucía, provincia de Lampa, departamento de Puno a una altura promedio de 4 200 msnm.

Tabla 12

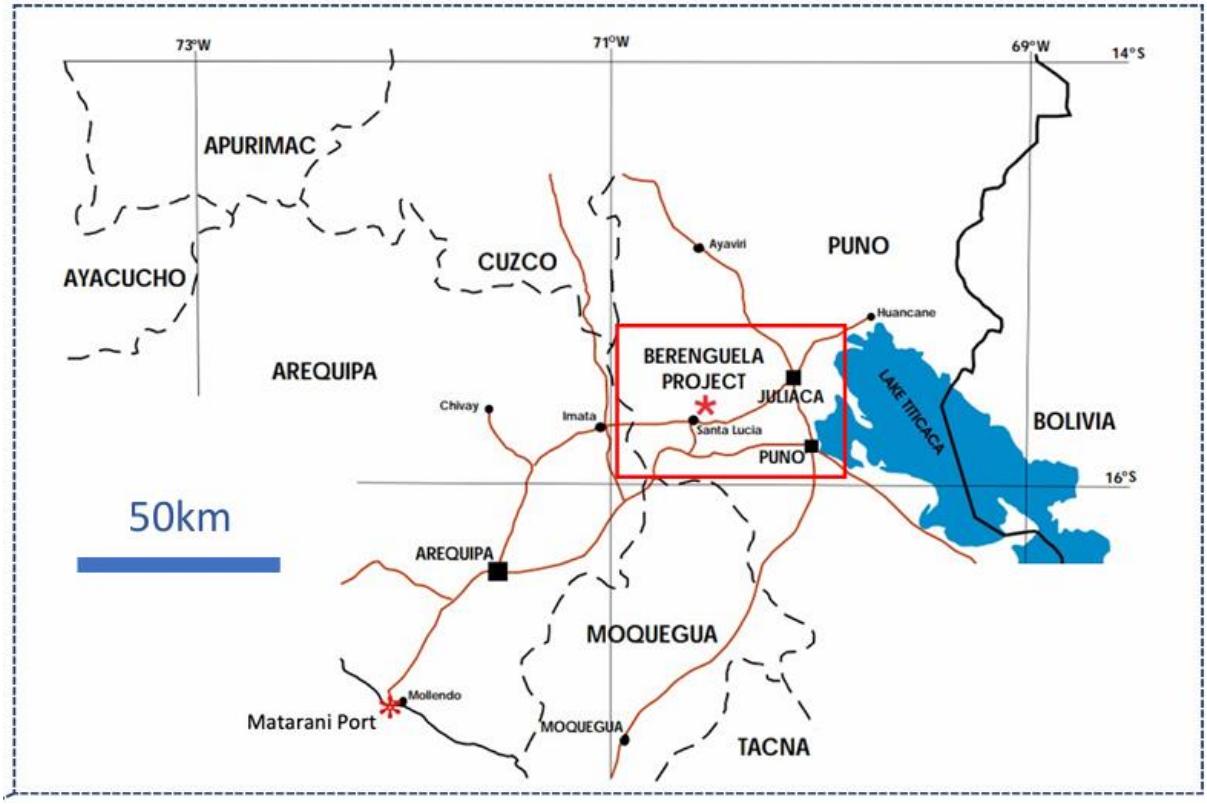
Coordenadas de Ubicación

Coordenadas Geográficas	Coordenadas UTM	COTA	DATUM
70° 34' 00" Longitud oeste	E 332086.8	4200	PSAD 56
15° 40' 00" Latitud Sur	N 8267315.5	4200	PSAD 56

Fuente: Elaboración propia

Plano 10

Plano de Ubicación del Proyecto Minero Berenguela



Fuente: Proyecto Minero Berenguela

5.5.1.2. Accesibilidad

a) Por Vía Terrestre: El acceso por vía terrestre es el siguiente:

La Propiedad Berenguela, ubicada a 50 km al oeste de Juliaca en el sur de Perú, cuenta con excelente infraestructura y acceso. Se llega en menos de una hora desde Juliaca, una ciudad con aeropuerto y vuelos diarios a Lima. Está a 2.5 horas por carretera de Arequipa, principal ciudad del sur del país, y a 6 km al noreste de Santa Lucía, donde se encuentra una carretera principal pavimentada y servicios básicos limitados.

Tabla 13

Acceso vía terrestre

CIUDAD		***DISTANCIA***	***TIEMPO***
Lima	Arequipa	1,204.2 Km	19. 5 Horas
Arequipa	Santa lucia	209.4 Km	4 Horas
santa lucia	Berenguela	2.9 Km	15 minutos

Fuente: Elaboración propia

b) Por Vía Aérea: El acceso por vía se realiza de lima a Juliaca.

Después se continúa vía terrestre con destino Proyecto Berenguela aproximadamente 1hora con 10 minutos.

Tabla 14

Acceso vía aéreo

CIUDAD		TIEMPO
Lima	Juliaca	1 Hora 30 Minutos

Fuente: Elaboración propia

5.5.2. Clima y Topografía

El clima de la región es frío, con alta amplitud térmica diaria y estacionalidad marcada entre temporadas de lluvias y secas. Las precipitaciones, moderadas, se concentran en verano, mientras que los fuertes vientos y la intensa radiación solar impactan el ambiente y las actividades humanas. La vegetación andina incluye pastizales de ichu y arbustos de tola, adaptados a la altitud, frío y suelos pobres, contribuyendo a la protección del suelo y al sustento de la fauna local.

Ubicada en una altiplanicie andina entre 4,200 y 4,500 metros sobre el nivel del mar, la zona presenta una topografía montañosa y accidentada. Destacan colinas y cerros con pendientes pronunciadas, valles estrechos y quebradas formadas por la erosión fluvial y actividad tectónica. Las inclinaciones varían desde áreas planas en mesetas hasta pendientes superiores a 30 grados en las laderas montañosas.

5.5.3. Geología del Yacimiento

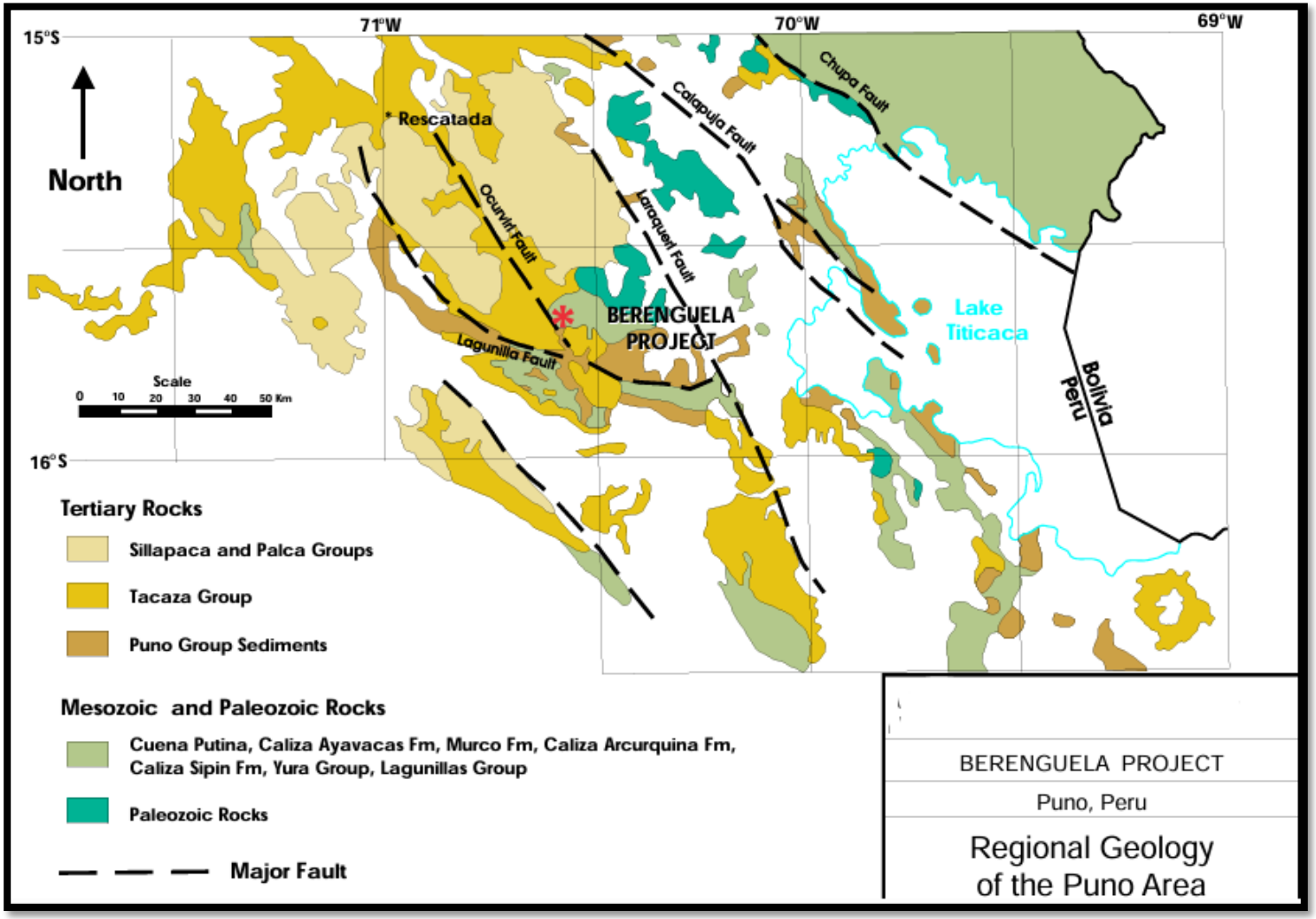
5.5.3.1. Geología Regional

El yacimiento está emplazado en la Cordillera Occidental de los Andes, originada por la tectónica de placas colisionales desde el Cretácico Superior. Este proceso involucra la subducción de la corteza oceánica del Pacífico bajo la placa Sudamericana. La geología regional de la Cordillera Occidental en el sureste peruano se caracteriza por rocas volcánicas y sedimentarias del Cenozoico al Cuaternario. En el área oeste del Lago Titicaca, donde se ubica el depósito Berenguela (distrito Santa Lucía), se observan extensas ventanas erosivas o estructurales en el terreno volcano-sedimentario. Estas ventanas exponen estratos sedimentarios Paleozoicos y Mesozoicos con deformación estructural. El yacimiento Berenguela de Ag-Cu-Mn se encuentra precisamente dentro de una de estas áreas de rocas sedimentarias Mesozoicas.

Este proceso involucra la subducción de la corteza oceánica del Pacífico bajo la placa Sudamericana. La geología regional de la Cordillera Occidental en el sureste peruano se caracteriza por rocas volcánicas y sedimentarias del Cenozoico al Cuaternario. En el área oeste del Lago Titicaca, donde se ubica el depósito Berenguela (distrito Santa Lucía), se observan extensas ventanas erosivas o estructurales en el terreno volcano-sedimentario. Estas ventanas exponen estratos sedimentarios Paleozoicos y Mesozoicos con deformación estructural. El yacimiento Berenguela de Ag-Cu-Mn se encuentra precisamente dentro de una de estas áreas de rocas sedimentarias Mesozoicas.

Plano 11

Plano Geológico Regional

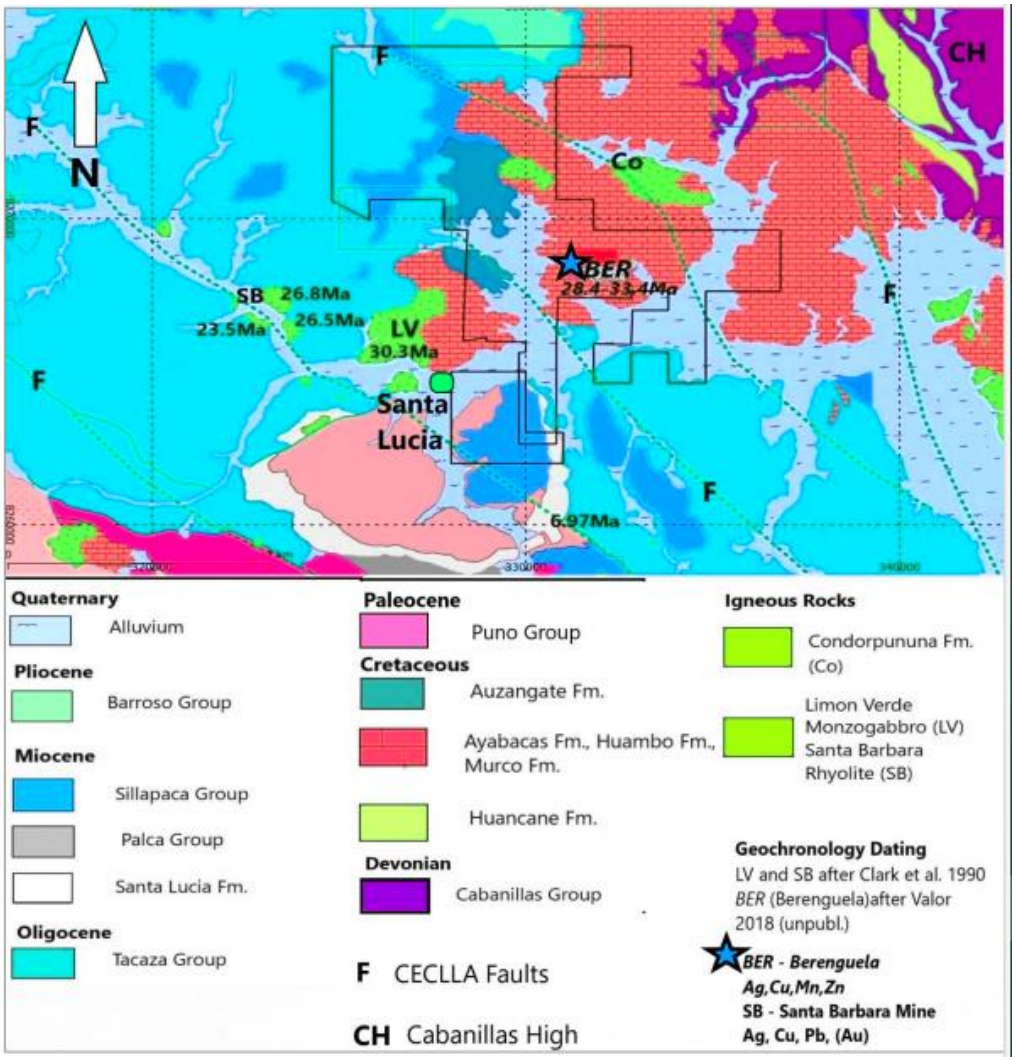


a) Estratigráfica

La zona de falla CECLLA ha afectado la estratigrafía del área, especialmente las rocas del Cretácico Inferior, asimismo la Propiedad comparte similitudes geológicas con el área Manazo, ubicada fuera de la zona de influencia de la falla CECLLA, lo que sugiere que las capas rocosas del Cretácico Inferior pueden haberse correlacionado originalmente, La Figura 14 (no proporcionada) presumiblemente muestra la geología local, la ubicación del depósito mineral y el límite de la Propiedad, permitiendo una mejor comprensión de la relación entre la mineralización y la zona de falla CECLLA.

Figura 73

Principales unidades estratigráficas expuestas en la región de Santa Lucia.

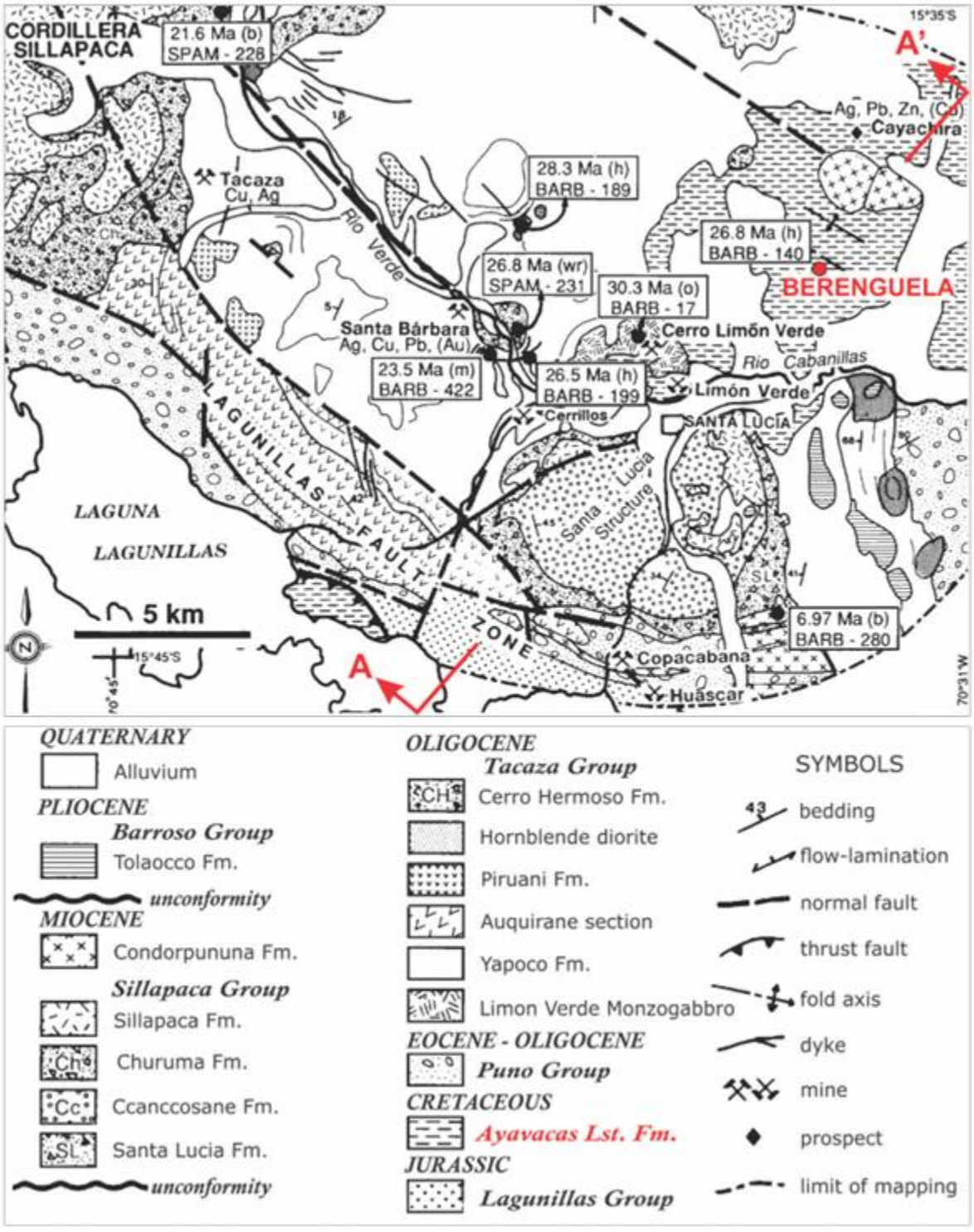


Fuente: Proyecto Berenguela

5.5.3.2. Geología Local

Figura 74

Mapa geológico local del distrito de Santa Lucia



Fuente: Proyecto Minero Berenguela

Grupo Cabanillas (Silúrico-Devónico): Los sedimentos más antiguos de la región afloran en la Altura de Cabanillas, donde se encuentran las estructuras del CECLLA al noreste de Berenguela. El basamento del área probablemente pertenece a este grupo.

Grupo Lagunillas (Jurásico): Constituido por calizas gris oscuro, pilitas negras y areniscas calcáreas, depositadas en una cuenca de retroarco. Posteriormente, estas rocas fueron elevadas, falladas y erosionadas antes del Cretácico.

Formación Huancané (Cretácico Inferior): Areniscas gruesas rojizas, con conglomerados y capas de lutita, depositadas en aguas profundas. Alcanzan hasta 600 m de espesor y subyacen a la Formación Ayabacas.

Formaciones Hualhuani, Murco y Huambo (Cretácico Inferior): Depósitos fluviodeltaicos en el SO del CECLLA: Hualhuani: Areniscas masivas y limolitas rojas; Murco: Lutitas, limolitas y areniscas rojizas. Huambo: Lutitas rojas con yeso y areniscas. Juntas suman hasta 500 m de espesor.

Formación Ayabacas (Cretácico Medio-Superior): Compuesta por calizas masivas y lutíticas con olistostromas y bloques de la Formación Arcurquina. Su espesor alcanza 300 m y alberga la mineralización de Berenguela.

Formación Auzangate (Cretácico Superior): Lutitas y limolitas remanentes que cubren parcialmente a la Formación Ayabacas, con extensión superficial limitada.

Grupo Puno (Paleoceno-Oligoceno): Areniscas y conglomerados intercalados con tobas volcánicas, resultado de la erosión de los Grupos Cabanillas y Lagunillas. Su espesor varía entre 100 y 3,600 m y está expuesto en un hemi-graben activo que contiene el Lago Lagunillas.

Grupo Tacaza (Oligoceno): Lavas andesíticas, tobas y aglomerados volcánicos, con basaltos en niveles inferiores, de entre 800 y 3,600 m de espesor. Asociado al vulcanismo en fallas de desgarre y magmatismo del manto. (Sempere et al., 2002)

Formación Santa Lucía (Mioceno Inferior): Ignimbritas riolíticas y sedimentos gruesos en una caldera cercana al pueblo de Santa Lucía.

Grupo Palca (Mioceno Inferior): Vulcanismo piroclástico félsico y erupción de ignimbritas riolíticas de las Formaciones Churuma y Santa Lucía (Ingemmet, 2003). Los principales centros de emisión probablemente se ubicaron al noroeste del distrito de Santa Lucía. Unos 5 km al noroeste de Santa Lucía hay un cuerpo circular de 2 km de diámetro compuesto por brechas polilíticas y tobas félsicas débilmente estratificadas, interpretado como un complejo de conductos volcánicos datado en 26.5 millones de años. Este complejo, denominado Santa Barbara por Clark et al. (1990), alberga la segunda ocurrencia mineral más importante del distrito después de Berenguela, que es la Mina Santa Bárbara.

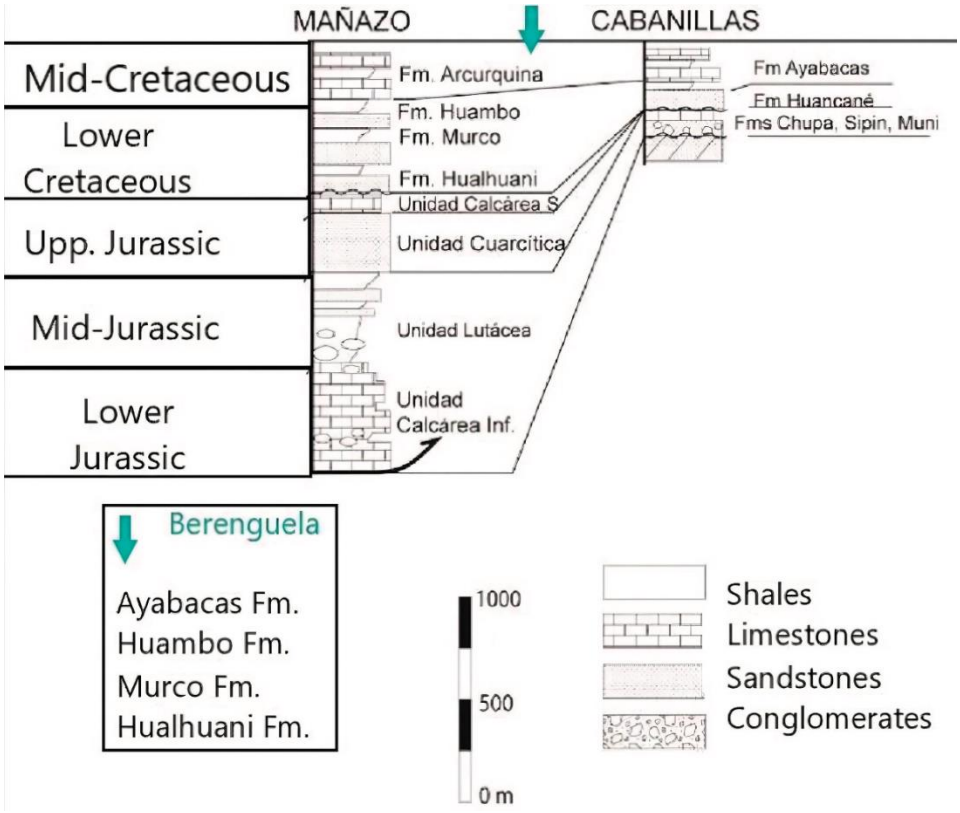
Grupo Sillapaca (Mioceno Superior): Lavas andesíticas con flujos basálticos y tobas de hasta 3,000 m de espesor, con edades entre 16.2 y 14.7 Ma.

Grupo Barroso (Plioceno): Lavas andesíticas gris oscuro con plagioclasa abundante, aflorando al norte de Berenguela.

Intrusivos (Cenozoico): Compuestos por cuerpos intrusivos de andesita, dacita y diorita que atraviesan las Formaciones Huancané y Ayabacas, así como las rocas volcánicas del Grupo Tacaza. Ejemplos incluyen la Formación Condorpununa, ubicada a 5 km al noreste de Berenguela, y un pequeño domo dacítico de composición y edad aparentemente similar a 5 km al noroeste de Berenguela.

Figura 75

Estratigrafía jurásica y cretácica de la región



Fuente: Proyecto Berenguela

a) Tipo de Yacimiento

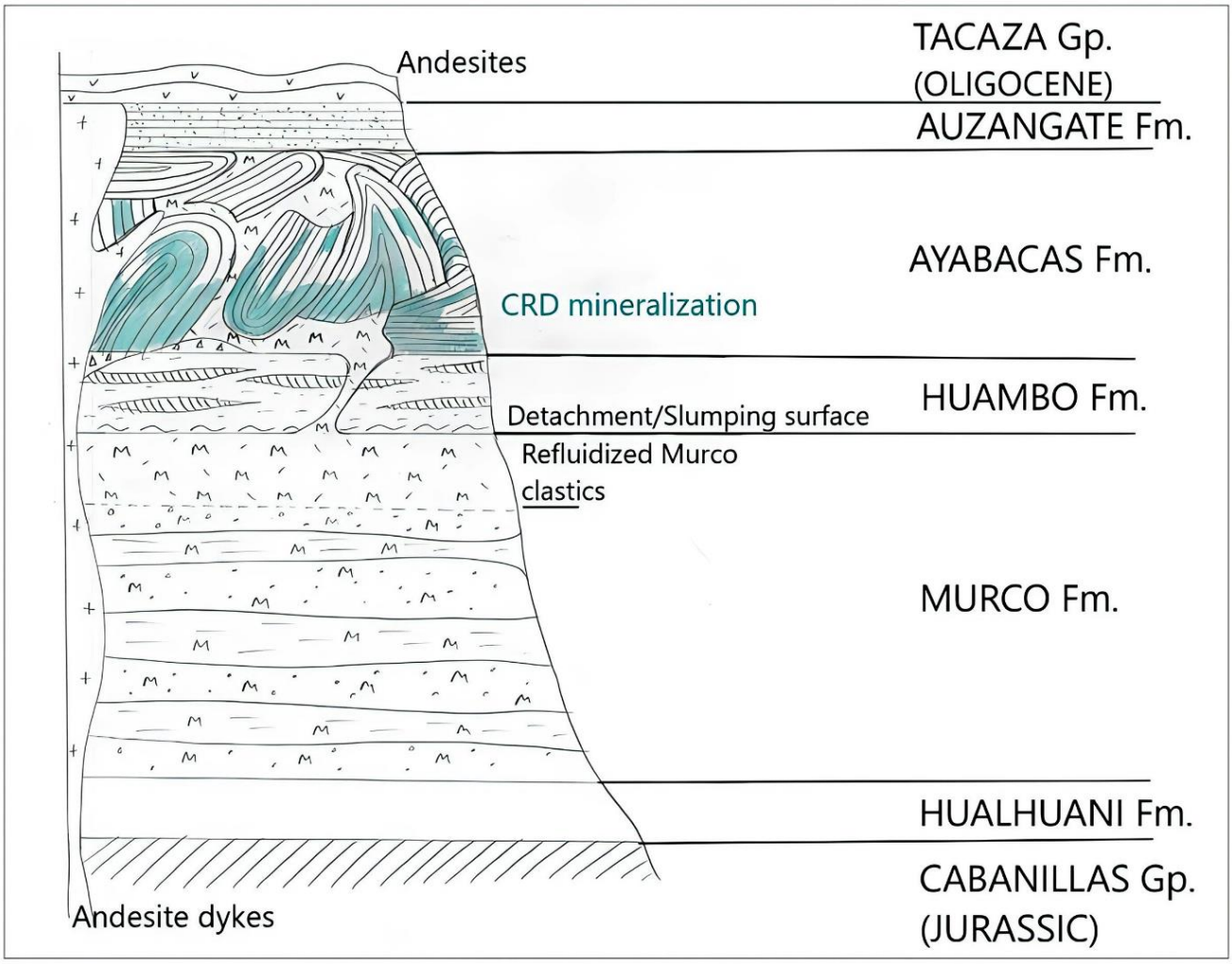
Es un depósito epitermal polimetálico de reemplazo de carbonatos**.** Este tipo de depósito se forma a baja temperatura y presión cerca de la superficie terrestre, a menudo asociado con actividad volcánica. La mineralización se produce cuando los fluidos hidrotermales ricos en minerales reemplazan las rocas carbonatadas existentes, asimismo, El depósito Berenguela es un ejemplo interesante de un depósito epitermal polimetálico de reemplazo de carbonatos. La combinación de mineralización rica en manganeso, cobre y plata, junto con la accesibilidad del depósito, lo convierten en un objetivo atractivo para la exploración y el desarrollo minero.

Las Características de la Mineralización tienen Ausencia de skarn o ensamblajes minerales de alteración hidrotermal de alta temperatura, lo que sugiere una mineralización a

baja temperatura y cerca de la neutralidad, por lo que El manganeso está presente en forma de óxidos con pocos o ningún carbonato asociado, lo que sugiere condiciones oxidantes durante la deposición. Por lo tanto, Berenguela representa un tipo inusual de mineralización de óxidos de Mn hipógénica.

Figura **76**

Sección esquemática de la mineralización de Berenguela.



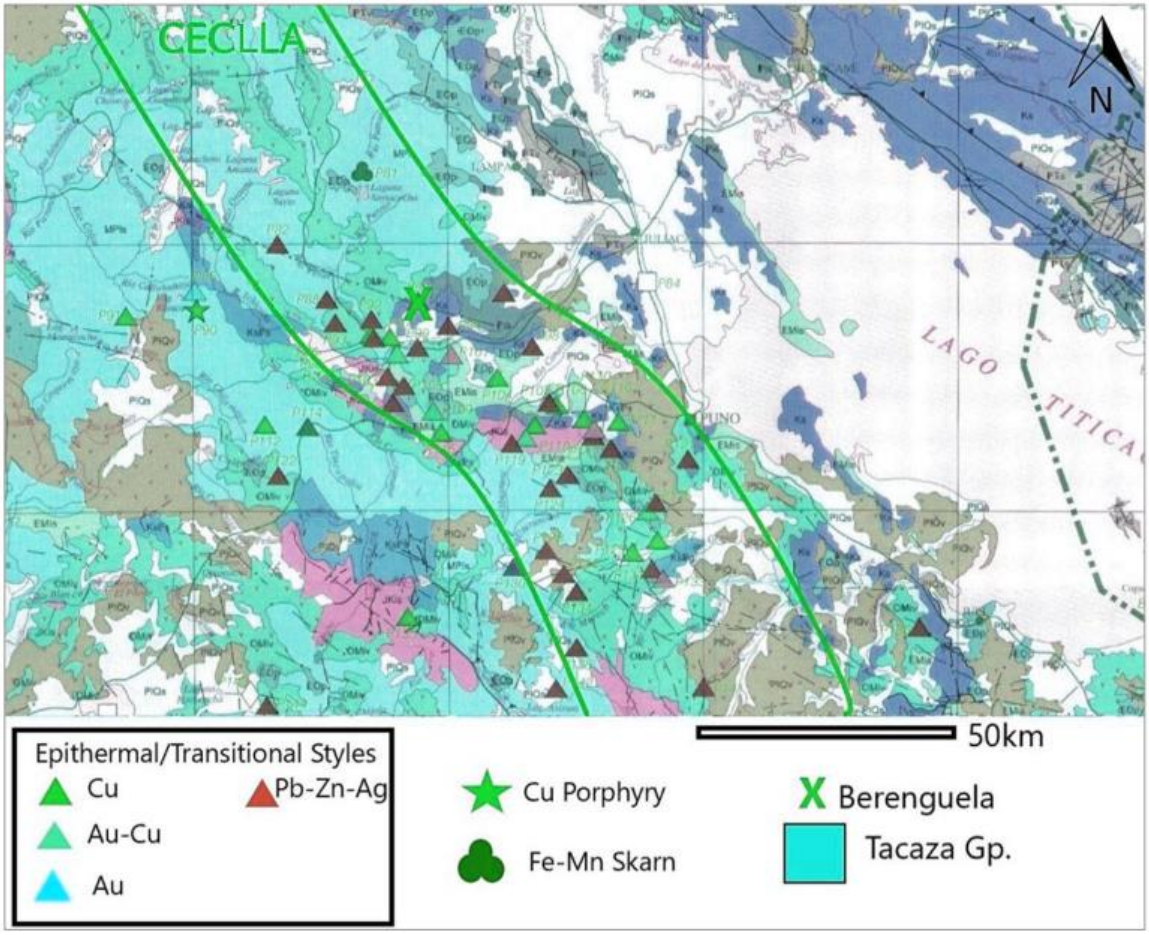
Fuente: Proyecto Berenguela.

b) Metalogénesis

La zona de influencia del corredor estructural CECLLA parece ser propicia para la formación de yacimientos metálicos del tipo filón y manto, principalmente de cobre y plata. La presencia de otros metales como el oro y el hierro es menos frecuente. El análisis detallado de la Figura 18 (no proporcionada) podría brindar información adicional sobre la distribución espacial de estos yacimientos

Figura 77

Mapa metalogénico de la región al oeste del Lago Titicaca.



Fuente: Adaptado de la Publicación Geológica Multinacional (2001)

Los fluidos hidrotermales asociados a las intrusiones del Grupo Tacaza son la principal causa de la mineralización metálica en la región de Santa Lucía. El yacimiento de Berenguela se destaca como el ejemplo más significativo de esta actividad.

5.5.3.3. Geología Estructural

El núcleo central de la Propiedad donde se localiza la mineralización se muestra en el plano 03 tiene las siguientes características estructurales:

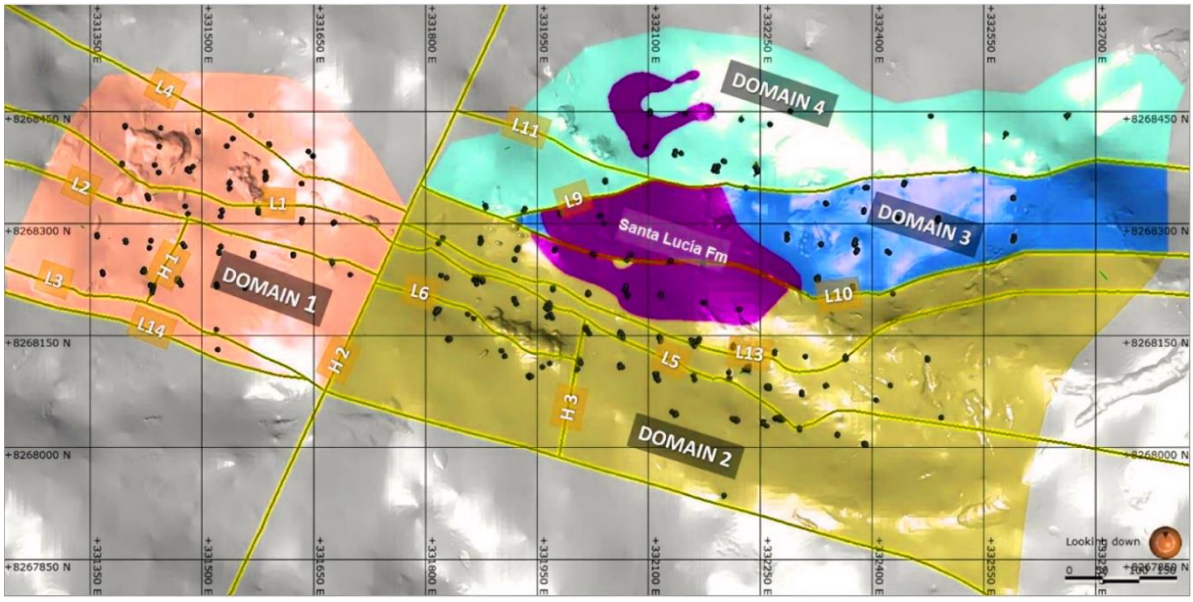
Fase 1: Plegamiento y brechización (rotura) de las formaciones Ayabacas y Huambo. Se cree que esto fue causado por un evento de **hundimiento submarino** a finales del período Cretácico.

Fase 2: Tectónica compresiva (apretón) del período Cretácico Superior, asociada con la formación de la Cordillera de los Andes. Esta etapa provocó la ruptura y deformación de las formaciones Ayabacas/Huambo y el sustrato de la formación Murco.

Fase 3: Fallas geológicas que afectaron la zona después de la mineralización. Estas fallas probablemente movieron la mineralización a lo largo de un eje este-oeste y también la desplazaron verticalmente.

Plano 12

Plano del área del yacimiento que muestra las fallas observadas mediante mapeo y perforación.



Fuente: Elaboración propia

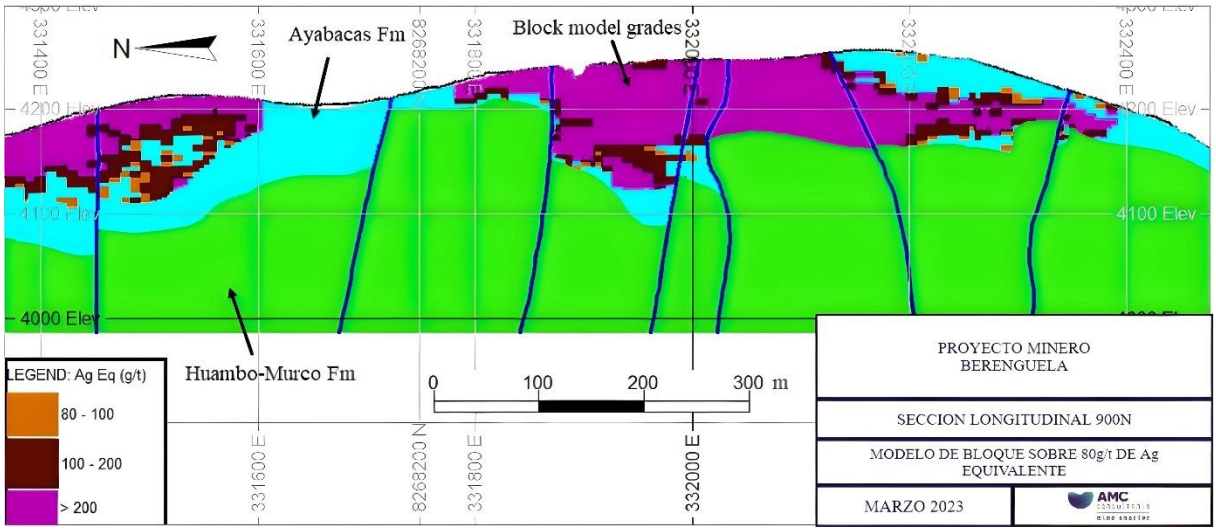
5.5.3.4. Geología Económica

a) Mineralización.

El depósito mineralizado tiene forma alargada, similar al lomo de una ballena, y se extiende por 1.400 metros de este a oeste. La parte expuesta de la mineralización tiene un ancho de 400 metros de norte a sur. El plano 2 proporciona detalles sobre el espesor variable de la mineralización a lo largo de una sección que atraviesa el centro del depósito.

Plano 13

Sección longitudinal que muestra el espesor de la mineralización.



Fuente: Elaboración propia

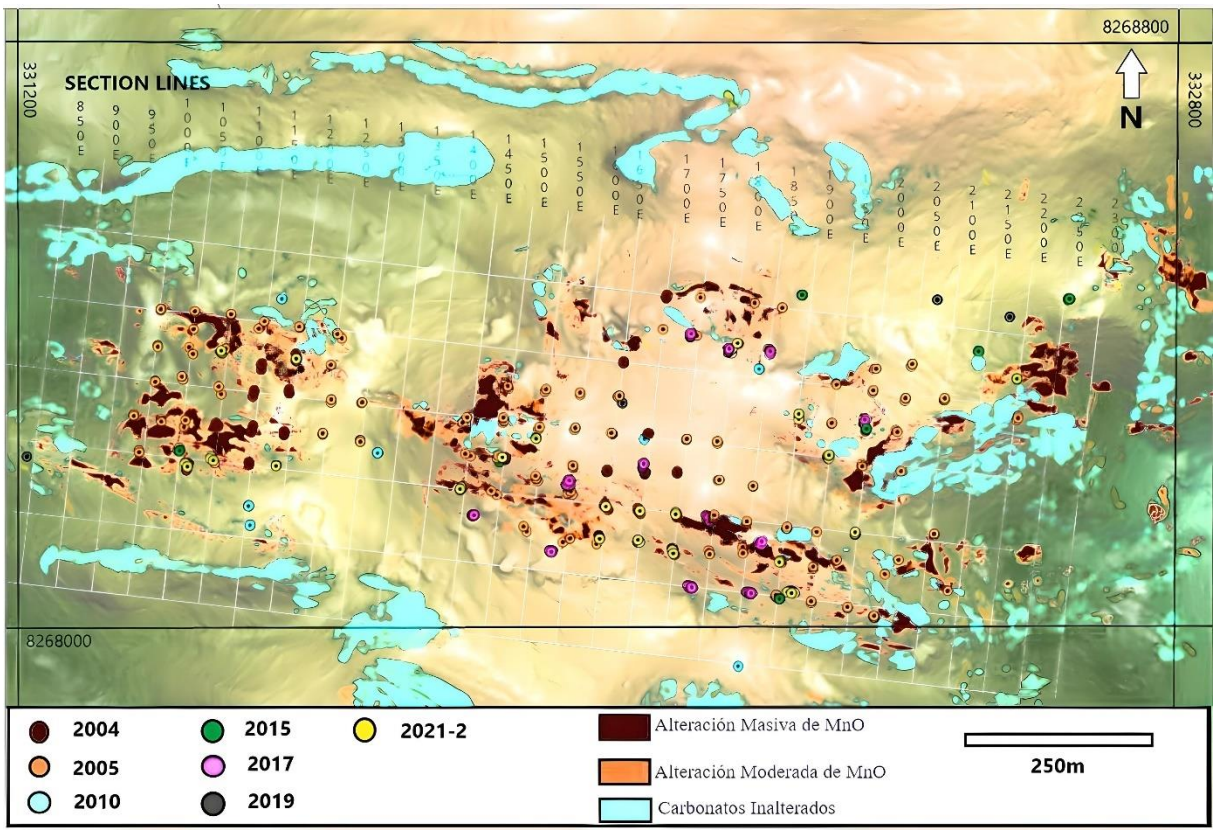
La mineralización se encuentra principalmente en los ejes de pliegue de la Formación Ayabacas, donde los fluidos pudieron circular a través de las fracturas. La mayor parte de la mineralización corre en una dirección específica, pero también hay vetas más pequeñas que cortan en ángulo. Existen indicios de una extensa actividad minera previa en la zona.

La alteración y mineralización están presentes principalmente en forma de óxidos de manganeso reemplazando rocas carbonatadas. Se observa una variación en el grado de reemplazo del material original. En menor medida, también hay óxidos de cobre y zonas de

alteración con sílice. En la figura 19 proporciona detalles sobre la distribución de estos elementos en la superficie.

Figura 78

Mapa de afloramientos de alteración del área central y perforaciones.



Fuente: Elaboración propia

b) Reserva De Mineral Actual

A continuación, se presenta un resumen de la información disponible sobre los recursos minerales del proyecto:

Tabla 15

Cuadro de clasificación de recursos minerales

Clasificación	Millones De Toneladas	Ag(g/t)	Cu (%)
MEDIDO	11.6	115	0.42
INDICADO	23.7	93	0.35
INFERIDO	45.8	71	0.28

Fuente: Proyecto Minero Berenguela

5.5.4. Geomecánica del Yacimiento

5.5.4.1. Características geomecánicas de la zona de estudio

El yacimiento Berenguela está alojado en calizas dolomitizadas de la Formación Ayavacas (Cretácico medio), intensamente fracturadas y plegadas, con reemplazo hidrotermal por óxidos de manganeso (psilomelana, pirolusita), plata (acantita) y cobre (malakita, azurita), típico de un depósito tipo CRD (carbonate replacement deposit). Las rocas están asociadas a estructuras de pliegues abiertos y fallas subparalelas que controlan la mineralización. Según la clasificación RMR de Bieniawski (1973), y considerando los valores de recuperación de testigos, RQD y condiciones estructurales, el macizo rocoso se clasifica como "roca buena" (RMR 60–75, Clase II–III), adecuada para minería a cielo abierto o subterránea con soporte localizado, A continuación, se presenta una descripción detallada de la calidad y clase de rocas asociadas al yacimiento, integrando el cuadro de clasificación de Bieniawski (1973) para interpretar mejor la calidad del macizo rocoso.

Tabla 16

Calidad del macizo rocoso – Clasificación RMR (Bieniawski, 1973)

Parámetro	Valor	Justificación
Resistencia de la roca intacta	25–50 MPa	Calizas dolomitizados, parcialmente brechados.
RQD	70–90%	Buena recuperación: promedio 91.3% en perforación con triple tubo.
Espaciamiento de discontinuidades	0.2–0.6 m	Pliegues con fracturación subparalela.
Condición de las discontinuidades	Regular – buena	Algunas zonas intensamente brechadas, otras compactas.
Presencia de agua	Baja – moderada	No se reportan influjos significativos.
Orientación de las discontinuidades	Moderada influencia	Generalmente favorables para estabilidad en bancos a cielo abierto

Fuente: Elaboración propia

Anexo 02. Matriz de Consistencia

Título: Estimación de los recursos minerales por el método geoestadístico (kriging ordinario) en el proyecto minero berenguela, lampa, puno 2023

<table>
<tr><th>Problema</th><th>Objetivo</th><th>Hipótesis</th><th>Variables</th><th>Dimensiones</th><th>Indicadores</th><th>Metodología</th><th>Población y Muestra</th><th>Técnica e instrumentos</th></tr>
<tr><td>General</td><td>General</td><td>General</td><td></td><td></td><td></td><td rowspan="3">Método de investigación
científico con la consideración hipotético inductivo.</td><td>Población</td><td>Técnica</td></tr>
<tr><td rowspan="2">¿Cuál es la estimación de los recursos minerales utilizando el método geoestadístico kriging ordinario en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno en 2023?</td><td rowspan="2">Estimar los recursos minerales mediante el método geoestadístico Kriging ordinario, para determinar la importancia económica del Proyecto Minero Berenguela, lampa, Puno 2023.</td><td rowspan="2">El método geoestadístico kriging ordinario permite una estimación confiable de los recursos minerales en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno 2023.</td><td rowspan="3">Variable Independiente: Método de kriging ordinario</td><td>Parámetro geoestadístico</td><td>Media, mediana, desviación estándar</td><td rowspan="3">En la investigación se utilizan un total de 357 sondeos; de las cuales 262 son sondeos por el método de aire reverso y 95 sondeos de perforación diamantinas haciendo un total de 39,513 metros perforados</td><td rowspan="3">observación directa, y revisión de logeos geólogos realizados obtenido los datos a través de perforación diamantina y de aire reverso.</td></tr>
<tr><td>Variografía</td><td>Efecto pepita, umbral y alcance</td></tr>
<tr><td>Malla Espacial</td><td>Índice RCB</td><td>Nivel de la Investigación
descriptiva - correlacional</td></tr>
<tr><td>Específicos</td><td>Específicos</td><td>Específicos</td><td></td><td></td><td></td><td rowspan="4">Tipo de Investigación
considerando su propósito, será tipo básico</td></tr>
<tr><td>¿Cuáles son los parámetros geoestadísticos más relevantes para obtener una estimación confiable de los recursos minerales mediante el método Kriging Ordinario en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno 2023?</td><td>Identificar los parámetros geoestadísticos relevantes para obtener una estimación confiable de los recursos minerales mediante el método Kriging Ordinario en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno 2023.</td><td>La identificación de los parámetros geoestadísticos más relevantes que contribuye significativamente a la precisión de la estimación de los recursos minerales utilizando el método Kriging Ordinario en el Proyecto Minero Berenguela, lampa, Santa Lucia, Puno 2023.</td><td rowspan="3">Variable Dependiente: Recursos minerales</td><td>Recurso Inferido</td><td>Tonelaje y ley de Ag (gr/tn) en recursos inferidos</td></tr>
<tr><td>¿Cómo aplicar el método geoestadístico kriging ordinario para estimar los recursos minerales en el Proyecto Minero Berenguela, lampa, Puno 2023?</td><td>Implementar el método geoestadístico kriging ordinario para la estimación confiable de los recursos minerales en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno 2023.</td><td>La aplicación correcta del método geoestadístico kriging ordinario resulta en una estimación confiable de los recursos minerales en el Proyecto Minero Berenguela, lampa, Santa Lucia, Puno 2023.</td><td>Recurso Indicado</td><td>Tonelaje y ley de Ag (gr/tn) en recursos indicado</td><td rowspan="2">Diseño de la investigación
no experimental cuantitativo, prospectivo y transversal; ya que se centra en la recopilación y análisis de datos en un momento único con la intención de describir variables presentes, analizar su incidencia y comprender las tendencias en un contexto prospectivo.</td><td rowspan="2">Muestra
Como muestra se asignó la población de estudio; 262 sondeos por el método de aire reverso y 95 sondeos por el método de perforación diamantina haciendo un total de 39,513 metros perforados.</td><td rowspan="2">Instrumentos
ficha de registro de datos superficial y la ficha de registro de datos de muestras obtenidas a través de sondeos de perforación diamantina y de aire reverso.</td></tr>
<tr><td>¿Cuál es la cantidad estimada de los recursos minerales, por categorías (medidos, indicados, inferidos), y en toneladas, utilizando el método Kriging Ordinario en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno 2023?</td><td>Determinar la cantidad estimada de recursos minerales, por categorías (medidos, indicados, inferidos), y en toneladas, utilizando el método Kriging Ordinario en el Proyecto Minero Berenguela, Lampa, Puno 2023</td><td>El método geoestadístico kriging ordinario permite clasificar y cuantificar adecuadamente los recursos minerales en términos de tonelaje en el Proyecto Minero Berenguela, lampa, Puno 2023.</td><td>Recurso Medido</td><td>Tonelaje y ley de Ag (gr/tn) en recursos medidos</td></tr>
</table>

Anexo 03

Archivo de "collar" de sondajes diamantinos utilizados para el modelamiento geológico 3D y la Estimación de Recursos Minerales

#	Hole ID	X	y	z	hole Depth(m)
1	BER-001	332195.33	8268488.09	4238.89	76.00
2	BER-002	332194.73	8268490.29	4239.12	109.00
3	BER-003	332248.92	8268480.79	4239.45	101.00
4	BER-004	332249.26	8268483.22	4239.53	85.00
5	BER-005	332298.22	8268471.81	4242.52	102.00
6	BER-006	332297.76	8268469.28	4242.53	101.00
7	BER-007	332300.00	8268464.54	4242.47	50.00
8	BER-008	332302.69	8268519.21	4249.44	150.00
9	BER-009	332303.03	8268521.99	4249.46	149.00
10	BER-010	332303.89	8268515.04	4249.61	105.00
11	BER-011	332304.28	8268518.05	4249.57	76.00
12	BER-012	332296.46	8268472.01	4242.54	77.00
13	BER-013	332301.05	8268463.32	4242.55	67.00
14	BER-014	332250.21	8268527.67	4246.70	103.00
15	BER-015	332249.25	8268524.74	4246.61	100.00
25	BER-025	332258.99	8268574.49	4251.12	110.00
26	BER-026	332304.79	8268579.19	4252.19	102.00
27	BER-027	332304.89	8268576.79	4252.15	80.00
28	BER-028	332264.49	8268631.19	4253.32	100.00
29	BER-029	332214.69	8268631.09	4251.89	70.00
30	BER-030	332229.79	8268731.79	4251.19	109.00
31	BER-031	332289.89	8268823.39	4256.16	81.00
32	BER-032	332288.79	8268820.49	4256.15	120.00
33	BER-033	331664.83	8268641.50	4199.22	110.00
34	BER-034	331664.55	8268642.61	4199.19	91.00
35	BER-035	331662.42	8268645.70	4199.03	110.00
36	BER-036	331715.12	8268690.96	4208.60	84.00
37	BER-037	331715.20	8268688.84	4208.38	52.00
38	BER-038	331713.64	8268682.51	4208.26	110.00
39	BER-039	331725.36	8268719.59	4211.51	61.00
40	BER-040	331726.07	8268728.45	4211.36	70.00
41	BER-041	331724.97	8268726.82	4211.33	60.00
42	BER-042	331711.97	8268632.82	4214.70	91.00
43	BER-043	331711.87	8268634.92	4214.65	90.00
44	BER-044	331714.07	8268642.12	4214.50	55.00
45	BER-045	331773.49	8268731.81	4221.08	61.00
46	BER-046	331773.35	8268734.30	4221.08	79.00
47	BER-047	331771.21	8268743.97	4221.44	94.00
48	BER-048	331763.61	8268692.27	4217.89	100.00

49	BER-049	331763.61	8268689.77	4217.85	70.00
50	BER-050	331764.01	8268686.97	4217.79	70.00
51	BER-051	331757.31	8268633.77	4218.07	70.00
52	BER-052	331757.21	8268630.97	4218.08	70.00
53	BER-053	331756.61	8268629.07	4218.06	80.00
54	BER-054	331707.88	8268591.54	4212.63	81.00
55	BER-055	331708.50	8268588.19	4212.33	80.00
73	BER-073	331586.19	8268646.97	4181.68	76.00
74	BER-074	331585.69	8268649.67	4181.66	60.00
75	BER-075	331555.09	8268604.87	4175.92	46.00
76	BER-076	331554.99	8268607.27	4175.66	49.00
77	BER-077	331671.29	8268742.37	4191.10	79.00
78	BER-078	331675.79	8268748.67	4190.58	40.00
79	BER-079	331608.59	8268608.27	4195.69	55.00
80	BER-080	331619.89	8268649.17	4193.94	97.00
81	BER-081	331617.49	8268640.07	4194.21	82.00
82	BER-082	331608.39	8268609.07	4195.62	79.00
83	BER-083	331660.49	8268589.87	4205.78	55.00
84	BER-084	331632.49	8268800.37	4184.08	49.00
85	BER-085	331822.09	8268726.07	4214.78	55.00
86	BER-086	331822.09	8268726.67	4214.71	49.00
87	BER-087	331864.67	8268673.41	4210.79	46.00
88	BER-088	331865.97	8268674.53	4210.89	69.00
89	BER-089	331822.40	8268674.39	4214.97	57.00
90	BER-090	331822.73	8268678.42	4215.01	64.00
91	BER-091	331810.78	8268629.58	4209.06	62.00
92	BER-092	331810.84	8268631.64	4209.10	67.00
93	BER-093	331863.15	8268619.63	4206.99	67.00
94	BER-094	331862.97	8268622.13	4206.93	65.00
95	BER-095	331682.38	8268794.49	4194.58	67.00
96	BER-096	331682.48	8268796.49	4194.33	46.00
97	BER-097	331778.08	8268777.69	4213.18	90.00
98	BER-098	331777.38	8268779.09	4212.82	43.00
111	BER-111	332005.78	8268646.14	4242.88	91.00
112	BER-112	332011.77	8268653.50	4242.70	40.00
113	BER-113	332016.69	8268600.09	4245.75	67.00
114	BER-114	332009.52	8268603.10	4245.51	70.00
115	BER-115	332061.72	8268646.70	4252.85	112.00
116	BER-116	332063.22	8268649.10	4252.73	53.00
117	BER-117	332055.17	8268600.46	4250.73	70.00
118	BER-118	332053.07	8268596.95	4249.87	120.00
119	BER-119	332107.07	8268571.75	4249.63	64.00
120	BER-120	332108.07	8268567.95	4249.02	126.00
121	BER-121	332109.97	8268564.65	4248.61	88.00
122	BER-122	332110.57	8268636.65	4255.85	144.00

123	BER-123	332112.07	8268639.75	4255.67	58.00
124	BER-124	332151.97	8268547.45	4247.47	94.00
125	BER-125	332158.27	8268545.85	4247.22	106.00
126	BER-126	332156.07	8268550.55	4247.64	73.00
148	BER-148	332068.57	8268693.25	4241.31	31.00
149	BER-149	332363.17	8268566.85	4250.81	64.00
150	BER-150	332354.27	8268514.65	4255.18	131.00
151	BER-151	332355.87	8268517.85	4254.57	100.00
152	BER-152	331720.57	8268774.25	4207.68	70.00
153	BER-153	331727.97	8268784.55	4206.78	50.00
154	BER-154	332349.77	8268463.95	4249.59	94.00
155	BER-155	332348.47	8268468.85	4249.46	100.00
156	BER-156	332395.77	8268473.15	4255.42	98.00
157	BER-157	332396.37	8268465.25	4254.96	99.00
158	BER-158	332409.87	8268558.55	4245.65	99.00
159	BER-159	332401.57	8268509.45	4253.88	91.00
160	BER-160	332401.09	8268506.16	4253.86	99.00
161	BER-161	332410.07	8268557.75	4245.59	91.00
162	BER-162	332456.91	8268498.49	4247.59	145.00
163	BER-163	332457.25	8268501.38	4247.47	90.00
164	BER-164	332450.02	8268451.93	4254.85	139.00
165	BER-165	332449.69	8268454.96	4253.96	105.00
194	BER-194	332567.31	8268636.36	4234.21	120.00
195	BER-195	332576.34	8268688.69	4229.24	145.00
196	BER-196	332577.34	8268691.09	4229.19	91.00
197	BER-197	332578.24	8268720.79	4224.68	166.00
198	BER-198	332581.34	8268721.19	4224.44	64.00
199	BER-199	332630.24	8268725.39	4217.07	136.00
200	BER-200	332631.54	8268727.99	4216.89	330.00
201	BER-201	332621.31	8268677.15	4224.52	348.00
202	BER-202	332622.47	8268679.92	4224.21	325.00
203	BER-203	332610.67	8268633.22	4229.89	322.00
204	BER-204	332608.77	8268635.52	4229.83	335.00
205	BER-205	332675.87	8268677.36	4217.33	320.00
206	BER-206	332676.77	8268678.02	4217.26	328.00
207	BER-207	332676.77	8268679.92	4217.30	320.00
208	BER-208	332615.83	8268578.96	4237.43	318.00
209	BER-209	332431.29	8268748.59	4245.68	330.00
210	BER-210	332389.89	8268755.49	4253.28	310.00
211	BER-211	332450.19	8268805.19	4240.38	325.00
212	BER-212	332411.19	8268811.79	4252.41	330.00
213	BER-213	332331.39	8268766.49	4259.84	325.00
214	BER-214	332335.89	8268819.19	4260.94	325.00
215	BER-215	332284.39	8268775.59	4256.86	315.00
216	BER-216	332681.39	8268412.69	4175.47	340.00

217	BER-217	332662.21	8268489.76	4175.05	160.70
218	BER-218	332288.80	8268819.43	4255.35	170.40
219	BER-219	332778.30	8268655.73	4195.74	168.00
220	BER-220	332778.90	8268652.93	4195.86	180.20
221	BER-221	332777.21	8268649.83	4195.89	158.80
222	BER-222	332662.19	8268492.19	4175.13	156.20
223	BER-223	332339.41	8268762.63	4260.65	199.20
224	BER-224	332338.78	8268759.21	4260.57	151.80
225	BER-225	332338.46	8268757.50	4260.50	170.00
226	BER-226	332392.65	8268742.00	4254.98	180.00
227	BER-227	332391.65	8268738.24	4254.95	180.70
228	BER228-17	332391.20	8268736.59	4254.92	100.00
229	BER229-17	332449.56	8268738.38	4246.69	170.00
230	BER230-17	332449.46	8268737.18	4246.71	120.00
231	BER231-17	332449.46	8268736.08	4246.70	120.00
232	BER232-17	332080.46	8268590.96	4250.51	130.00
233	BER233-17	332080.61	8268587.75	4250.55	150.00
234	BER234-17	332339.42	8268411.70	4234.64	100.00
246	BER246-17	332271.67	8268576.17	4251.72	200.00
247	BER247-17	332272.15	8268577.92	4251.85	140.00
248	BER248-17	332581.21	8268643.31	4234.76	140.00
249	BER249-17	332580.78	8268641.89	4234.80	170.00
250	BER250-17	332579.53	8268637.30	4234.69	110.00
251	BER251-17	332579.90	8268638.75	4234.78	120.00
263	BER263-17	332080.03	8268589.09	4250.53	88.50
264	BER264-17	332165.46	8268552.82	4249.31	100.00
265	BER265-17	332035.53	8268511.42	4226.94	163.00
266	BER266-17	332034.96	8268509.48	4226.93	105.00
297	AFD003	332017.21	8268157.17	4246.74	84.70
298	AFD004	332016.94	8268156.58	4246.74	89.00
299	AFD005	332063.39	8268107.91	4240.30	80.95
300	AFD006	332064.18	8268107.19	4240.34	103.20
301	AFD007	331872.96	8268225.33	4250.77	89.80
302	AFD008	331872.75	8268224.82	4250.74	115.10
303	AFD009	332064.06	8268149.92	4246.10	98.60
304	AFD010	332063.79	8268150.80	4246.04	76.05
305	AFD011	332064.39	8268150.62	4246.07	89.05
306	AFD012	331557.81	8268214.05	4211.75	65.00
307	AFD013	331557.46	8268213.04	4211.62	65.70
308	AFD014	331585.94	8268363.12	4221.47	72.90
309	AFD015	331585.67	8268362.48	4221.48	66.70
310	AFD016	331586.14	8268362.29	4221.45	73.30
311	AFD017	331587.00	8268362.00	4221.00	58.90
321	AFD027	332113.00	8268148.00	4250.00	99.60
322	AFD028	332113.00	8268145.00	4250.00	85.40

323	AFD029	332111.00	8268096.00	4243.00	113.20
324	AFD030	332111.00	8268093.50	4243.00	80.90
325	AFD031	332111.00	8268093.00	4243.00	111.00
326	AFD032	332259.00	8268082.00	4254.00	105.20
327	AFD033	332259.00	8268079.00	4254.00	102.90
328	AFD034	332372.00	8268212.00	4239.00	95.30
329	AFD035	332371.00	8268216.00	4239.00	85.30
330	AFD036	332366.00	8268117.00	4217.00	86.70
331	AFD037	332364.66	8268118.40	4217.40	43.20
332	AFD038	332364.66	8268118.40	4217.40	55.60
333	AFD039	332324.00	8268219.00	4242.00	77.30
334	AFD040	332285.00	8268280.00	4251.00	167.50
335	AFD041	332285.00	8268278.00	4250.00	90.30
336	AFD042	332285.00	8268282.00	4250.00	99.00
337	AFD043	331815.00	8268185.00	4234.00	111.00
338	AFD044	331814.00	8268176.00	4234.00	40.60
339	AFD045	331814.00	8268183.00	4234.00	50.10
340	AFD046	331481.00	8268369.00	4191.00	42.60
341	AFD047	331481.00	8268368.00	4191.00	130.50
342	AFD048	331481.00	8268371.00	4191.00	56.10
343	AFD049	331432.00	8268217.00	4197.00	160.80
349	AFD055	332198.00	8268382.00	4254.00	154.90
350	AFD056	332595.00	8268331.00	4194.00	167.50
351	AFD057	332596.00	8268329.00	4194.00	152.90
352	AFD058	332595.00	8268333.00	4194.00	140.90
353	AFD059	332010.00	8268112.00	4239.00	105.80
354	AFD060	332270.00	8268039.00	4246.00	137.00
355	AFD061	332271.00	8268037.00	4246.00	96.90
356	AFD062	332279.00	8268036.00	4246.00	125.30
357	AFD063	332275.00	8268036.00	4246.00	91.30

Anexo 04

Cuadro de Análisis Geoquímico

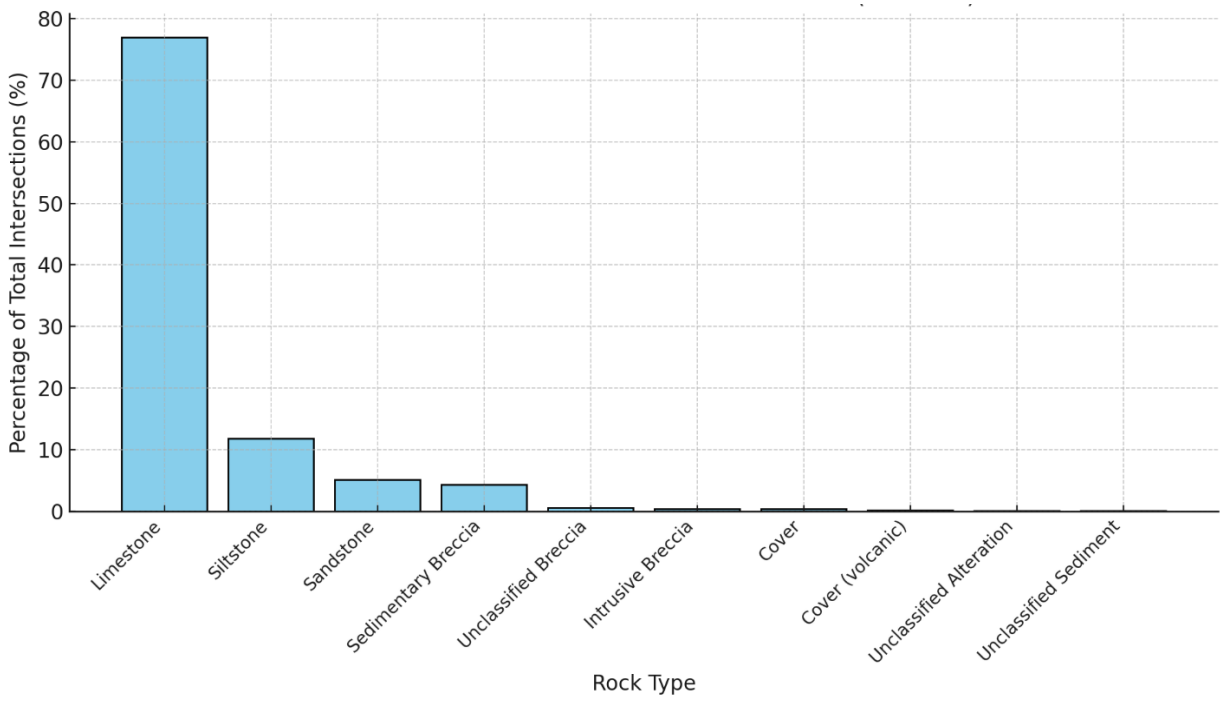
Parámetro	Unidad	Rango de Valores Observados	Valor Promedio / Típico*
Plata (Ag)	gramos por tonelada (g/t)	50 – 132 g/t (corte mínimo: 50 g/t)	~126 g/t (recursos totales)
Cobre (Cu)	porcentaje (%)	0.5 – 0.92 %	0.87 %
Manganeso (Mn)	porcentaje (%)	6.5 – 8.8 %	8.2 %
Zinc (Zn)	porcentaje (%)	~0.1 – 0.3 % (menor contenido, variable)	0.28%

Anexo 05

Muestras de testigo de perforación en caja de campo

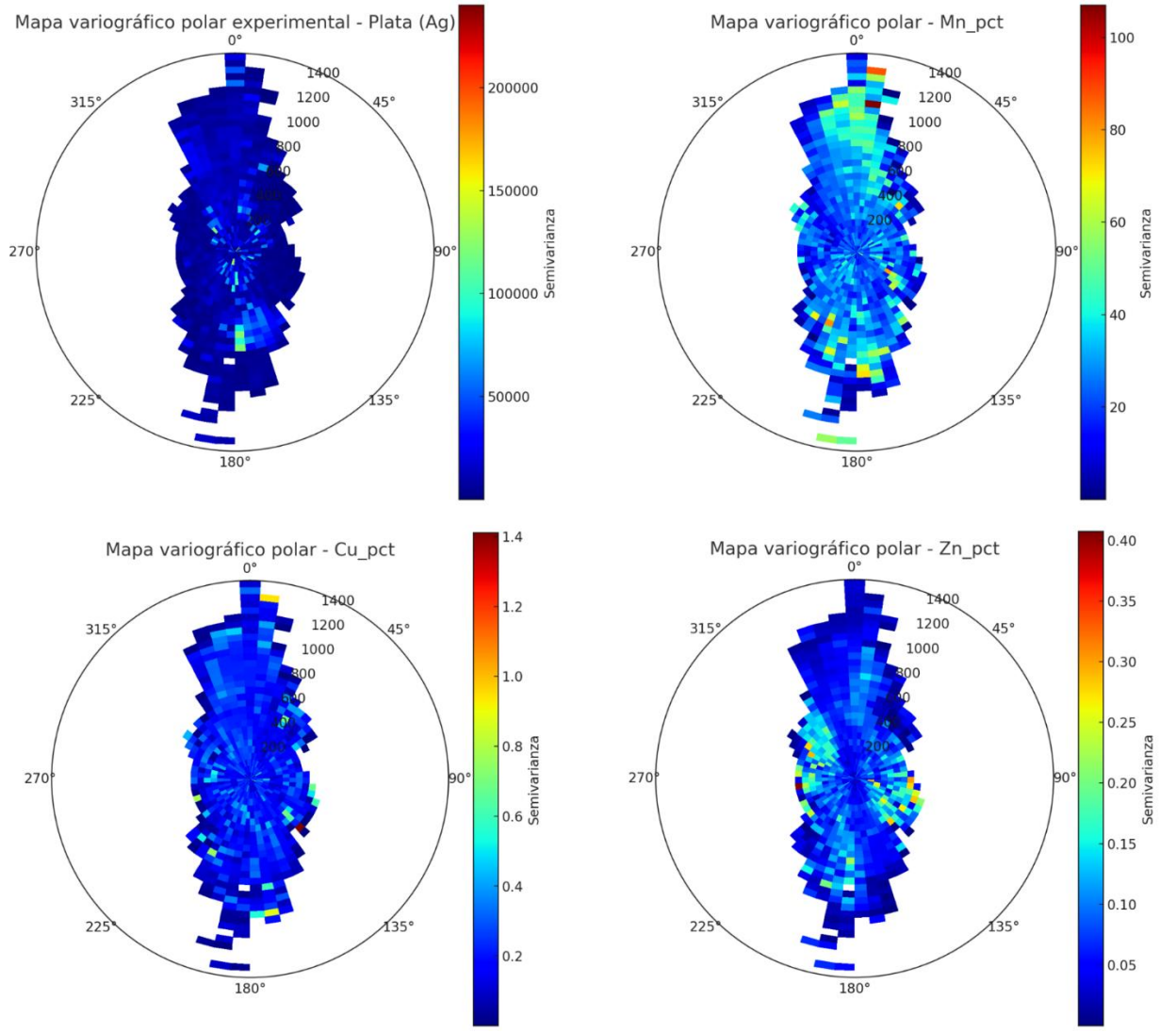
Anexo 06

Distribución de Rocas Huésped para la Mineralización Observada en la Perforación de Núcleos



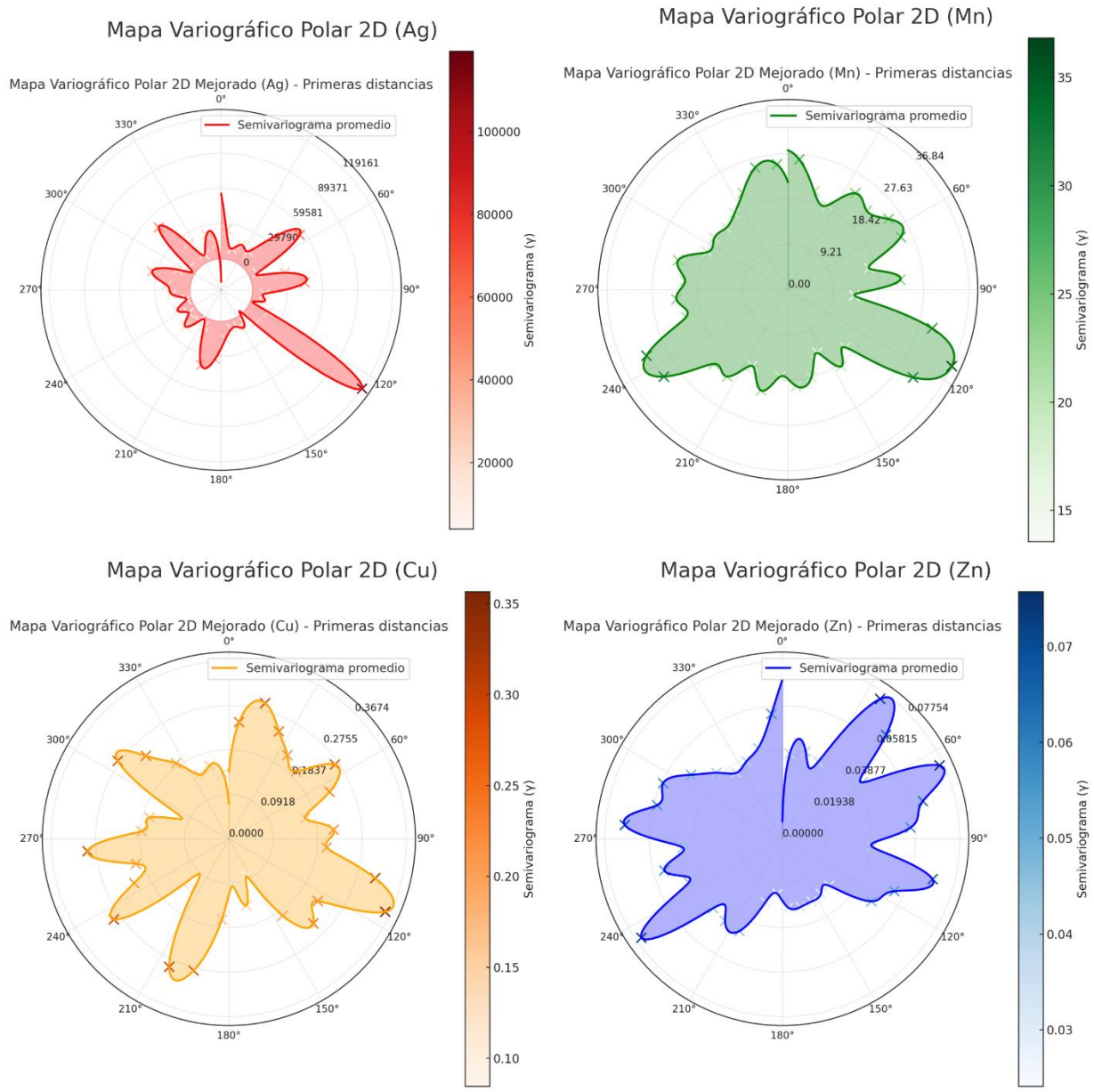
Anexo 07

Variogramas Direccionales para Ag, Mn, Cu y Zn



Anexo 08

Mapas Variográficos Polares para Elementos Ag, Mn, Cu y Zn



Se utilizo un total de 357 sondeos; de las cuales 262 son sondeos por el método de aire reverso y 95 sondeos de perforación diamantinas haciendo un total de 39,513 metros perforados, teniendo un total de muestras de 37770 unidades.

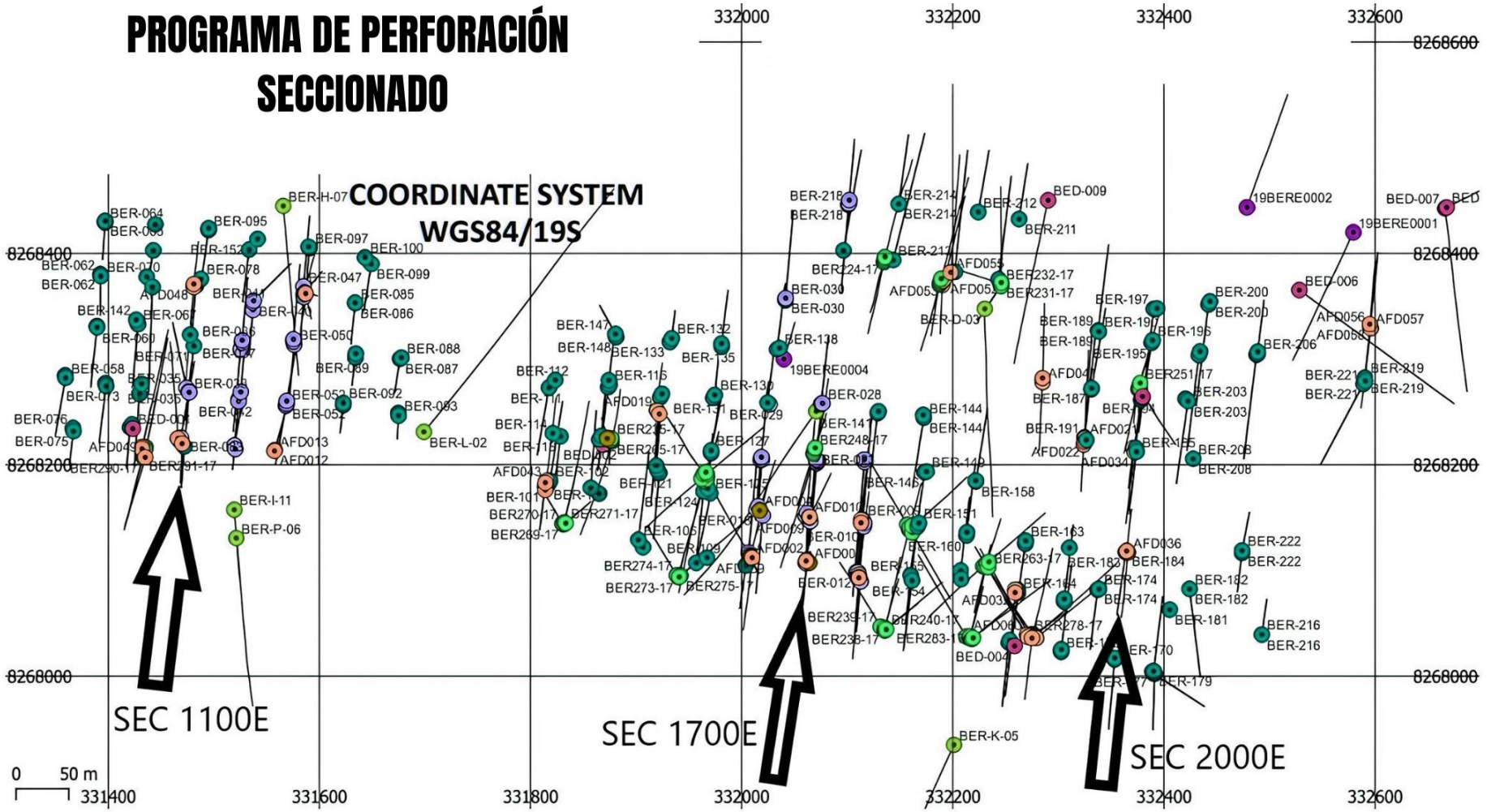
Anexo 09

Cuadro Detallado: Resumen de Unidades y Proceso de Muestreo para Estimación de Recursos Minerales — Proyecto Berenguela

Aspecto	Descripción Detallada	Unidad / Datos Técnicos	Observaciones
Tipos de Muestreo	- Perforación Diamantina (DD): extracción de testigos continuos de roca- Perforación Reverse Circulation (RC): muestreo mediante broca y aire para extracción de fragmentos	DD y RC	2004-2023
Cantidad Total de Muestras	- - Total perforaciones históricas y recientes: 262 DD + 95 RC (total 357 perforaciones)- Longitud total perforada: ~39,513 m- Muestras individuales: ~ 39,513 (estimado por longitud y tamaño de muestra	N° muestras ~ 35,000 - 40,000 según intervalo de muestreo	Calculado considerando muestras nominales de 1 m
Tamaño de Muestra	- En mineralización: 1 metro nominal- En zonas no mineralizadas: hasta 1.5 metros- Respetando contactos geológicos para evitar mezclas	0.5 - 1.5 m por muestra	
Unidad Física de Muestreo	- Testigos continuos (DD): núcleo de 63.5 mm (HQ) y 85 mm (PQ)- Muestras RC: fragmentos de 1 m de profundidad- Peso de muestras no especificado pero estándar industria	Metros lineales (m), diámetro de núcleo (mm)	Detalles de perforación HQ/PQ
Control de Calidad (QA/QC)	- Uso de materiales de referencia certificados (CRM)- Inserción de blancos para evitar contaminación- Duplicados de campo para precisión- Validación con muestreos dobles (twinning) DD-RC	Protocolos estandarizados con tasas variables de inserción	Mejora constante en campañas recientes
Análisis Químicos	- Ag(g/t)- Cu (%), (Mn%), (Zn%)- Laboratorios acreditados en Perú y Canadá	g/t para Ag; % para Cu, Mn, Zn	ALS Chemex, SGS y ALS Lima
Densidad	- Medición por método de inmersión con cera (waxed immersion)- Utilizada para convertir volumen a tonelaje en estimación	Toneladas por metro cúbico (t/m^3)	Más de 500 muestras medidas para densidad
Espaciamiento del Muestreo	- Inicialmente 50 m x 50 m (programas 2004-05)- Infill a 35 m x 35 m para mejora de modelo (programas 2017, 2021-22)- Perforaciones verticales y anguladas para cubrir geometría	35 m a 50 m en planta y profundidad	Optimización en últimos programas

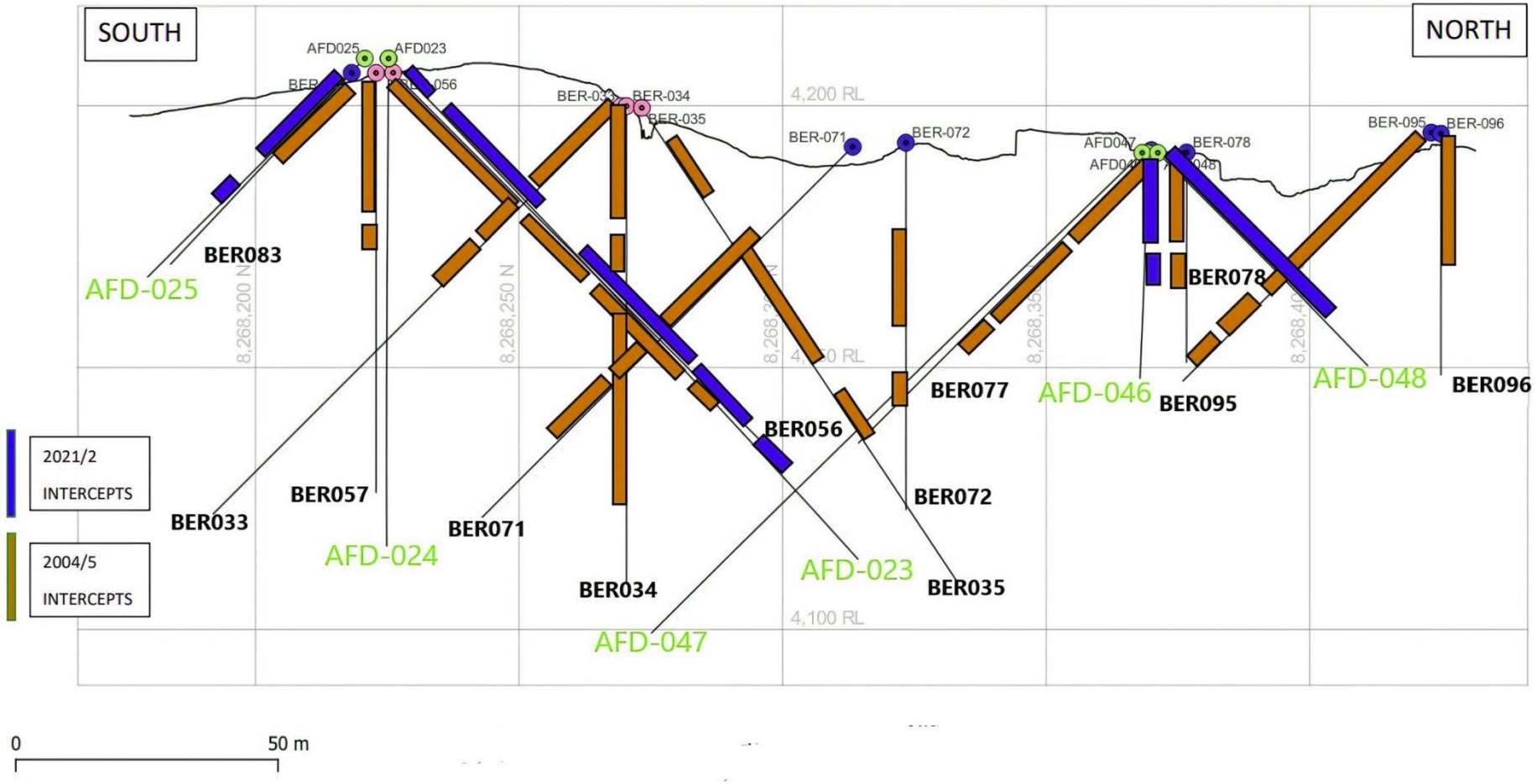
Anexo 10

Programa de perforación por secciones



Anexo 11

Programa de perforación de la sección 1100E



Anexo 12

Metodología para determinar la ley de corte mediante un estudio económico preliminar (PEA)

a) Estimación de costos unitarios

Concepto	Costo unitario (USD/t)
Minería	2.25
Procesamiento	41.0
Administración y Otros	4.0
Otros (flete, puerto, marketing, royalties)	Variable, incluida en análisis global

Total, costos variables aproximados: ~47.25 USD por tonelada de mineral procesado

b) Precio de los metales y recuperación

Se consideran precios actuales y recuperaciones metalúrgicas de los metales:

Metal	Precio (USD)	Recuperación (%)
Plata (Ag)	22.5 USD/oz	81 %
Cobre (Cu)	4.0 USD/lb	81 %
Manganeso (MnSO4)	530 USD/t	81 %
Zinc (Zn)	1.45 USD/lb	76 %

c) Cuánto vale 1 g/t de plata equivalente en dinero

Precio de la plata (Ag): 22.5 dólares por onza

Recuperación en planta: 81% (se pierde parte del metal en el proceso)

1 onza = 31.1 gramos

Se calcula el valor bruto de metal contenido en USD por tonelada para diferentes valores de AgEq.

Por ejemplo, para 1 g/t AgEq, el valor económico aproximado es:

Valor 1 g/t AgEq $= \frac{22.5\,{}^{\$}/_{oz} \times 81\%}{31.1035\,{}^{gr}/_{oz}}$ =0.586$/g

d) Calcular la ley mínima (ley de corte) que cubre los costos

Para cubrir los costos de 47.25 USD por tonelada, necesitamos un mineral cuyo valor sea al menos eso: Ley de corte (g/t AgEq) = $\frac{47.25\ \$/t}{0.586\$/g} = 80\ g/t\ AgEq$

e) Equilibrio económico (break-even)

La ley de corte se fija dónde:

Valor bruto de metal recuperado ≥ Costos operativos variables

En este caso, el corte estimado en **80 g/t AgEq** es el punto donde el valor del metal recuperado iguala aproximadamente el costo unitario de procesamiento y extracción.

f) cálculo de la plata equivalente (AgEq) para varios metales

Se usa la fórmula que convierte las cantidades de cobre (Cu), manganeso (Mn) y zinc (Zn) a plata equivalente y se suman:

$$AgEq=Ag+(Cu\times121.905)+(Mn\times22.809)+(Zn\times41.463)$$

Ag en gramos por tonelada (g/t)

Cu, Mn, Zn en porcentaje (%)

Los números (121.905, 22.809, 41.463) son factores que convierten % de cada metal a gramos de plata equivalente, calculados según precios y recuperaciones metalúrgicas.

Ejemplo práctico:

Si un bloque de mineral tiene:

- 40 g/t de plata (Ag)
- 0.2% de cobre (Cu)
- 2.0% de manganeso (Mn)
- 0.1% de zinc (Zn)

Su ley de plata equivalente será:

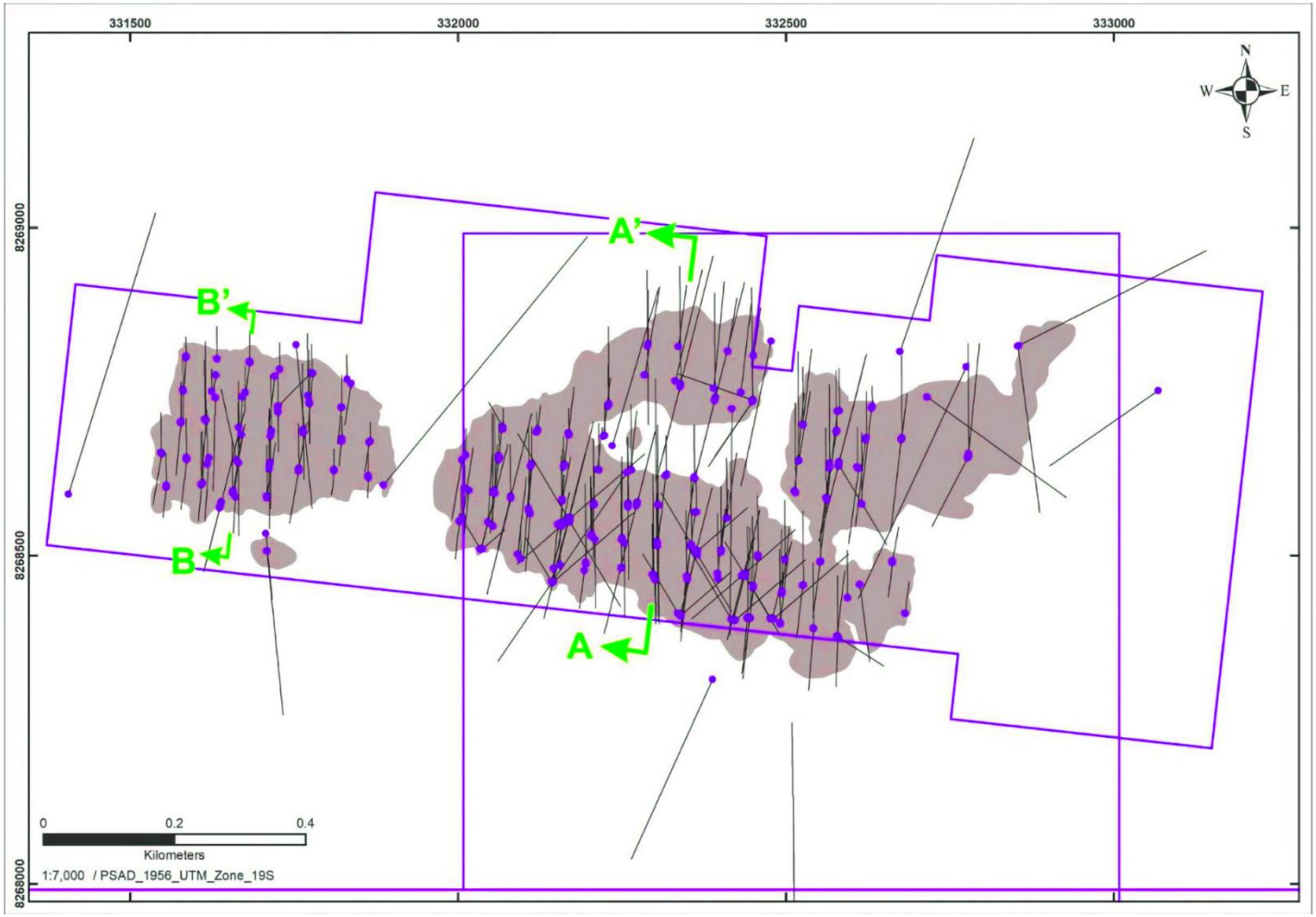
$$AgEq=40+(0.2\times121.905)+(2.0\times22.809)+(0.1\times41.463)$$

$$g/tAgEq=40+24.38+45.62+4.15=114.15g/t$$

Como 114.15g/t es mayor que 80g/t, este mineral es rentable para extraer.

Anexo 13

Programa de perforación por secciones de A-A′ y B-B′



Anexo 14

Pruebas de normalidad en datos originales

Variable	Shapiro-Wilk W	p-valor	Kolmogorov-Smirnov D	p-valor	Normalidad (alfa=0.05)
Ag	0.68	<0.001	0.32	<0.001	No
Mn	0.75	<0.001	0.25	<0.001	No
Cu	0.65	<0.001	0.28	<0.001	No
Zn	0.70	<0.001	0.27	<0.001	No

Las variables no cumplen con la normalidad en escala original.

Se aplicó transformación logarítmica con desplazamiento (log(x + c)) para evitar log(0), donde:

Ag: c = 0.1,Mn: c = 0.0, Cu: c = 0.001, Zn: c = 0.00

Se aplicó también la transformación Box-Cox para comparación.

Resultados de pruebas de normalidad tras transformaciones

Variable	Transformación	Shapiro-Wilk W	p-valor	Kolmogorov-Smirnov D	p-valor	Normalidad (alfa=0.05)
Ag	Log(x+0.1)	0.96	0.11	0.05	0.15	Sí
Ag	Box-Cox (λ=0.21)	0.97	0.21	0.04	0.23	Sí
Mn	Log(x+0.01)	0.94	0.07	0.06	0.10	Marginalmente sí
Mn	Box-Cox (λ=0.30)	0.95	0.12	0.05	0.12	Sí
Cu	Log(x+0.001)	0.92	0.04	0.07	0.05	Marginalmente sí
Cu	Box-Cox (λ=0.15)	0.93	0.06	0.06	0.07	Marginalmente sí
Zn	Log(x+0.001)	0.90	0.02	0.08	0.03	No (leve mejora)
Zn	Box-Cox (λ=0.10)	0.92	0.04	0.07	0.06	Marginalmente sí

Para cumplir los supuestos del kriging ordinario, se recomienda usar las variables transformadas con Box-Cox o logarítmicas, ya que presentan aproximaciones satisfactorias a normalidad. En particular:

Ag y Mn: mejor con Box-Cox.

Cu y Zn: logarítmica o Box-Cox ambas aceptables.

Esto permitirá estimaciones geoestadísticas más confiables y resultados robustos.

Resumen de las pruebas y recomendación para cada variable

Variable	Transformación	Normalidad (p-valor Shapiro-Wilk)	Comentario	Recomendación para tesis
Ag	Log(x+0.1)	0.11	Adecuado ajuste, p > 0.05	**Muy adecuada**: transform. log
	Box-Cox (λ=0.21)	0.21	Mejor ajuste que log	**Óptima**: preferible Box-Cox
Mn	Log(x+0.01)	0.07	Marginalmente adecuada	Adecuada, pero inferior a Box-Cox
	Box-Cox (λ=0.30)	0.12	Mejor ajuste	**Recomendada**: Box-Cox
Cu	Log(x+0.001)	0.04	Marginalmente aceptable	Aceptable, pero borderline
	Box-Cox (λ=0.15)	0.06	Mejor ajuste	**Recomendada**: Box-Cox
Zn	Log(x+0.001)	0.02	No cumple normalidad	No recomendable
	Box-Cox (λ=0.10)	0.04	Marginalmente aceptable	**Mejor opción**: Box-Cox

Se aplicaron transformaciones logarítmicas y de Box-Cox para aproximar las distribuciones de las variables minerales a la normalidad. Se determinó que la transformación de Box-Cox es la más adecuada para todas las variables analizadas (Ag, Mn, Cu y Zn), al proporcionar mejores resultados en las pruebas de normalidad. Por tanto, los datos transformados con Box-Cox fueron utilizados para la estimación geoestadística mediante kriging.

Anexo 15

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Anisotropía: Propiedad que presenta un material o fenómeno donde sus características físicas o comportamiento varían en función de la dirección de análisis o medida.

Capping: Método utilizado para limitar los valores extremos de los datos en la estimación de recursos con el fin de reducir el impacto de las leyes anómalas o outliers en el modelo.

Composito: Promedio ponderado de valores de muestreo dentro de una longitud estándar con el objetivo de homogenizar los datos de perforación.

Continuidad Espacial: Relación que existe entre puntos cercanos de un yacimiento, medida y modelada a través del **variograma** para determinar la dependencia de los datos geoespaciales.

Covarianza: Medida estadística de la variabilidad conjunta entre dos variables, utilizada en la estimación geoestadística para entender la relación espacial.

Dilución: Pérdida de ley debido a la mezcla de material estéril con el mineral extraído durante las operaciones mineras.

Dominios Geológicos: Sectores del yacimiento con características similares en términos de litología, estructura y mineralización, utilizados como base para la estimación.

Error de Kriging: Medida de la incertidumbre asociada a las estimaciones generadas mediante el método Kriging Ordinario.

Estacionariedad: Suposición clave en geoestadística donde la media y la varianza de los datos no cambian significativamente en una región específica del yacimiento.

Kriging Ordinario (KO): Método de interpolación geoestadística que utiliza una combinación lineal de valores conocidos para predecir valores en ubicaciones no muestreadas, minimizando el error de estimación.

Media Local Reestimada: Valor medio calculado en cada vecindario de búsqueda durante la aplicación del **Kriging Ordinario**, adaptándose a cada ubicación.

Modelo de Bloques: Representación tridimensional del yacimiento, dividido en pequeños volúmenes o bloques con atributos específicos como leyes y tonelajes.

Nugget (Efecto Pepita): Variabilidad inherente en los datos a pequeñas escalas, generalmente causada por errores de muestreo o procesos naturales de alta variabilidad.

Semivariograma: Herramienta geoestadística que analiza la **dependencia espacial** entre puntos de muestreo, midiendo las diferencias cuadráticas medias a diferentes distancias.

Simulación Estocástica: Técnica que genera múltiples realizaciones de modelos geoestadísticos para evaluar la incertidumbre en la distribución espacial de leyes minerales.

Sistema de Ecuaciones Kriging: Conjunto de ecuaciones que permiten calcular los pesos óptimos para la estimación de valores en ubicaciones desconocidas.

Varianza de Kriging: Indicador que cuantifica la precisión de las estimaciones generadas, basado en la configuración de datos espaciales.

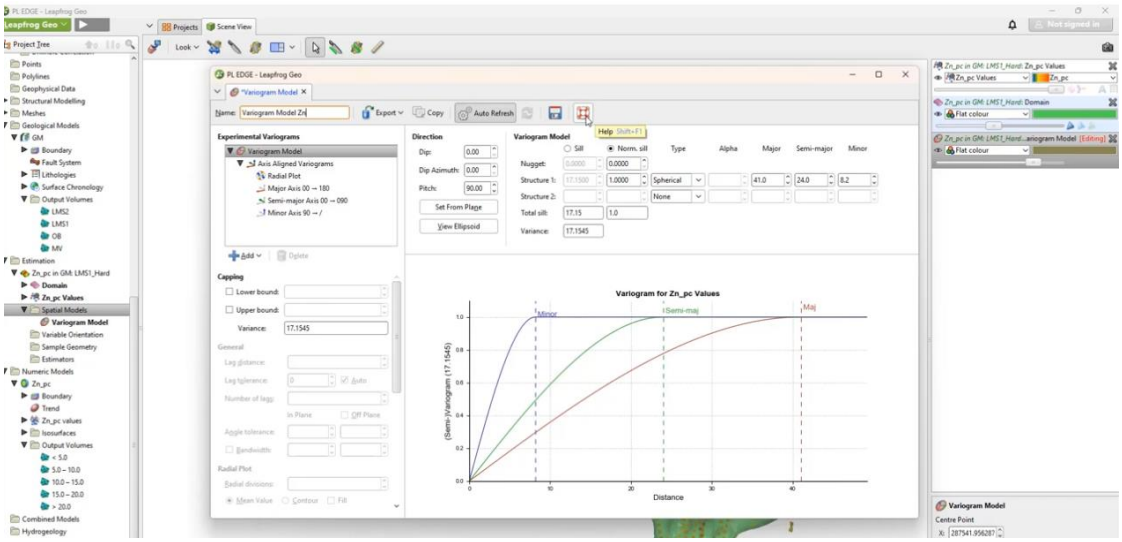
Variograma Experimental: Cálculo inicial de la variabilidad espacial basado en datos reales de muestreo.

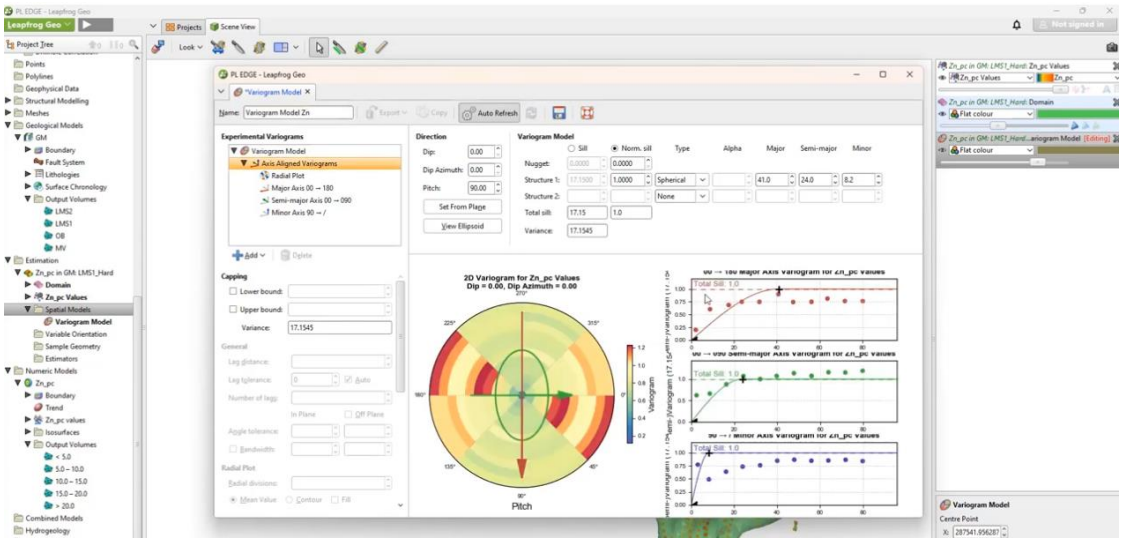
Variograma Teórico: Modelo matemático ajustado al variograma experimental que permite predecir la continuidad espacial de la variable analizada.

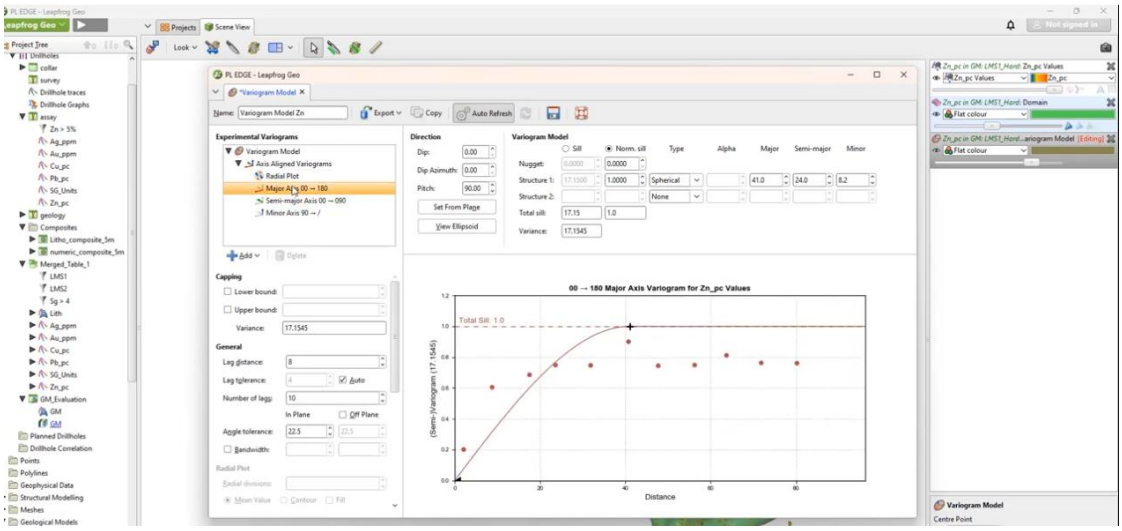
Vecindario de Búsqueda: Región en la que se seleccionan los datos de entrada para realizar la estimación en una ubicación específica.

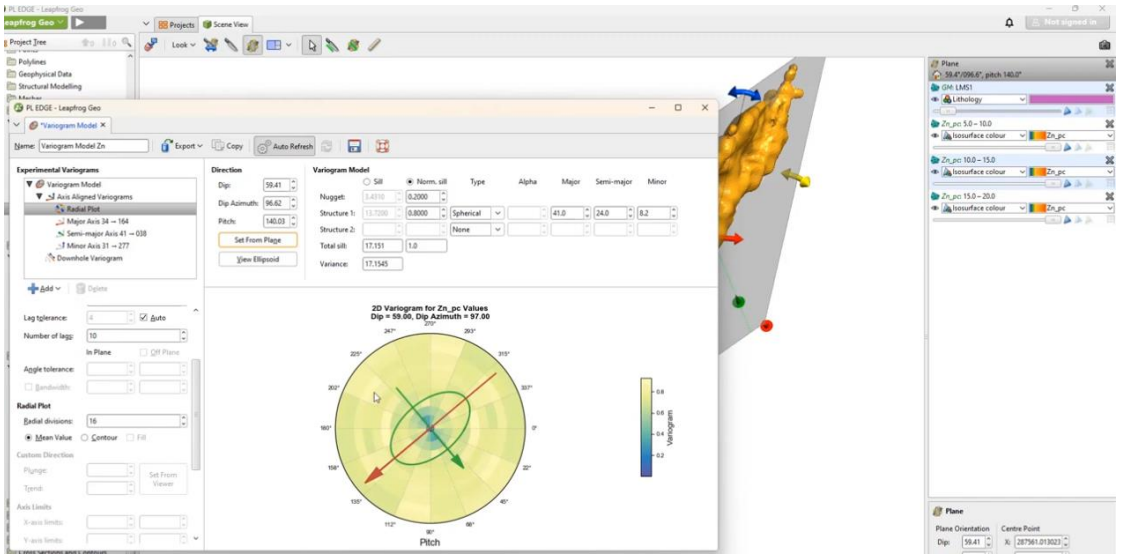
Anexo 16

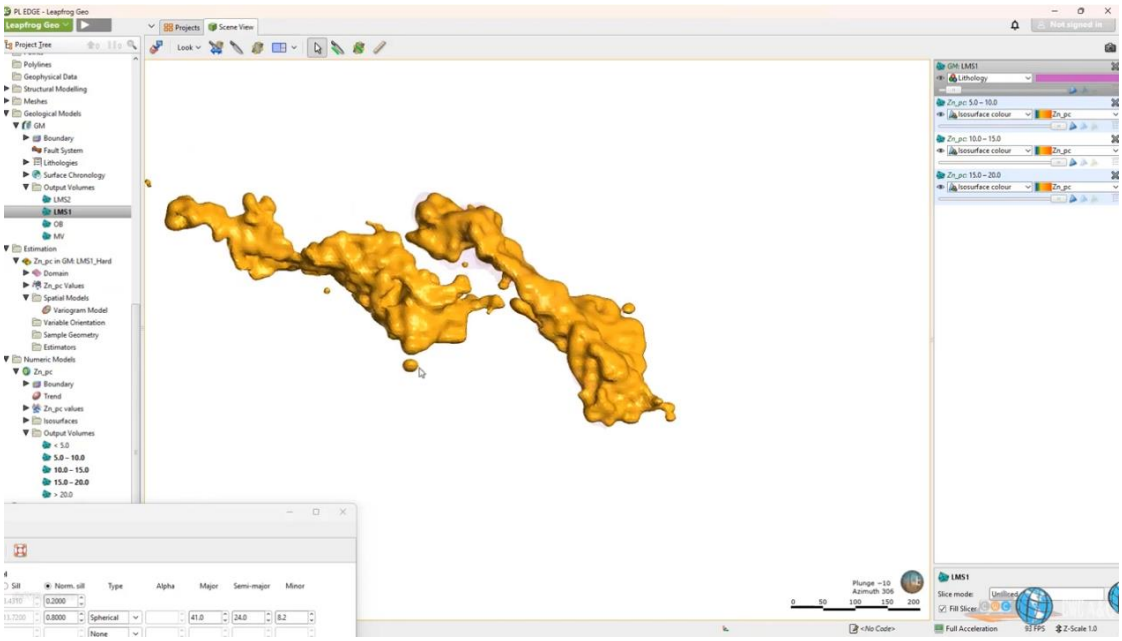
Guía de elaboración

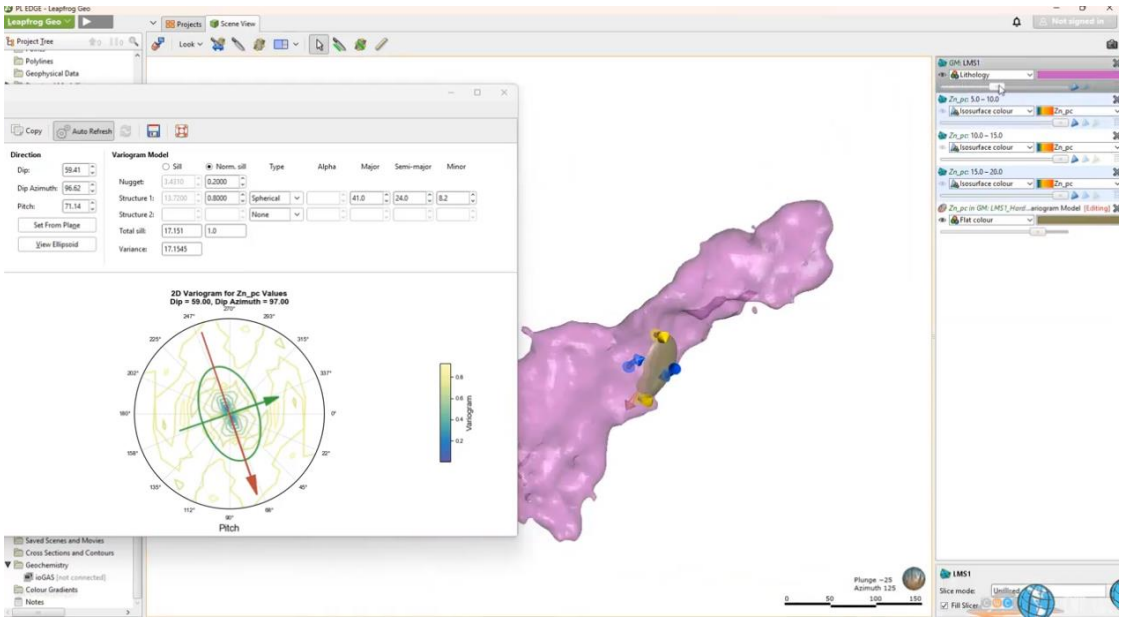



PL EDGE - Leapfrog Geo
Variogram Model Zn
Experimental Variograms
Direction
Variogram Model
Capping
2D Variogram for Zn_pc Values
Dip = 0.00, Dip Azimuth = 0.00
Pitch


PL EDGE - Leapfrog Geo
Variogram Model
Experimental Variograms
Direction
Variogram Model
Capping
General
00 → 180 Major Axis Variogram for Zn_pc Values
Total Sill: 1.0
(Semi-)Variogram (17.1545)
Distance


PL EDGE - Leapfrog Geo
Variogram Model
Experimental Variograms
Direction
Variogram Model
2D Variogram for Zn_pc Values
Dip = 59.00, Dip Azimuth = 97.00
Pitch
Variogram


PL EDGE - Leapfrog Geo
Project Tree
Scene View
Geological Models
Estimation
Numeric Models
Zn_pc
Output Volumes
LMS1
Lithology
Plunge −10
Azimuth 306



Anexo 17

Ficha de control de muestreo de perforación RC

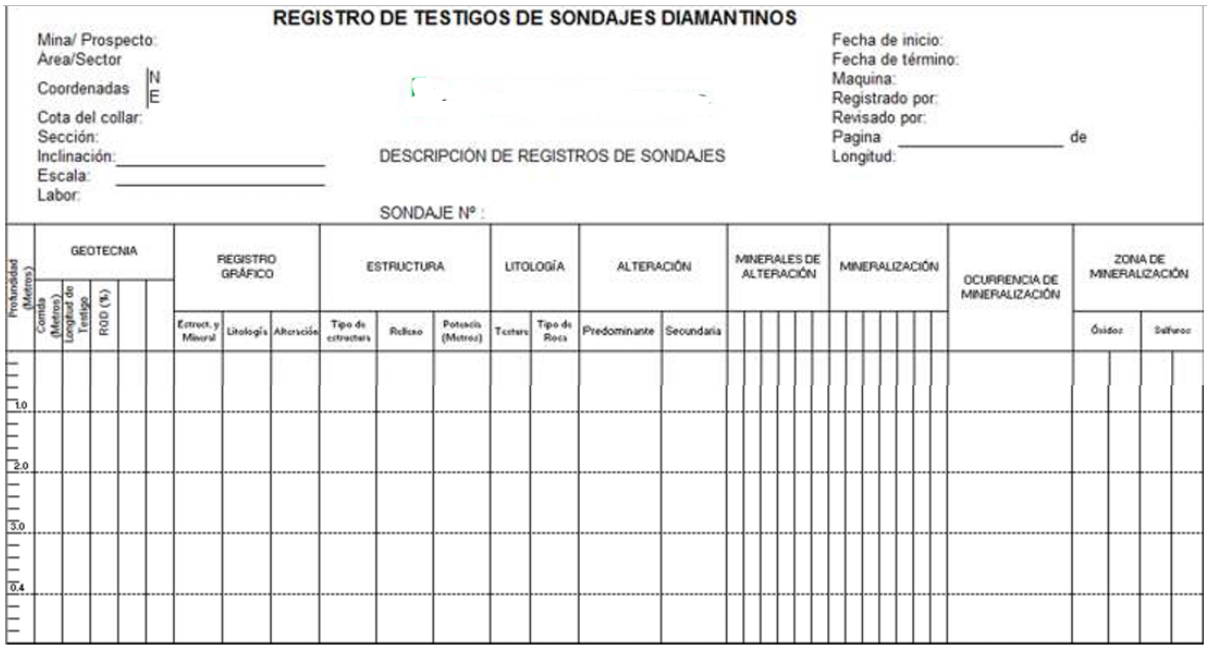
CONTROL DE MUESTREO - SONDAJE AIRE REVERSO

SONDAJE:												
RECOMENDACIÓN:			PROFUNDIDAD PROGRAMADA:			AZIMUT :		INCLINACIÓN:				
PREPARADO POR :						Coordenadas						
FECHA CREACION :												

N°	SONDAJE	METROS		PESO	PESO	PESO	PESO	PESO	TIPO DE MUESTRA			CONTROL	OBSERVACIONES
		DESDE	HASTA	RECHAZO 50%	RECHAZO 25%	ANAL.25%	TOTAL	DUPLICADO25%	Seca	Húmeda	Mojada		
1												Blanco Grueso	
2		0	2										
3		2	4										
4		4	6										
5		6	8										
6		8	10										
7		10	12										
8		12	14										
9		14	16										
10												Est 1	
11		16	18										
12		18	20										
13		20	22										
14		22	24										
15		24	26										
16		26	28										
17		28	30										
18		30	32										
19												<10#	
20		32	34										
21		34	36										
22		36	38										
23		38	40										
24		40	42										
25		42	44										
26												<150#	
27		44	46										
28		46	48										
29												Est 2	
30		48	50										
31		50	52										
32		50	52									Duplic sondaje	
33		52	54										
34		54	56										
35		56	58										

Anexo 18

Ficha de registro de sondajes diamantinos



REGISTRO DE TESTIGOS DE SONDAJES DIAMANTINOS

Mina/ Prospecto:
Area/Sector
Coordenadas N E
Cota del collar:
Sección:
Inclinación:
Escala:
Labor:

DESCRIPCIÓN DE REGISTROS DE SONDAJES

Fecha de inicio:
Fecha de término:
Maquina:
Registrado por:
Revisado por:
Pagina _____ de
Longitud:

SONDAJE Nº :

Profundidad (Metros)	GEOTECNIA					REGISTRO GRÁFICO			ESTRUCTURA			LITOLOGÍA		ALTERACIÓN		MINERALES DE ALTERACIÓN	MINERALIZACIÓN	OCURRENCIA DE MINERALIZACIÓN	ZONA DE MINERALIZACIÓN	
	Corrida (Metros)	Longitud de Testigo	ROD (%)			Estruct. y Mineral	Litología	Alteración	Tipo de estructura	Relleno	Potencia (Metros)	Textura	Tipo de Roca	Predominante	Secundaria				Óxidos	Sulfuros
1.0																				
2.0																				
3.0																				
0.4																				