

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
**Estimación de recursos minerales en la mina El Brocal -
Colquijirca - Cerro de Pasco**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

Elaborado por

Santiago Felix Ore Quiñones

 [0009-0009-9100-0279](https://orcid.org/0009-0009-9100-0279)

Asesor

M.Sc. Carlos Alberto Rojas León

 [0009-0004-0770-4104](https://orcid.org/0009-0004-0770-4104)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Ore Quiñones [1]
Referencia/Reference	[1] S. Ore Quiñones, “ <i>Estimación de recursos minerales en la mina El Brocal - Colquijirca - Cerro de Pasco</i> ” [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Ore, 2025)
Referencia/Reference	Ore, S. (2025). <i>Estimación de recursos minerales en la mina El Brocal - Colquijirca - Cerro de Pasco</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mi madre, Aurelia Quiñones Matta, quien es el pilar fundamental de mi vida. Su tenacidad, valentía y amor incondicional son un ejemplo constante de fortaleza y perseverancia. A mis hermanos, por su apoyo constante, por creer en mí y por estar siempre a mi lado en cada paso.

Y en memoria de mi padre, Oswaldo Ore Estrada, cuyo legado vive en mi corazón, guiándome y acompañándome en cada desafío.

Agradecimientos

A mi Asesor, M.Sc. Carlos León, le agradezco profundamente por su apoyo y disposición en cada etapa del proceso. Su guía y compromiso fueron clave para poder concretar este título académico.

Agradezco de manera especial a la empresa Buenaventura, al Director de Modelamiento, Ing. José Enrique, y a Cosme Soto por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo. Su apoyo y confianza fueron fundamentales para llevar a cabo este proyecto.

Resumen

El informe aborda la estimación de los recursos minerales en la Mina El Brocal, ubicada en la región de Colquijirca, Cerro de Pasco, Perú, con el objetivo de optimizar la estimación y clasificación de los recursos minerales para mejorar los planes de minado y reducir los riesgos asociados. Este proceso involucra un análisis exhaustivo de datos geológicos y geoquímicos obtenidos de perforaciones diamantinas, donde las técnicas geoestadísticas juegan un rol fundamental. El área de estudio se caracteriza por una geología compleja, con mantos mineralizados que presentan plegamientos pronunciados, lo que dificulta la estimación precisa de los recursos. La implementación de la anisotropía dinámica ha sido clave para abordar esta complejidad, ya que permite ajustar la dirección de los elipsoides de búsqueda en función de las características geológicas del depósito, lo que mejora la precisión de la interpolación de las leyes. El modelo geológico en 3D desarrollado mediante el software Leapfrog Geo ha permitido representar de manera precisa la interpretación de la geometría de la litología y de los mantos mineralizados. Este modelo es validado tanto de forma visual como cuantitativa, asegurando que las interpretaciones sean consistentes con la geología observada y los datos disponibles.

La estimación de los recursos se clasifica en tres categorías: Medido, Indicado e Inferido, dependiendo del nivel de confianza. Los recursos medidos son los más confiables, mientras que los inferidos presentan una mayor incertidumbre debido a la limitada información geológica. Además, para mayor confiabilidad los recursos en sectores donde los resultados de QAQC (Aseguramiento de Calidad y Control de Calidad) son nulos o deficientes sufren una degradación de la categoría, es decir, el medido pasa a indicado y el indicado a inferido.

Se ha logrado una estimación más precisa y confiable de los recursos minerales. La validación del modelo es un paso esencial en este proceso, ya que asegura que el modelo de estimación sea adecuado para la planificación minera y la toma de decisiones

estratégicas, permitiendo a los responsables de la mina tomar decisiones mejor fundamentadas y reducir los riesgos asociados a la explotación de los recursos minerales.

Palabras clave — Geoestadística, anisotropía dinámica, estimación de recursos, modelado 3D.

Abstract

The report addresses the estimation of mineral resources at the El Brocal Mine, located in the Colquijirca region, Cerro de Pasco, Peru, with the goal of optimizing the estimation and classification of mineral resources to improve mining plans and reduce associated risks. This process involves a thorough analysis of geological and geochemical data obtained from diamond drilling, where geostatistical techniques play a fundamental role. The study area is characterized by complex geology, with mineralized bodies that exhibit pronounced folds, making precise resource estimation challenging. The implementation of dynamic anisotropy has been key to addressing this complexity, as it allows for adjusting the direction of search ellipsoids based on the geological characteristics of the deposit, improving the accuracy of grade interpolation. The 3D geological model developed using Leapfrog Geo software has enabled a precise representation of the interpretation of lithological geometry and mineralized bodies. This model is validated both visually and quantitatively, ensuring that the interpretations are consistent with the observed geology and available data.

The resource estimation is classified into three categories: Measured, Indicated, and Inferred, depending on the level of confidence. Measured resources are the most reliable, while Inferred resources present greater uncertainty due to limited geological information. Additionally, for greater reliability, resources in areas where QAQC (Quality Assurance and Quality Control) results are null or deficient undergo a category downgrade, meaning Measured becomes Indicated, and Indicated becomes Inferred.

A more accurate and reliable estimation of mineral resources has been achieved. Model validation is an essential step in this process, as it ensures that the estimation model is suitable for mining planning and strategic decision-making, allowing mine management to make better-informed decisions and reduce risks associated with mineral resource exploitation.

Keywords — Geostatistics, dynamic anisotropy, resource estimation, 3D modeling.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vii
Introducción	xix
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	2
1.3 Objetivos del estudio	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivo específico.....	3
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....	4
2.1 Marco teórico	4
2.2 Marco conceptual.....	9
2.2.1 Anisotropía dinámica.....	9
2.2.2 Anisotropía geométrica	9
2.2.3 Anisotropía zonal	10
2.2.4 Efecto Pepita (Nugget Effect).....	11
2.2.5 Estacionariedad (Stationarity).....	12
2.2.6 Geoestadística (Geostatistics).....	12
2.2.7 Inverso a la Distancia (IDW).....	12
2.2.8 Kriging (Kriging).....	13
2.2.9 Meseta y rango.....	14
2.2.10 Nearest-Neighbour (NN).....	15
2.2.11 Recursos minerales inferidos.....	15
2.2.12 Recursos minerales indicados.....	16
2.2.13 Recursos minerales medidos	16
2.2.14 Semivariograma.....	16

2.2.15 Validación del modelo geológico	17
2.2.16 Validación en la estimación	17
2.2.17 Variable Regionalizada (V.R.)	17
2.3 Vocabulario de términos geoestadísticos	18
2.3.1 Box Plot.....	18
2.3.2 Compositación.	18
2.3.3 EDA (Análisis Exploratorio de Datos).	18
2.3.4 Histograma.....	18
2.3.5 Interpolación.....	18
2.3.6 Outlier.	18
2.3.7 Probability Plot.	18
2.3.8 Wireframe.	19
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	20
3.1 Características del área de estudio	20
3.1.1 Ubicación.	20
3.2 Marco geológico.....	21
3.2.1 Geología regional.....	21
3.2.2 Geología local	23
3.3 Modelamiento geológico 3D.....	32
3.3.1 Modelo genético.....	33
3.3.2 Modelo geológico empleando el software Leapfrog Geo.	36
3.3.3 Elaboraciones envolventes de ley (Mantos mineralizados).....	61
3.4 Estimación de recursos minerales.....	76
3.4.1 Pasos para la estimación de recursos minerales.....	76
3.4.2 Base de datos de recursos.....	76
3.4.3 Análisis Exploratorio de Datos (EDA).	77
3.4.4 Análisis y tratamiento de altos erráticos (Capping).	84
3.4.5 Compositación.	91

3.4.6	Análisis de continuidad espacial (variografía).....	93
3.4.7	Modelo de bloques.....	98
3.4.8	Anisotropía dinámica.....	99
3.4.9	Estimación de las leyes.....	100
3.4.10	Validación de la estimación.....	102
3.4.11	Asignación de la densidad.....	120
3.4.12	Clasificación de recursos minerales.....	122
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados.....		134
4.1	Reporte de recursos minerales.....	134
4.2	Resultados de la reconciliación.....	135
4.2.1	Reconciliación Subterránea (UG).....	136
4.2.2	Reconciliación Tajo Abierto (OP).....	138
4.3	Análisis de sensibilidad por Cut-Off.....	138
Conclusiones.....		141
Recomendaciones.....		143
Referencias bibliográficas.....		144

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Muestra los datos del collar.....	37
Tabla 2 : Muestra los datos de la tabla Survey.....	37
Tabla 3 : Muestra los datos de la tabla Assay	38
Tabla 4 : Muestra los datos de la tabla litología	39
Tabla 5 : Muestra los límites del proyecto	40
Tabla 6 : Muestra los datos de la tabla litología	46
Tabla 7 : Muestra las litologías modeladas	48
Tabla 8 : Muestra la validación de las unidades modeladas.....	49
Tabla 9 : Muestra los sondeos por campañas de perforación	77
Tabla 10: Muestra la definición de dominios de estimación.....	77
Tabla 11: Muestra la estadística básica de los datos por dominio.....	78
Tabla 12: Muestra los valores de capping por cada dominio de estimación	89
Tabla 13: Muestra la estadística después de aplicar el capping.....	90
Tabla 14: Muestra la estadística después de compositor	92
Tabla 15: Muestra el resumen de los parámetros del variograma por dominio.....	98
Tabla 16: Muestra los límites y tamaño de bloques del modelo	99
Tabla 17: Muestra los parámetros de interpolación por dominio	100
Tabla 18: Muestra los sesgos de la estimación por OK vs NN	110
Tabla 19: Muestra los datos de densidad que se asigna al modelo de bloques	120
Tabla 20: Muestra los valores de producción del tajo abierto y la subterránea	123
Tabla 21: Muestra el resumen de las estadísticas a diferente malla de perforación zona de Zinc	124
Tabla 22: Muestra el resumen de las estadísticas a diferente malla de perforación zona de Cu	124
Tabla 23: Muestra los criterios para la clasificación de riesgo por QAQC	126
Tabla 24: Muestra los rangos aceptables para los controles de QAQC.....	127

Tabla 25: Muestra los rangos para asignar los puntajes de QAQC.....	127
Tabla 26: Muestra el valor del riesgo de acuerdo con los puntajes de QAQC.....	128
Tabla 27: Muestra los criterios para categorizar los recursos minerales.....	129
Tabla 28: Muestra el criterio de degradación de la categoría por riesgo de QAQC.....	129
Tabla 29: Se muestra los parámetros usados para la evaluación del RPEE.....	132
Tabla 30: Muestra las recuperaciones metalúrgicas utilizadas para la evaluación del RPEEE.....	133
Tabla 31: Muestra el reporte de Recursos Minerales para el Tajo Abierto de Zn-Pb.....	134
Tabla 32: Muestra el reporte de Recursos Minerales para el Tajo Abierto de Cu.....	134
Tabla 33: <i>Muestra el reporte de Recursos Minerales para el Subterránea (UG)</i>	134
Tabla 34: Muestra los resultados de la reconciliación por años. Factor F1.....	136
Tabla 35: Muestra los resultados de la reconciliación por años. Factor F3.....	136
Tabla 36: Muestra los resultados de la reconciliación por meses del año 2023. Factor F1.....	137
Tabla 37: Muestra los resultados de la reconciliación por meses año 2023. Factor F3.	137
Tabla 38: Muestra los resultados de la reconciliación de Tajo Abierto por años. Factor F1.....	138

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Muestra la dirección de anisotropía geométrica	9
Figura 2 : Muestra la anisotropía zonal del variograma.....	10
Figura 3 : Muestra la anisotropía zonal de un yacimiento sedimentario	11
Figura 4 : Muestra el efecto pepita del variograma	12
Figura 5 : Muestra las partes del variograma, efecto pepita, meseta y rango.....	14
Figura 6 : Muestra la clasificación de recursos y reservas minerales	15
Figura 7 : Ubicación de la mina El Brocal en Pasco, Perú.....	20
Figura 8 : Geología y principales centros mineros en el sector de Cerro de Pasco.....	22
Figura 9 : Arcos magmáticos del cuadrángulo de Cerro de Pasco (22-k).....	23
Figura 10: Muestra la geología local del Yacimiento Colquijirca.....	27
Figura 11: Correlación de las Columnas Estratigráficas de la zona de Tajo Colquijirca, Smelter y Marcapunta, a través de levantamiento en campo y sondajes Brocal.....	28
Figura 12: Muestra el mapa geológico estructural del Tajo Colquijirca.....	30
Figura 13: Presenta el diagrama de mineralización del Tajo Norte	32
Figura 14: Muestra el modelo genético de la mina El Brocal.....	35
Figura 15: Vista 3D de los datos	40
Figura 16: Muestra los límites del proyecto en 3D	41
Figura 17: Interpretación geológica de la litología en 2D.....	42
Figura 18: Interpretación geológica de la litología en 2D.....	42
Figura 19: Muestra la importación de datos a Leapfrog Geo.....	43
Figura 20: Muestra la importación de las tablas a Leapfrog Geo	43
Figura 21: Muestra la importación de las secciones en 2D	44
Figura 22: Muestra la georreferenciación de la interpretación en 2D	45
Figura 23: Muestra la importación de las secciones geológicas 2D	45
Figura 24: Muestra la secuencia las unidades modeladas con el método estratigráfico..	47

Figura 25: Muestra la secuencia las unidades modeladas con método intrusión	48
Figura 26: Muestra el modelo Litológico en 3D y las secciones para la validación visual	50
Figura 27: Sección AA´, se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.....	51
Figura 28: Sección BB´, se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.....	52
Figura 29: Sección CC´, se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.....	53
Figura 30: Sección DD´, se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.....	54
Figura 31: Sección EE´, se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.....	55
Figura 32: Sección FF´, se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.....	56
Figura 33: Sección GG´, se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.....	57
Figura 34: Sección HH´, se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.....	58
Figura 35: Sección II´, se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada	59
Figura 36: Sección JJ´, se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.....	60
Figura 37: Muestra ejemplos de los mantos de Alta Ley (HG) de Cobre, Plata y Zinc.....	61
Figura 38: Muestra la curva de probabilidad acumulada de Cobre.....	62
Figura 39: Muestra los sólidos generados con indicadores de ley de Cobre	62
Figura 40: Sección AA' Muestra los sólidos modelados en sección y su correspondencia con los sondajes	63
Figura 41: Muestra la curva de probabilidad acumulada de Zinc	64

Figura 42: Muestra los sólidos de media y alta ley de Zn.....	65
Figura 43: Muestra los sólidos modelados en sección y su correspondencia con los sondajes.....	66
Figura 44: Muestra la curva de probabilidad acumulada de Plomo	67
Figura 45: Muestra los sólidos de media y alta ley de Pb.....	68
Figura 46: Muestra los sólidos modelados en sección y su correspondencia con los sondajes.....	69
Figura 47: Muestra la curva de probabilidad acumulada de Plata	70
Figura 48: Muestra los sólidos de media y alta ley de Ag.....	71
Figura 49: Muestra los sólidos modelados en sección y su correspondencia con los sondajes	72
Figura 50: Muestra la curva de probabilidad acumulada del Oro	73
Figura 51: Muestra los sólidos de media y alta ley de Au.....	74
Figura 52: Muestra los sólidos modelados en sección del manto de Oro y su correspondencia con los sondajes.....	75
Figura 53: Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley media de Cu en el Calera Medio Favorable.....	79
Figura 54: Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley alta de Cu en el Calera Medio Favorable.....	79
Figura 55: Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley media de Cu en el Conglomerado Shuco.....	80
Figura 56: Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley alta de Cu en el Conglomerado Shuco.....	80
Figura 57: Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley media de Zn en el Calera Medio Favorable	81
Figura 58: Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley alta de Zn en el Calera Medio Favorable	81

Figura 59: Muestra el análisis de contacto para el dominio de media y alta ley de Cu en el Calera Medio Favorable. Nótese un contacto duro	82
Figura 60: Muestra el análisis de contacto para el dominio de media y alta ley de Cu en el Conglomerado Shuco. Nótese un contacto duro.....	83
Figura 61: Muestra el análisis de contacto para el dominio de media y alta ley de Zn en el Calera Medio Favorable. Nótese un contacto duro	84
Figura 62: Muestra el análisis de capping para el dominio de media ley de Cu en el Calera Medio Favorable	85
Figura 63: Muestra el análisis de capping para el dominio de alta ley de Cu en el Calera Medio Favorable	85
Figura 64: Muestra el análisis de capping para el dominio de media ley de Cu en el Conglomerado Shuco.....	86
Figura 65: Muestra el análisis de capping para el dominio de alta ley de Cu en el Conglomerado Shuco.....	86
Figura 66: Muestra el análisis de capping para el dominio de media ley de Zn en el Calera Medio Favorable	87
Figura 67: Muestra el análisis de capping para el dominio de alta ley de Zn en el Calera Medio Favorable	88
Figura 68: Muestra el análisis de los diferentes tamaños de compósitos para Cobre	91
Figura 69: Muestra el variograma del Cu en el Conglomerado Shuco	94
Figura 70: Muestra el variograma del Zn en el Calera Medio Favorable	95
Figura 71: Muestra el variograma de ley de Ag en el Conglomerado Transicional Shuco .	96
Figura 72: Muestra el variograma de Au en el Calera Medio Favorable.....	97
Figura 73: Muestra la diferencia de la orientación de los elipsoides con anisotropía dinámica	99
Figura 74: Muestra la validación visual de Cobre en el Conglomerado Shuco	103
Figura 75: Muestra la validación visual de Cobre en el Calera Medio Favorable.....	104
Figura 76: Muestra la validación visual de la Plata en el Conglomerado Shuco.....	105

Figura 77: Muestra la validación visual de la Plata en el Calera Medio Favorable	106
Figura 78: Muestra la validación visual del Zinc en el Calera Medio Favorable.....	107
Figura 79: Muestra la validación visual del Oro en el Conglomerado Shuco	108
Figura 80: Muestra la validación visual del Plomo en el Calera Medio Favorable	109
Figura 81: Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley media Cu en el Conglomerado Shuco.....	112
Figura 82: Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley alta Cu en el Conglomerado Shuco.....	113
Figura 83: Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley media Cu en el Calera Medio Favorable	114
Figura 84: Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley alta Cu en el Calera Medio Favorable	115
Figura 85: Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley media de Ag en el Calera Medio Favorable	116
Figura 86: Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley alta de Ag en el Calera Medio Favorable.....	117
Figura 87: Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley media de Au en el Conglomerado Shuco	118
Figura 88: Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley media de Au en el Conglomerado Shuco	119
Figura 89: Muestra el límite del tajo abierto (Tajo Norte).....	123
Figura 90: Muestra el análisis de límite de confianza para el Tajo Abierto Zn	125
Figura 91: Muestra el análisis de límite de confianza para la Subterránea Cu.	125
Figura 92: Muestra la distribución del riesgo por QAQC por zonas	129
Figura 93: Muestra la categoría considerando solo espaciamiento de sondajes	130
Figura 94: Muestra la categoría después de la degradación por riesgo de QAQC.....	131
Figura 95: Muestra la Curva Tonelaje-Ley para los Recursos Medidos, Indicados e Inferidos del Tajo Abierto en la zona de Zinc	139

Figura 96: Muestra la Curva Tonelaje-Ley para los Recursos Medidos, Indicados e Inferidos del Tajo Abierto en la zona de Cobre	139
Figura 97: Muestra la Curva Tonelaje-Ley para los Recursos Medidos, Indicados e Inferidos de Subterránea en la zona de Cobre	140

Introducción

El presente Trabajo en su Capítulo I introduce la necesidad de optimizar la estimación y categorización de recursos minerales en la mina El Brocal para reducir los riesgos en los planes de minado. El desafío principal radica en la complejidad geológica de la zona, caracterizada por mantos mineralizados con plegamientos pronunciados. Para abordar esto, se requiere la implementación de técnicas avanzadas como la anisotropía dinámica.

En el Capítulo II titulado Marcos Teórico y Conceptual, se establece la base geológica y geoestadística del estudio. Geológicamente, el yacimiento es de tipo Cordillerano (relacionado con pórfidos de Cu) y está alojado principalmente en la Formación Calera, presentando un zonamiento (Cu interno, Zn-Pb-Ag externo). Conceptualmente, se definen herramientas clave como la Anisotropía Dinámica (ajusta el elipsoide de búsqueda), la Geoestadística, el Kriging (mejor estimador lineal insesgado), la compositación y los criterios de clasificación de recursos (Medido, Indicado e Inferido).

El Capítulo III llamado Desarrollo del Trabajo de Investigación, describe la metodología técnica. El Modelamiento Geológico 3D se realizó con Leapfrog Geo, logrando una validación cuantitativa de la litología superior al 95%. La estimación se llevó a cabo utilizando Vulcan con Kriging Ordinario y la implementación de Anisotropía Dinámica. El proceso incluyó Análisis Exploratorio de Datos (EDA), capping (acotamiento de leyes altas), y compositación de muestras a 2 metros. La Clasificación de Recursos se definió no solo por el espaciamiento de los sondajes, sino también por el riesgo de QAQC, aplicando la degradación de la categoría si los resultados de control de calidad eran deficientes.

Su Capítulo IV titulado Análisis y Discusión de Resultados, presenta el Reporte Final de Recursos Minerales clasificados (Tajo Abierto Zn-Pb, Tajo Abierto Cu y Subterránea). La Validación del Sesgo Global (OK vs NN) resultó en diferencias menores al $\pm 10\%$ en la mayoría de los dominios. Los resultados de la Reconciliación son una

herramienta fundamental para validar la confiabilidad, considerando un rango aceptable de desviación de $\pm 15\%$. Finalmente, el Análisis de Sensibilidad por Cut-Off (curva Tonelaje-Ley) demuestra la robustez del modelo de bloques bajo distintos escenarios económicos.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

La estimación de recursos minerales es un proceso fundamental en la minería moderna ya que permite evaluar y realizar planes de minado de larga, mediano y corto plazo con una adecuada confiabilidad. Este proceso involucra el análisis exhaustivo de datos geológicos y geoquímicos recopilados principalmente de perforaciones diamantinas, en ese sentido, el programa de QAQC permite garantizar que los datos sean consistentes, precisos y confiables para la estimación de recursos minerales.

La precisión en la estimación depende principalmente de la calidad del modelo geológico, calidad de los datos, el espaciamiento de los sondajes de perforación y el uso de métodos geoestadísticos adecuados para interpolar las leyes.

Los recursos minerales se clasifican según su nivel de confianza en tres categorías principales: Medido, Indicado e Inferido. Estas categorías reflejan la incertidumbre inherente a la estimación y variabilidad geológica, que disminuye a medida que aumenta la cantidad y calidad de los datos disponibles. De acuerdo con las normativas internacionales, como las directrices del código SK-1300, los recursos medidos representan un alto nivel de certeza, mientras que los Inferidos implican una estimación con mayor incertidumbre, lo que puede incidir en la toma de decisiones de inversión.

Además, la estimación de recursos minerales involucra el uso de modelos de variogramas, que permiten evaluar la variabilidad espacial de los datos y, por lo tanto, mejorar la precisión de los cálculos. Las técnicas como la geoestadística son esenciales en este proceso

La Unidad El Brocal-Pasco se enfrenta a desafíos en la precisión de la estimación de recursos minerales debido a la complejidad geológica y variabilidad de leyes. En ese sentido, se requiere la implementación de nuevas técnicas de interpolación de leyes como la anisotropía dinámica, debido a que los mantos mineralizados presentan plegamientos pronunciados.

1.2 Descripción del problema de investigación

La estimación de recursos minerales dentro de mantos con plegamientos ha constituido un desafío, puesto que la geoestadística en el análisis variográfico considera solo direcciones lineales. En ese sentido, es necesario aplicar técnicas como el uso de la anisotropía dinámica, que es la opción más viable para alcanzar una estacionariedad variográfica y evidencia una mayor continuidad en la interpolación de leyes en las direcciones establecidas.

En setiembre del 2015, Sociedad Minera El Brocal S.A.A. solicitó los servicios de Amec Foster Wheeler Perú S.A. para llevar a cabo la Estimación de Recursos y Reservas del Tajo Norte siguiendo las normas del JORC 2012 edition (2012 JORC Code).

Con la aplicación de herramientas geoestadísticas, se ha podido analizar el comportamiento de las leyes de zinc, plomo, cobre, plata, encontrándose valores razonables de media y coeficiente de variación que caracterizan a cada uno de ellos, lo que significa que la definición de los dominios fue aceptable.

La selección de Leapfrog Geo para el modelamiento geológico 3D, se basó en la capacidad que tiene el software para generar superficies implícitas a partir de datos dispersos, lo que permite representar de manera eficiente la compleja geometría de los mantos plegados en la Mina El Brocal.

Para la estimación de recursos, se eligió Vulcan debido a su robustez en la aplicación de técnicas geoestadísticas avanzadas, entre ellos el krigado ordinario con anisotropía dinámica, el cual es esencial para manejar la variabilidad espacial en depósitos con estructuras plegadas. Esta combinación de herramientas logra optimizar la precisión en la interpretación geológica y la estimación de leyes, cumpliendo así con los estándares requeridos para la clasificación de recursos bajo el código SK-1300.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Optimizar la estimación y la categorización de recursos minerales para reducir los riesgos en los planes de minado.

1.3.2 Objetivo específico

Elaborar un modelo geológico en 3D del depósito y aplicar técnicas geoestadísticas avanzadas para optimizar la estimación de recursos minerales, mejorando su precisión en los planes de minado.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

Los depósitos minerales del distrito de Colquijirca pertenecen a un miembro de la familia de los yacimientos relacionados a pórfidos de cobre (Cu) conocida como depósitos Cordilleranos. Este tipo de depósitos, los cuales se forman en general en las partes altas de un pórfido de Cu, se caracterizan fundamentalmente por un prominente zonamiento con partes internas dominadas por Cu y zonas externas donde Zn, Pb y Ag son los principales elementos económicamente interesantes. En el caso particular del distrito de Colquijirca, más precisamente entre los sectores de Marcapunta Norte y Colquijirca, dicho zonamiento consta a manera general de tres zonas, las cuales mineralógicamente consisten fundamentalmente de enargita en las partes internas, calcopirita en partes intermedias y esfalerita y galena en las partes externas.

El depósito de Colquijirca expone estas tres zonas. La parte más profunda del sector suroeste del Tajo Norte muestra un núcleo de forma tubular esencialmente constituido por enargita además de cantidades variables de pirita y cuarzo. Este núcleo presenta una envolvente básicamente compuesta por calcopirita y cantidades variables de tenantita además de esfalerita y galena. A su vez esta envolvente está rodeada por una zona relativamente extensa, compuesta esencialmente por esfalerita y galena. Es esta última zona, la cual está desarrollada en su mayor extensión hacia el norte del distrito, la que constituye el grueso del depósito de Colquijirca (Tajo Norte) actualmente en explotación. Hacia el sur del Tajo Norte el núcleo de enargita se prolonga por más de 2 km haciéndose más potente y ancho a medida que este se aproxima hacia el complejo volcánico de Marcapunta.

Del mismo modo la envolvente de este núcleo de enargita, y compuesto por calcopirita, tenantita, esfalerita y galena, se extiende también hacia el sur del Tajo Norte, aunque en mucho menor medida, hasta en unos 400 m a partir de la pared sur del mismo.

El sector denominado Marcapunta Norte, localizado inmediatamente al sur del Tajo Norte, constituye la extensión del depósito de Colquijirca. Este sector está compuesto por las dos zonas internas, esto es, por aquella conformada por enargita y por aquella de carácter polimetálico, es decir, de calcopirita, tenantita, esfalerita y galena. A diferencia de sectores ubicados más al sur, el sector de Marcapunta Norte se caracteriza por haber experimentado un proceso de enriquecimiento supérgeno. Este proceso ha generado cuerpos de calcosita, los cuales se han superpuesto a la zona de enargita y en menor grado a aquella polimetálica compuesta por calcopirita, tenantita, esfalerita y galena, conformando un sector de relativa complejidad mineralógica en términos sobre todo de intercrecimientos.

La estructura mineralizada del Manto Superior Central está alojada en rocas carbonatadas del Miembro Medio de la Formación Calera y configura una geometría estratiforme sub- horizontal de rumbo Norte 160° y buzamiento de 6° Norte. La estructura tiene una longitud aproximada de 520 m por un ancho de 270 m y una potencia promedio de 21 m. La ocurrencia de estructuras perpendiculares a la estratificación como cuerpos de brechas y vetas es menos común.

Mineralógicamente el Manto Superior Central consiste esencialmente de enargita, acompañada de cantidades variables de pirita. Fases menos importantes incluyen luzonita, colusita y aún de menor presencia, calcocita, tenantita, ferberita y bismutinita.

Contexto geológico.

Según Ronner Bendezú y Lluís Fontboté, (2000) en su artículo de investigación, Cordilleran Epithermal Cu-Zn-Pb-(Au-Ag) Mineralization in the Colquijirca District, determinaron que el depósito de Colquijirca pertenece a la clase de depósitos polimetálicos Cordilleranos. Los depósitos Cordilleranos en general comparten características importantes: son polimetálicos (Cu-Zn-Pb-Ag-Au), tienen un zonamiento de menas internas ricas en Cu a menas externas ricas en Zn-Pb, son ricos en sulfuros, y ocurren principalmente como rellenos de espacios abiertos y reemplazos en rocas carbonatadas. La mineralización Cordillerana en Smelter y Colquijirca se formó durante la fase tardía de

la historia hidrotermal con edades de 10.8 y 10.6 Ma, respectivamente, y es posterior al episodio epitermal de alta sulfuración de Au-(Ag) que ocurrió en el complejo volcánico de Marcapunta que se formó entre 11.1 y 11.9Ma.

Ronner Bendezú (2006) en su tesis doctoral titulada "Shallow polymetallic and precious metal mineralization associated with a Miocene diatreme-dome complex: the Colquijirca district in the Peruvian Andes", presenta una exhaustiva investigación sobre los depósitos de minerales polimetálicos y metales preciosos en el distrito de Colquijirca, Perú, particularmente en relación con el complejo volcánico de Marcapunta, un sistema de diatrema-domo Mioceno. Utilizando la técnica de datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Ronner determina que la mineralización de oro Marcapunta ocurrió entre 11.9 y 11.1 millones de años atrás. Además, la mineralización en los depósitos polimetálicos de tipo Cordillerano en Smelter y Colquijirca se formó entre 10.83 y 10.56 millones de años. Estas edades coinciden con las fases finales de la actividad hidrotermal en el distrito, sugiriendo una evolución compleja en la que las distintas mineralizaciones se formaron en etapas sucesiva.

Sistema mineral.

Bendezú & Fontboté,(2003) La mineralización de Colquijirca (Tajo Norte - Marcapunta) se emplaza dentro de los sedimentos plegados de la Formación Calera del Terciario inferior y presenta una geometría mantiforme, "concordante" a la estratificación, emplazándose preferentemente en calizas lacustrinas de la parte superior del Miembro Medio y parte inferior del Miembro Superior. La caja techo está constituida por dolomías varvadas de Calera Superior, en tanto la caja piso lo constituyen margas del Calera Medio.

En la mineralización, se puede distinguir el siguiente zonamiento:

- **TIPO I (Núcleo de cobre: Cu + Au + Ag + Bi):**

Esta mineralización está emplazada casi siempre en horizontes completamente silicificados (chert negro) y expresan el núcleo del vector mineralizador, puede dividirse en:

- **Tipo I A:**

Es la parte más interna de este núcleo y consiste esencialmente de enargita – pirita; las cuales ocurren a manera de reemplazamiento, relleno de fracturas, relleno de cavidades y como matriz en las partes de brechas de chert, menos comunes son las diseminaciones.

- **Tipo I B:**

Es la parte más externa del núcleo de cobre constituido principalmente por calcopirita y pirita. Estos ocurren a manera de venillas y como reemplazamientos masivos. Este tipo de mineralización alberga importantes valores de plata y bismuto en cantidades regulares.

- **TIPO II (Zona de Transición: Cu + Ag + Bi + Zn + Pb):**

Es la Zona intermedia, constituyéndose así en una zona compleja debido a la variedad de especies mineralógicas y a los intercrecimientos que estos presentan. La mena está constituida por calcopirita, esfalerita y galena, acompañados de caolín, dickita, baritina y en menor proporción pirita y hematita. La ocurrencia de estos minerales se da como relleno de fracturas u oquedades y como reemplazamientos masivos.

- **TIPO III (Zona de Metales Base: Zn + Pb + Ag):**

Es el halo más externo de mineralización y por su volumen, el de mayor importancia económica. Se encuentra emplazada en rocas dolomíticas y en menor proporción en niveles de chert negro. Su mineralogía está constituida por esfalerita y galena como minerales de mena, los cuales ocurren como relleno de fracturas, cavidades, diseminaciones y reemplazamientos masivos, constituyendo zonas de “roca sulfurosa”. La ganga está representada por pirita, especularita, magnetita, caolín, baritina, siderita, ankerita - dolomita y fluorita menos común; todos ellos ocurren como relleno de fracturas y cavidades.

Criterios geoestadísticos.

Alfaro (2006) en su libro Estimación de Recursos Mineros, describió una variedad de criterios geoestadísticos y de modelado geológico específicos para la estimación de recursos mineros. Estos incluyeron la selección y análisis de datos geológicos y geoquímicos relevantes, la aplicación de técnicas de interpolación espacial como kriging, la modelización de la distribución espacial de las unidades geológicas utilizando herramientas de modelado 3D como Leapfrog Geo, y la evaluación de la incertidumbre asociada a las estimaciones mediante métodos de simulación estocástica. Además, se hizo énfasis en la importancia de la validación cruzada de los modelos y en la integración de múltiples fuentes de información para mejorar la precisión y confiabilidad de las estimaciones de recursos minerales.

Tipo de modelo.

Royer, Mejía, Caumon y Collon (2015) en su libro Geomodelación 3D y 4D aplicada a la exploración de recursos minerales: una introducción, proporciona una visión detallada sobre la aplicación de los modelos en la industria minera, centrándose en el uso de modelos tridimensionales para la exploración y evaluación de recursos minerales. El objetivo principal fue introducir el uso de la geomodelación 3D en la exploración de recursos minerales, centrándose en el tipo de modelo geológico 3D en Leapfrog Geo, utilizando una metodología donde abarcó desde la adquisición de datos geológicos hasta la construcción y validación de modelos tridimensionales utilizando software especializado como Leapfrog Geo. A través de estudios de caso y ejemplos prácticos, el libro demostró la eficacia de esta herramienta en la representación precisa de la distribución espacial de los recursos minerales y su aplicación en la toma de decisiones en la industria minera. En conclusión, se destacó la importancia de la interpretación en 3D en Leapfrog Geo como una herramienta fundamental para optimizar la exploración y evaluación de recursos minerales, permitiendo una mejor comprensión de la geología del subsuelo y una toma de decisiones más informada en proyectos mineros.

2.2 Marco conceptual.

2.2.1 Anisotropía dinámica

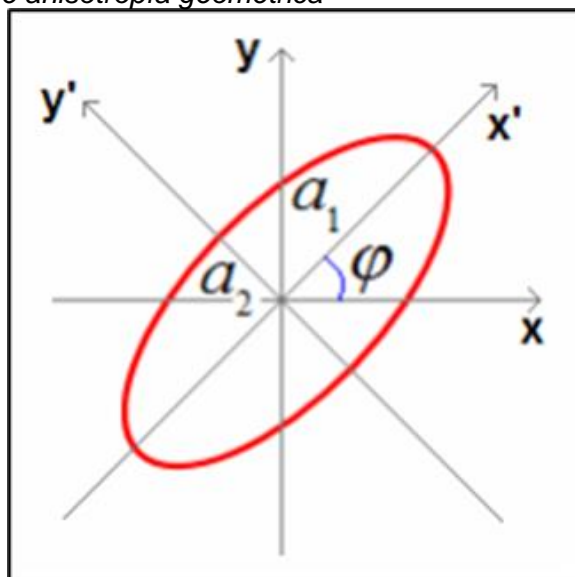
La anisotropía dinámica brinda una mayor continuidad en la interpolación ya que los elipsoides de búsqueda cambian su dirección en función a los quiebres mineralógicos o direcciones que se indiquen, en contraste si no se utilizaría la anisotropía dinámica el elipsoide de búsqueda mantendría una misma dirección.

2.2.2 Anisotropía geométrica

Para Alfaro (2006), indica que se produce cuando los diversos variogramas pueden reducirse a un variograma isótropo mediante una transformación lineal de las coordenadas. El caso más común en la práctica es cuando los variogramas presentan un mismo valor de meseta, pero diferentes alcances:

Figura 1

Muestra la dirección de anisotropía geométrica



Nota: Estimación de recursos mineros (p. 87), por Marco Alfaro, 2006. Depto. Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago, 2006.

En la figura se ha representado una anisotropía geométrica (en el caso isótropo lo anterior sería un círculo).

Sea $k = a_1/a_2 > 1$ la razón entre el alcance mayor y menor. Las fórmulas de transformación de coordenadas nos muestran que:

$$\gamma(h) = \gamma_1(|h'|)$$

En que:

$$|h'| = \sqrt{(h_x \cos\varphi + h_y \sin\varphi)^2 + k^2(h_y \cos\varphi - h_x \sin\varphi)^2}$$

φ = Es el ángulo formado entre el eje x y el eje x' de la elipse. γ_1 es el variograma de la dirección 1. $k = a_1/a_2$. En el caso de un variograma lineal con diferentes pendientes:

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

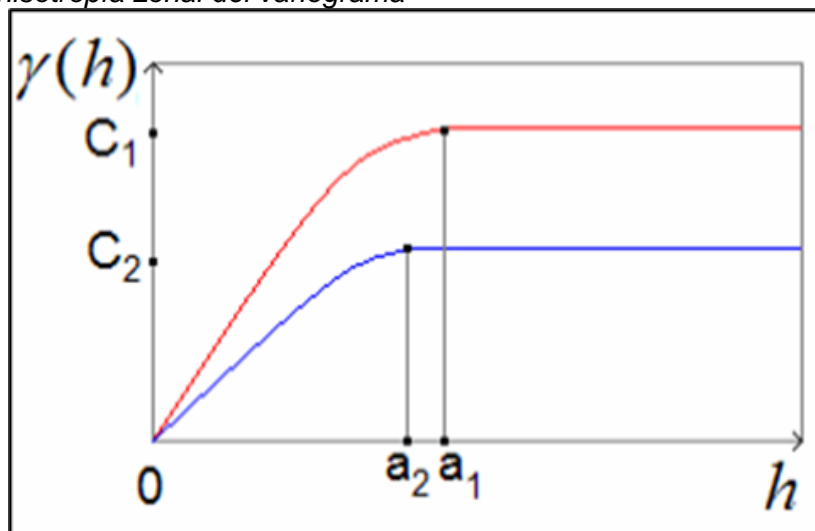
Se procede de manera análoga, utilizando la elipse de pendientes o de inversos de pendientes.

2.2.3 Anisotropía zonal

Para Alfaro (2006), en este caso la anisotropía no puede ser reducida por una transformación lineal simple de las coordenadas.

Figura 2

Muestra la anisotropía zonal del variograma



Nota: Estimación de recursos mineros (p. 89), por Marco Alfaro, 2006. Depto. Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago, 2006.

Se define entonces el modelo de anisotropía zonal como un modelo anidado (o imbricado), es decir:

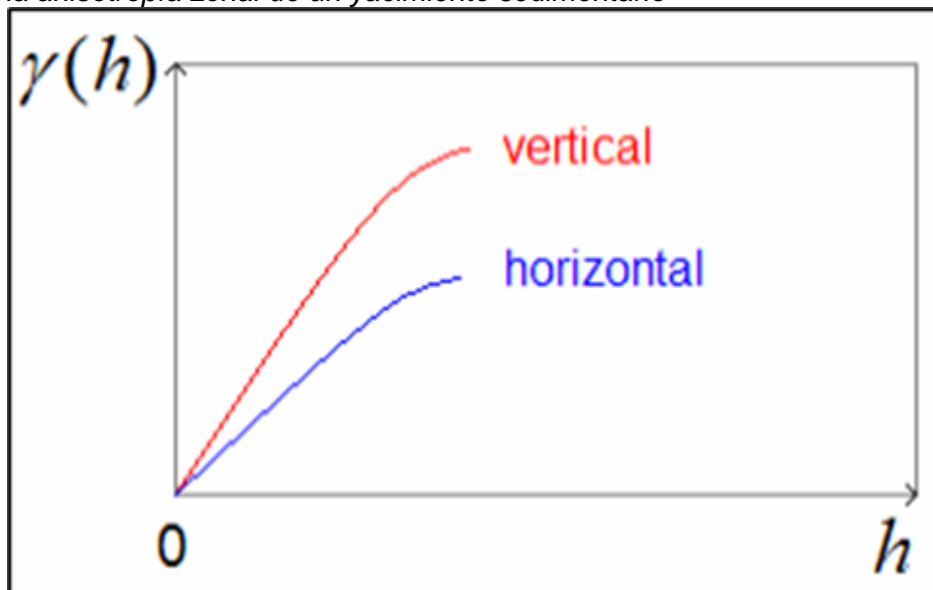
$$\gamma(h) = \gamma_1(h_1) + \gamma_2(h_2) + \dots$$

En que cada constituyente puede representar su propia anisotropía.

Por ejemplo, en un yacimiento sedimentario el variograma vertical puede ser muy diferente al variograma horizontal:

Figura 3

Muestra la anisotropía zonal de un yacimiento sedimentario



Nota: Estimación de recursos mineros (p. 90), por Marco Alfaro, 2006. Depto. Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago, 2006.

Se puede utilizar en este caso un modelo del tipo:

$$\gamma(h_x, h_y, h_z) = \gamma_1(|\vec{h}|) + \gamma_2(|\vec{h}|)$$

En que:

$$|\vec{h}| = \sqrt{h_x^2 + h_y^2 + h_z^2}$$

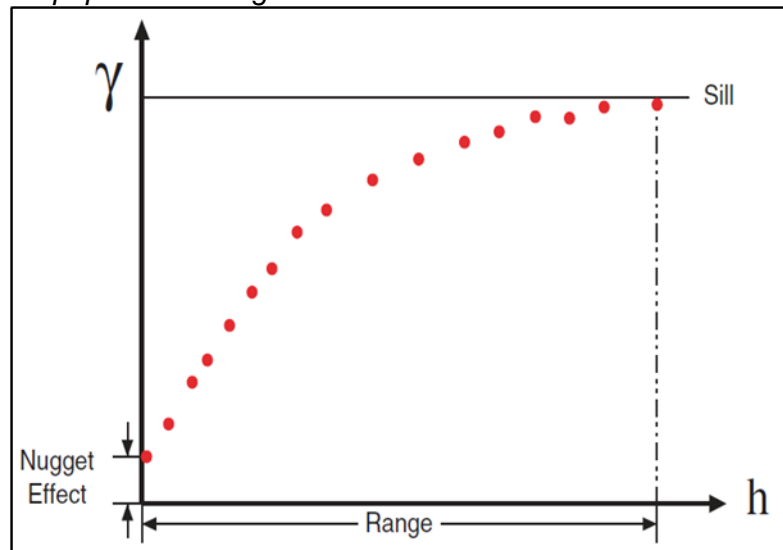
Y h_z corresponde a la dirección vertical.

2.2.4 Efecto Pepita (Nugget Effect).

Para Henao (2009) en su libro *Introducción a la Geoestadística: Teoría y Aplicación*, denotó por C_0 y representa una discontinuidad puntual del semivariograma en el origen. Puede ser debido a errores de medición en la variable o a la escala de la misma. En algunas ocasiones puede ser indicativo de que parte de la estructura espacial se concentra a distancias inferiores a las observadas.

Figura 4

Muestra el efecto pepita del variograma



Nota: Mineral Resource Estimation (p. 99), por Rossi, M. E., & Haus, R., 2017, Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2014). Mineral Resource Estimation. Dordrecht, Heidelberg, Nueva York, Londres: Springer.

2.2.5 Estacionariedad (Stationarity).

Para Guillermo, P. (2008), un dominio es estacionario cuando las leyes dentro de dicho dominio son homogéneas y no varían con la ubicación dentro de dicho dominio (es decir, que no hayan "trends").

2.2.6 Geoestadística (Geostatistics).

Según Díaz (2002), en su libro Geoestadística Aplicada, describió que, en los años 60, Matheron acuñó el término de Geoestadística. Él definió a la Geoestadística como "la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales" (Matheron, 1962).

La geoestadística es una rama de la estadística aplicada que se especializa en el análisis y la modelación de la variabilidad espacial en ciencias de la tierra. Su objeto de estudio es el análisis y la predicción de fenómenos en espacio y/o tiempo, tales como: ley de metales, porosidades, concentraciones de un contaminante, etc. Aunque el prefijo geo- es usualmente asociado con geología, la geoestadística tiene sus orígenes en la minería.

2.2.7 Inverso a la Distancia (IDW).

Guillermo, P. (2008) nos dice que consiste en asignar los pesos en función al inverso de la distancia (elevado a un poder dado) de la muestra al bloque.

Ventajas:

- Fácil de entender y de hacer.
- Toma en cuenta la disminución de la correlación con la distancia.
- Puede tomar en cuenta anisotropía, clustering, y cambio de soporte.

Desventajas

- La correlación espacial es arbitraria.
- No minimiza la varianza de estimación.
- Necesita variografía para anisotropía y cambio de soporte.

2.2.8 Krigeado (Kriging).

Díaz (2002) en su libro *Geoestadística Aplicada* describió al kriging como un término que ha sido acuñado para designar al "mejor estimador lineal insesgado" de un punto y al mejor promedio lineal móvil ponderado de un bloque.

El kriging es una técnica de estimación local que ofrece el mejor estimador lineal insesgado de una característica desconocida que se estudia. La limitación a la clase de estimadores lineales es bastante natural ya que esto significa que solamente se requiere el conocimiento del momento de segundo orden de la función aleatoria (la covarianza o el variograma) y que en general en la práctica es posible inferir a partir de una realización de la misma.

Para Guillermo, P. (2008): Simple Kriging (SK) y Ordinary Kriging (OK)

En general:

- OK da mejores resultados en áreas con bastantes datos.
- SK da mejores resultados en áreas con pocos datos.

La mayoría de los dominios geológicos son solo localmente estacionarios (OK es preferido).

SK da resultados más suavizados (smoothed) que OK.

En resumen, kriging es un buen estimador porque escoge los pesos en función a:

- Correlación espacial (definida por el variograma).
- Distribución de las muestras entre sí.

- Distribución de las muestras con respecto al bloque.
- Tamaño del bloque.

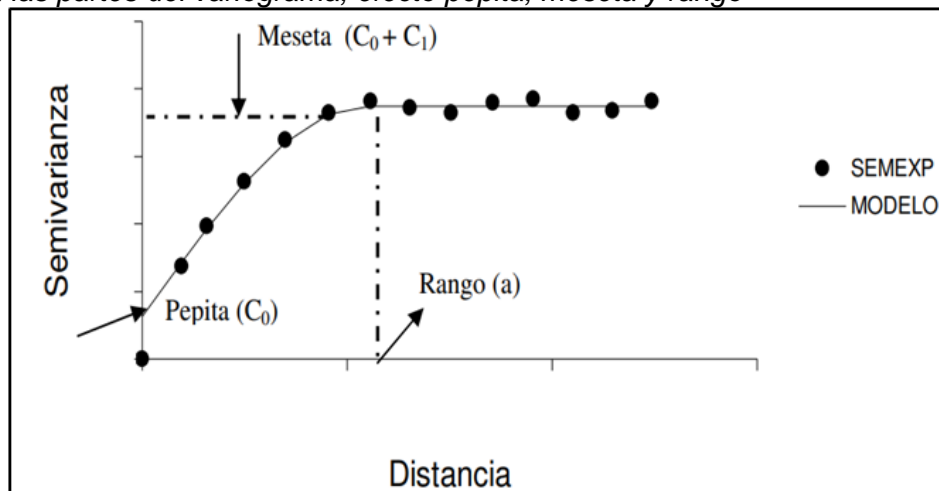
2.2.9 Meseta y rango.

Henao (2009) en su libro *Introducción a la Geoestadística: Teoría y Aplicación*, define como cota superior del semivariograma. También puede definirse como el límite del semivariograma cuando la distancia h tiende a infinito. Los semivariogramas que tienen meseta finita cumplen con la hipótesis de estacionariedad fuerte; mientras que cuando ocurre lo contrario, el semivariograma define un fenómeno natural que cumple sólo con la hipótesis intrínseca. La meseta se denota por C_1 o por $(C_0 + C_1)$ cuando la pepita es diferente de cero.

Mientras que para rango en términos prácticos corresponde a la distancia a partir de la cual dos observaciones son independientes. El rango se interpreta como la zona de influencia. Existen algunos modelos de semivariograma en los que no existe una distancia finita para la cual dos observaciones sean independientes; por ello se llama rango efectivo a la distancia para la cual el semivariograma alcanza el 95% de la meseta. Entre más pequeño sea el rango, más cerca se está del modelo de independencia espacial. El rango no siempre aparece de manera explícita en la fórmula del semivariograma.

Figura 5

Muestra las partes del variograma, efecto pepita, meseta y rango



Nota: Introducción a la Geoestadística-Teoría y Aplicación (p. 24), por Giraldo Henao R., 2009. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

2.2.10 Nearest-Neighbour (NN).

Guillermo, P. (2008), indica que el vecino más cercano (NN) consiste en asignar a cada bloque la ley del compósito más cercano. Las ventajas de este interpolador lineal son de fácil entendimiento y fácil de realizar. Sin embargo, no toma en cuenta el cambio de soporte, una sola muestra por estimado, discontinuidad en los estimados y finalmente no toma en cuenta la correlación espacial de las muestras; estas son las desventajas que presenta NN.

2.2.11 Recursos minerales inferidos.

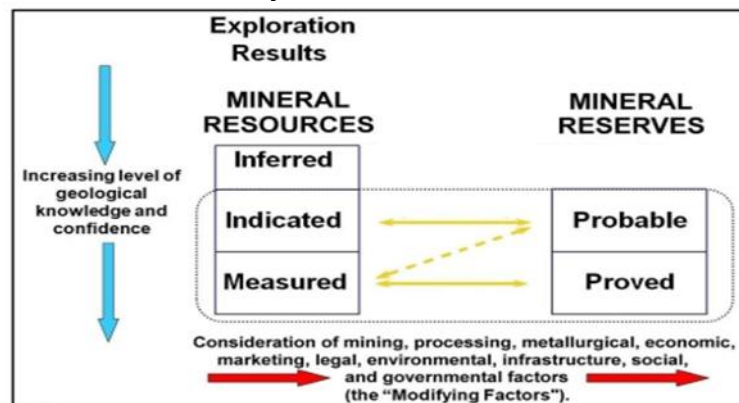
CRIRSCO (2019), en el punto 7.4 nos dice que un Recurso Mineral Inferido es aquella parte de un Recurso Mineral cuya cantidad y ley o calidad se estiman sobre la base de evidencia y muestreo geológicos limitados.

La evidencia geológica es suficiente para implicar, pero no para verificar, la continuidad geológica y de grado o calidad.

Un Recurso Inferido tiene un nivel de confianza más bajo que el que se aplica a un Recurso Mineral Indicado, no debe convertirse en una Reserva Mineral y no deben declararse parte de la Reserva Mineral. Se espera razonablemente que la mayoría de los Recursos Minerales Inferidos puedan mejorarse a Recursos Minerales Indicados con una exploración continua.

Figura 6

Muestra la clasificación de recursos y reservas minerales



Nota: CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards). (2019). International reporting template for the public reporting of exploration targets, exploration results, mineral resources and mineral reserves (November 2019) (p. 14). International Council on Mining & Metals (ICMM).

2.2.12 Recursos minerales indicados.

CRIRSCO (2019), en el punto 7.8 nos dice que un Recurso Mineral Indicado es aquella parte de un Recurso Mineral para la cual la cantidad, ley o calidad, densidades, forma y características físicas se estiman con suficiente confianza para permitir la aplicación de Factores Modificadores con suficiente detalle para respaldar la planificación minera y la evaluación de la rentabilidad económica. viabilidad del depósito.

Un Recurso Mineral Indicado tiene un nivel de confianza más bajo que el que se aplica a un Recurso Mineral Medido y sólo puede convertirse en una Reserva Mineral Probable.

La confianza en la estimación es suficiente para permitir la aplicación de parámetros técnicos y económicos, y para permitir una evaluación de la viabilidad económica.

2.2.13 Recursos minerales medidos

CRIRSCO (2019), en el punto 7.10 nos dice que un Recurso Mineral Medido es aquella parte de un Recurso Mineral para la cual la cantidad, ley o calidad, densidades, forma y características físicas se estiman con confianza suficiente para permitir la aplicación de Factores Modificadores para respaldar la planificación minera detallada y la evaluación final de la rentabilidad económica. viabilidad del depósito.

Un Recurso Mineral Medido tiene un nivel de confianza más alto que el que se aplica a un Recurso Mineral Indicado o a un Recurso Mineral Inferido. Podrá convertirse en Reserva Mineral Probada o en Reserva Mineral Probable.

La confianza en la estimación es suficiente para permitir la aplicación de parámetros técnicos y económicos y para permitir una evaluación de la viabilidad económica con un alto nivel de confianza.

2.2.14 Semivariograma.

Díaz (2002) en su libro Geoestadística Aplicada define al semivariograma, conocido también como variograma, como la herramienta central de la geoestadística. Dada una

variable regionalizada $z(\underline{x})$ que cumpla la Hipótesis Intrínseca entonces existe la función semivarianza y se define como sigue:

$$\gamma(\underline{h}) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(\underline{x}) - Z(\underline{x} + \underline{h})] = \frac{1}{2} E \left[\{Z(\underline{x}) - Z(\underline{x} + \underline{h})\}^2 \right]$$

El semivariograma es una función que relaciona la semivarianza con el vector \underline{h} conocido como "lag", el cual denota la separación en distancia y dirección de cualquier par de valores $Z(\underline{x})$ y $Z(\underline{x} + \underline{h})$.

2.2.15 Validación del modelo geológico

Para Guillermo, P. (2008), en la validación del modelo geológico considera dos aspectos importantes, la validación visual y la cuantitativa. En la primera se debe hacer secciones en bancos y verticales y ver que los sólidos estén de acuerdo con la interpretación de las secciones base y la segunda validación compara cuanto de la litología logeada se interpretó como dicha litología.

2.2.16 Validación en la estimación

Para Guillermo, P. (2008), nos dice que un modelo es validado si es que no tiene errores detectables y es internamente consistente.

La validación no es un "saludo a la bandera"; es un paso crítico en la estimación de recursos y es el proceso por el cual se determina si el modelo es adecuado para su uso o si necesita ser modificado (i.e., si se necesitan modificar parámetros del modelo y volver a realizar la interpolación).

2.2.17 Variable Regionalizada (V.R.)

De acuerdo con Díaz (2002) en su libro Geoestadística Aplicada, la Geoestadística es la aplicación de la Teoría de las Variables Regionalizadas a la estimación de procesos o fenómenos geológicos en el espacio (Matheron 1962).

Se nombra variable regionalizada $z(\underline{x})$ a la variable distribuida en el espacio de manera tal que presenta una estructura espacial de correlación.

Una definición más rigurosa matemáticamente equivalente consistiría en decir que una variable regionalizada es una variable aleatoria z definida en un punto del espacio \underline{x} .

Donde en el caso más general \underline{x} es un punto en el espacio tridimensional , es decir $\underline{x} = (x_1, x_2, x_3)$.

2.3 Vocabulario de términos geoestadísticos

2.3.1 *Box Plot*

Gráfico que permite comparar las estadísticas de distintas poblaciones en un solo gráfico.

2.3.2 *Composición.*

Compositar es regularizar el tamaño de las muestras; es decir cuando los tamaños de las muestras son diferentes o las muestras son muy pequeñas relativos al tamaño del bloque.

2.3.3 *EDA (Análisis Exploratorio de Datos).*

Consiste en la realización de elaboración de histogramas, curvas de probabilidad acumulada, análisis de contacto, diagramas de cajas (Box Plot).

2.3.4 *Histograma.*

Gráfico que muestra las frecuencias (relativas) de valores dentro de clases con amplitudes iguales, incluye las estadísticas principales.

2.3.5 *Interpolación.*

Una vez establecidas las tendencias con sus correspondientes parámetros, se utiliza el interpolador para crear las superficies y los modelos tridimensionales.

2.3.6 *Outlier.*

Es un valor atípico o excepcional en un conjunto de datos que se desvía significativamente del resto de las observaciones. Estos valores son diferentes de la mayoría de los otros datos y pueden afectar negativamente la interpretación estadística de un conjunto de datos si no se manejan adecuadamente.

2.3.7 *Probability Plot.*

Es un gráfico de probabilidad que ilustra la distribución de los datos de muestras o valores de una variable. Este gráfico es utilizado para evaluar la concordancia entre los

datos observados y una distribución teórica de probabilidad, como la normal o la log-normal.

2.3.8 Wireframe.

Es una representación tridimensional de la geometría de una estructura geológica o mineral. Esencialmente, un wireframe es una malla de líneas o bordes que define los límites y contornos de una formación geológica, como una capa de roca, un yacimiento mineral o una estructura de falla.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Características del área de estudio

3.1.1 Ubicación.

La unidad minera está ubicada en el distrito de Tinyahuarco, provincia de Cerro de Pasco, departamento de Pasco, a 289 km de Lima, a una altura aproximada de 4,250 msnm, ubicado a 10 km de la ciudad de Cerro de Pasco, entre las siguientes coordenadas: Latitud: 10°40'18" Longitud: 76°13'48".

El acceso a El Brocal es por la carretera asfaltada Lima - La Oroya - Cerro de Pasco en un recorrido aproximado de 290 Km, a partir de la cual bifurcan carreteras afirmadas a los yacimientos de Colquijirca, Marcapunta y San Gregorio. La segunda alternativa consiste en dirigirse hacia el norte desde Lima por la carretera 1N hasta llegar a Huaral. Desde Huaral, el viaje continúa hacia el noreste por la carretera 1NC, llegando a la Mina El Brocal.

Figura 7

Ubicación de la mina El Brocal en Pasco, Perú



Nota: Elaboración propia.

3.2 Marco geológico.

3.2.1 Geología regional

La unidad minera Colquijirca está situada en el cuadrángulo Cerro de Pasco (22-k) y se encuentra en una región geológicamente diversa, caracterizada por varias unidades litostratigráficas. Estas unidades pertenecen al Grupo Excelsior, Grupo Mitu, Grupo Pucará, Formación Chambará, Formación Pocobamba, Formación Calera, e incluyen rocas ígneas como batolitos, stocks subvolcánicos, domos y diatremas (Figura 8). Los cuerpos ígneos se emplazaron en diferentes períodos geológicos y se agrupan en seis eventos distintos: Carbonífero, Pérmico Superior - Triásico Inferior, Eoceno, Oligoceno, Mioceno Inferior y Mioceno Superior (Figura 8). Estas rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas están cubiertas por depósitos cuaternarios de diversa origen, naturaleza, grosor y distribución.

La mina Colquijirca se encuentra dentro de la "Cuenca Peruana Occidental", según la esquematización geotécnica de Cobbing, y ha sido afectada por múltiples fases tectónicas (El Brocal, 2021). La actividad volcánica en la región comenzó hace aproximadamente 14.13 millones de años (Ma) (Bissig et al., 2008). Una fase volcánica significativa ocurrió entre 12.4 y 12.7 Ma (Bendezú & Fontboté, 2002), marcada por el emplazamiento de domos dacíticos, seguida por la mineralización polimetálica entre 11.6 y 10.5 Ma. El resurgimiento del domo Montura ocurrió después de 10.5 Ma (INGEMMET, 2011).

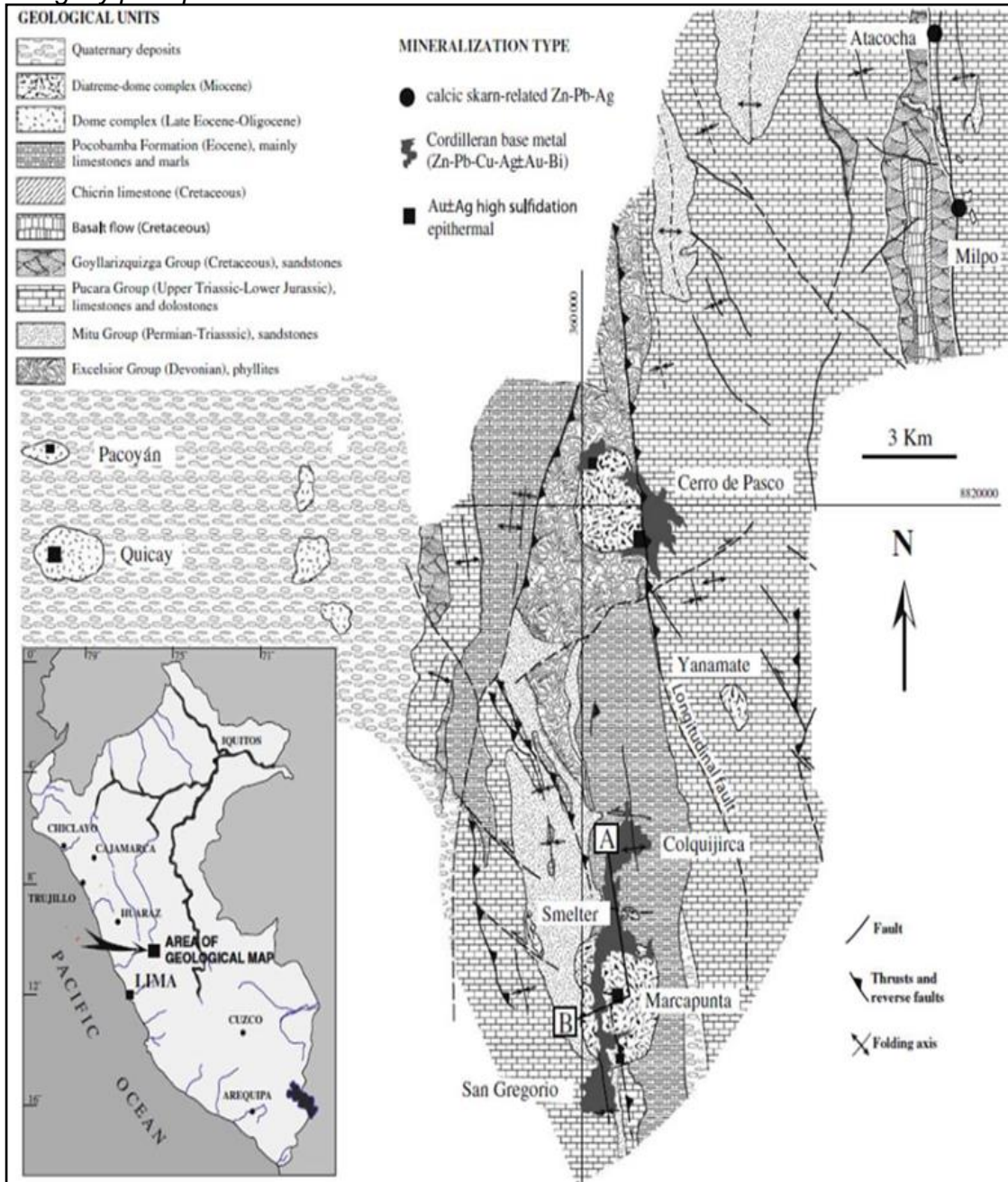
El complejo volcánico Marcapunta está ubicado entre las fallas de San Juan y la falla Cerro de Pasco, ambas con una orientación norte-sur (N-S). Estas fallas jugaron un papel clave en el emplazamiento de los domos Cerro de Pasco y Yanamate.

El borde norte del complejo volcánico Marcapunta está en contacto con la Formación Calera, una formación Eoceno-Oligoceno que sirve como roca hospedante de la mineralización en la mina Colquijirca.

El borde sur del complejo limita con la facies occidental del Grupo Pucará (Ángeles, 1999; Bendezú & Fontboté, 2002; Bendezú, 2007; Sarmiento, 2004), mientras que los bordes este y oeste están cubiertos por materiales cuaternarios (INGEMMET, 2011).

Figura 8

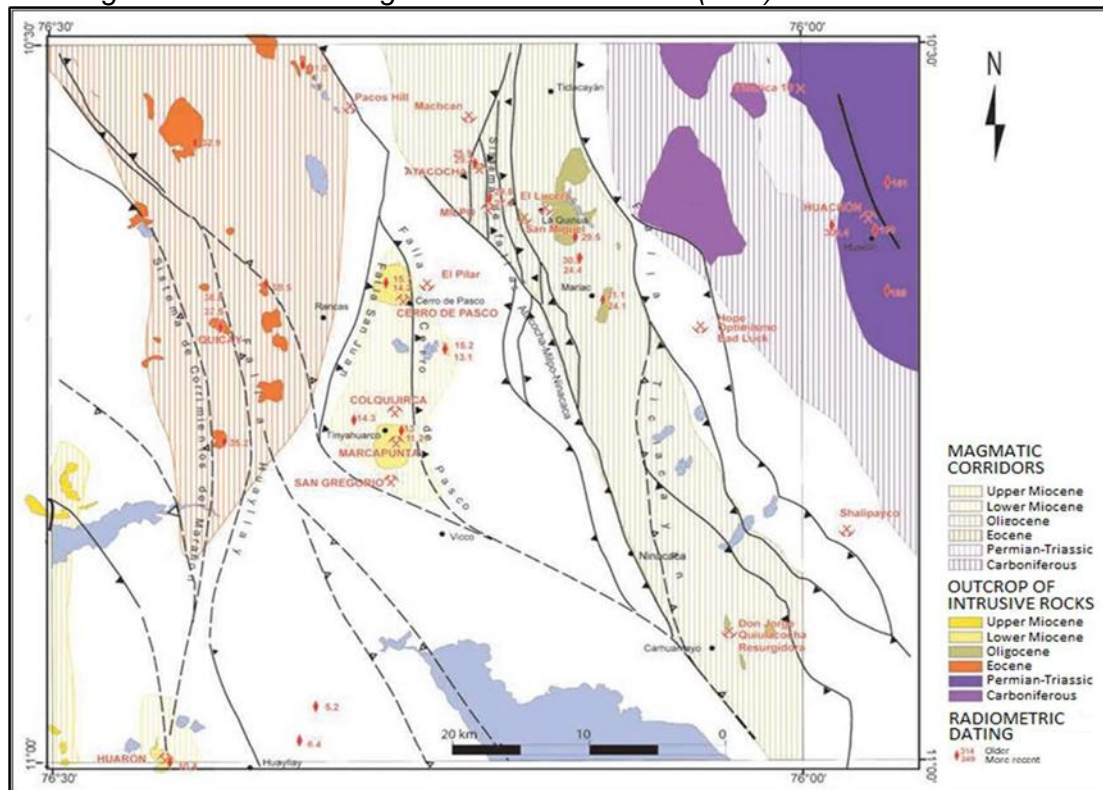
Geología y principales centros mineros en el sector de Cerro de Pasco



Nota: (Bendezú, Page, Spikings, Pecskey, & Fonboté, 2008)

Figura 9

Arcos magmáticos del cuadrángulo de Cerro de Pasco (22-k)



Nota: (INGEMMET, 2011).

3.2.2 Geología local

Según los reportes geológicos de El Brocal, el yacimiento Colquijirca, se ubica estructuralmente dentro de sinclinales y anticlinales asimétricos. Las secuencias sedimentarias que conforman estas estructuras pertenecen a la Formación Calera, de edad Terciario Inferior - Eoceno, Miembros Medio y Superior, con un espesor de 225 m, constituida principalmente por calizas, calizas margosas, dolomías y dolomías varvadas, intercaladas con horizontes arcílicos y tobáceos retrabajados, evidenciando una actividad volcánica contemporánea a la sedimentación de la formación Calera.

3.2.2.1 Litología. La litología en el distrito minero Colquijirca, de lo más antiguo a lo más reciente, es la siguiente:

Grupo Excelsior.

Es la unidad más antigua del distrito, siendo Mc Lauhglin (1924) que la denominó "Series de Excelsior", compuesto por el basamento rocoso de la región. Esta unidad aflora en alrededores de la ciudad de Cerro de Pasco y hacia el noroeste de Colquijirca. Está

constituido por filitas y pizarras de color gris a gris verdoso y niveles delgados de cuarcitas, algunos con laminación oblicua.

Grupo Mitu.

Descansa en discordancia angular sobre el Grupo Excelsior y está conformado por areniscas, limos y conglomerados de color rojo.

En el área de Colquijirca se distinguen dos unidades: La unidad inferior, compuesta por conglomerados gris oscuro a gris brunáceo, con clastos redondeados a subangulares de cuarcita y cuarzo blanco. Su potencia se estima en 400 m. La unidad superior, lo constituyen areniscas rojas con lentes de conglomerados fluviales. Su espesor estimado es de 200 m.

Grupo Pucará.

El Grupo Pucará aflora ampliamente en la parte occidental y oriental. El análisis de facies muestra cambios importantes entre estas dos zonas y están separados por la Falla Longitudinal Mayor, denominados Pucará Occidental y Pucará Oriental, al Oeste y Este de la falla respectivamente. El Grupo Pucará Occidental es roca hospedante de la mineralización en el yacimiento epitermal polimetálico de San Gregorio. El Grupo Pucará Oriental o Formación Chambará, se compone de más de 1,500 m de calizas con sílex e incluye masas estratiformes recristalizadas, posteriormente; son depósitos de plataforma carbonatada externa.

Formación Pocobamba.

La Formación Pocobamba está dividido en dos miembros: Cacuán y Shuco.

▪ El Miembro Cacuán

Aflora únicamente a lo largo de una franja N-S, desde el cerro la Chipana hasta el extremo norte del cerro Puca Ingenio, descansando en discordancia angular sobre el Pucará Occidental y localmente sobre el conglomerado Mitu. Son limonitas rojas, areniscas cuarzosas y niveles delgados de conglomerados con clastos de caliza, con más de 100 m de espesor.

- **El Miembro Shuco**

Aflora al oeste y sur de Cerro de Pasco y al nor-oeste de Colquijirca, el cual se compone de conglomerados y brechas sedimentarias con pocos lentes de limolitas y areniscas; la mayor parte de los clastos son de caliza y sílex de la Formación Chambará. El depósito es muy heterométrico (bloques de hasta los 6 m, excepcionalmente).

Formación Calera.

Esta formación aflora principalmente en alrededores de Colquijirca y cercanías de la laguna Cuchis Grande y se caracteriza por comprender depósitos volcanoclásticos, conglomerados, brechas sedimentarias, margas, calizas, dolomías y chert con un mínimo espesor de 250 m; son de ambiente lacustre. Angeles (1993, 1999), subdividió esta Formación en tres miembros: Calera inferior, medio y superior. La Formación Calera constituye la roca hospedante para la mineralización en Colquijirca y Marcapunta, tanto en el flanco Norte y parte del flanco Oeste.

- **Calera Inferior (Ti-ca-mi).** Su mejor exposición se halla en la localidad de la Calera (OSO de Laguna Cuchis Grande). Este miembro tiene una predominancia de sedimentos detríticos, cuya granulometría varía desde brechas matriz-sostenida, micro brechas, limos y lutitas en su mayor parte de procedencia volcánica; niveles de conglomerados con guijarros del Chambará y niveles delgados de tobas riolíticas. Este miembro, hospeda la “brecha mineralizada” del flanco norte del yacimiento de alta sulfuración de Marcapunta.
- **Calera Medio o Colquijirca (Ti-ca-mc).** Contiene facies de calizas gris claras; su localidad típica es Calera y la parte baja del intervalo es casi totalmente calcárea con abundancia de sílex; la parte alta contiene calizas margosas e intercalaciones de lutitas gris verdosas y verdes, probablemente derivadas de piroclastos; este intervalo supera los 55 m. En el flanco este, la unidad superior fue interceptada en el taladro CM1-512-03 con mineralización importante de Cu-Au-As y en el taladro

CM4-468-03 (Unish) con una discreta mineralización de Zn-Pb; en ambos casos no se conoce su piso.

- **Calera Superior (Ti-ca-ms).** Parece existir solamente al sur de la Laguna Cuchis Grande, sobre un terreno de materiales glaciares y fluvioglaciares. Su mejor exposición se halla en Colquijirca. Se compone de delgadas alternancias de lutitas, limolitas, arenitas, dolomías margosas, dolomías, chert y además abundante contenido de materia orgánica; su grosor supera los 150 m.

Complejo Volcánico Marcapunta.

Está emplazada en el centro del distrito minero de Colquijirca, conformado por múltiples intrusiones (domos-lava) de composición dacítica y escasa andesítica, asociados a varios eventos de brechas de explosión freatomagmáticas, brechas diatrema y diques sub volcánicos.

Las “Dacitas” presentan una textura porfirítica, conformado por fenocristales de feldespatos potásico (sanidina), cristales de cuarzo, biotita y en menor proporción hornblenda, titanita, apatito y zircón. La matriz está formada por cristales de plagioclasas. Relacionados a una fase eruptiva; se tratan de flujos piroclásticos y erupciones que representan un 20% en volumen del complejo volcánico. Las “Andesitas” conforman un cuerpo sub volcánico, que aflora en la parte este del yacimiento Marcapunta Norte, intruyendo las secuencias sedimentarias eocénicas (Grupo Pocobamba) y por relaciones de corte, emplazada, probablemente, posterior al evento de mineralización del distrito de Colquijirca. Está compuesta por plagioclasas alteradas, con escaso feldespatos potásico y escasos minerales máficos.

Cuaternario.

Depósitos coluviales, aluviales, lacustres y fluvioglaciares, caracterizado por gravas, arenas, limos en una matriz arcillosa producto de la intensa erosión que se encuentra sometida la zona.

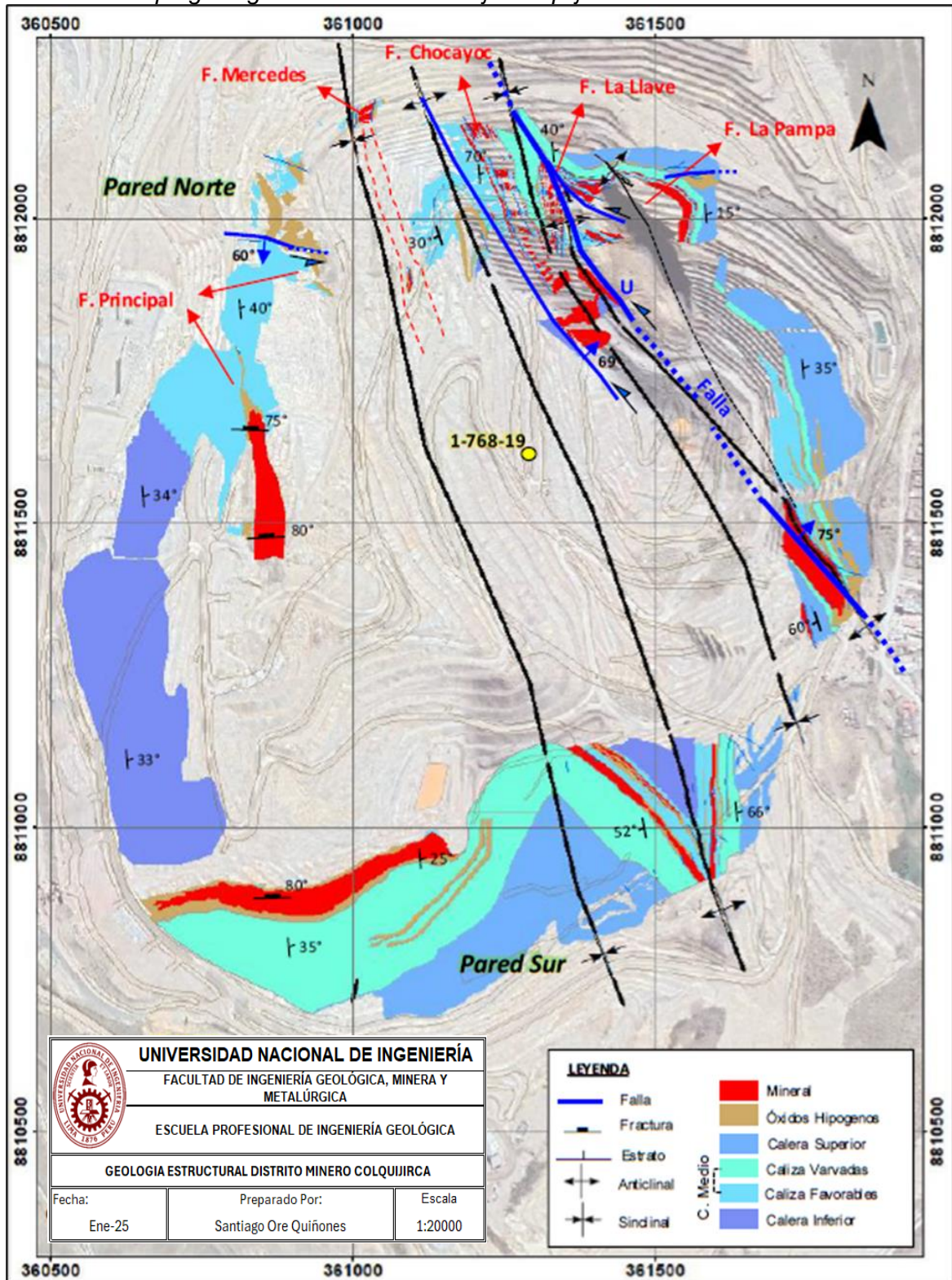
3.2.2.2 Geología estructural. Estructuralmente, la cuenca terciaria compuesta por el conglomerado Shuco y la Formación Calera ha sido controlada por la Falla Longitudinal Mayor ubicada al este del tajo; Ángeles (1993) consideró una gruesa capa activa de empuje transtensional que controló la deposición sedimentaria marina y continental desde el Triásico (Grupo Pucará), generando empujes, grabenes y horst a lo largo del tiempo. Por lo tanto, se infiere que, durante uno de estos eventos tectónicos, el Pucará fue levantado y erosionado, y que luego, en el Eoceno, fue rellenado por depósitos de abanicos aluviales y fluviales y sedimentos lacustres calcareo-detríticos de las Formaciones Pocobamba y Calera, que descansan sobre el Mitu en una discordancia erosional. La secuencia sedimentaria fue posteriormente afectada por la tectónica comprensiva del Oligoceno superior y Mioceno inferior (22.5 Ma), generando pliegues y dando lugar a los pliegues asimétricos y sinclinales reconocidos en el Tajo con una tendencia NNW y mayor compresión hacia el norte; también se identifican fallas inversas subparalelas a los estratos y fallas de bajo ángulo con ligero empuje (thrusting) de las calizas del Calera Medio reconocidas en el Flanco la Pampa, así como pequeños pliegues asimétricos e invertidos (Figura 12). De manera muy local, se identifican fallas transandinas sin relleno, excepto cristales de calcita, pero con estrías de movimiento dextral sin desplazamiento mayor, así como fallas E-O (reactivadas, fase final) rellenas con gouge y estrías de movimiento sinistral que desplazan de manera escalonada <1 m.

La Falla Longitudinal Mayor ha sido reconocida cerca de Cerro de Pasco con orientación N165 y buzamiento de 65°E, donde contacta el Pucará oriental con la Formación Pocobamba (Ángeles, 1993).

Las principales fallas longitudinales en el área minera tienen ejes casi paralelos al eje de los pliegues; también existen fallas de empuje y fallas normales locales (El Brocal, 2021). Estructuralmente, la unidad minera El Brocal presenta dos sistemas principales: El sistema de tendencia Andina, N15°-45°W y N45°-60°E. Estas últimas son manifestaciones tardías de la tectónica local que muestran una dislocación en bloques estructurales generando horst y grabenes que exponen niveles contrastantes de bloques adyacentes.

Figura 12

Muestra el mapa geológico estructural del Tajo Colquijirca



Nota: Departamento de geología Mina El Brocal

3.2.2.3 Mineralización. La mineralización en el distrito minero de Colquijirca, específicamente en el Tajo Norte, ocurre en forma de mantos, conformados por sulfuros ricos en Zn-Pb (Ag) y varían en general entre 30% y 50% el volumen de sulfuros.

En Tajo Norte - Marcapunta se emplaza dentro de los sedimentos plegados de la Formación Calera del Terciario inferior y presenta una geometría mantiforme, “concordante” a la estratificación, emplazándose preferentemente en calizas lacustrinas de la parte superior del Miembro Medio y parte inferior del Miembro Superior. La caja techo está constituida por dolomías varvadas de Calera Superior, en tanto la caja piso lo constituyen margas del Calera Medio.

En la mineralización, se puede distinguir el siguiente zonamiento:

TIPO I (Núcleo de cobre: Cu + Au + Ag + Bi):

Esta mineralización está emplazada casi siempre en horizontes completamente silicificados (chert negro) y expresan el núcleo del vector mineralizador, puede dividirse en:

▪ **Tipo I A:**

Es la parte más interna de este núcleo y consiste esencialmente de enargita – pirita; las cuales ocurren a manera de reemplazamiento, relleno de fracturas, relleno de cavidades y como matriz en las partes de brechas de chert, menos comunes son las disseminaciones.

▪ **Tipo I B:**

Es la parte más externa del núcleo de cobre constituido principalmente por calcopirita y pirita. Estos ocurren a manera de venillas y como reemplazamientos masivos. Este tipo de mineralización alberga importantes valores de plata y bismuto en cantidades regulares.

TIPO II (Zona de Transición: Cu + Ag + Bi + Zn + Pb):

Es la Zona intermedia, constituyéndose así en una zona compleja debido a la variedad de especies mineralógicas y a los intercrecimientos que estos presentan. La mena está constituida por calcopirita, esfalerita y galena, acompañados de caolín, dickita,

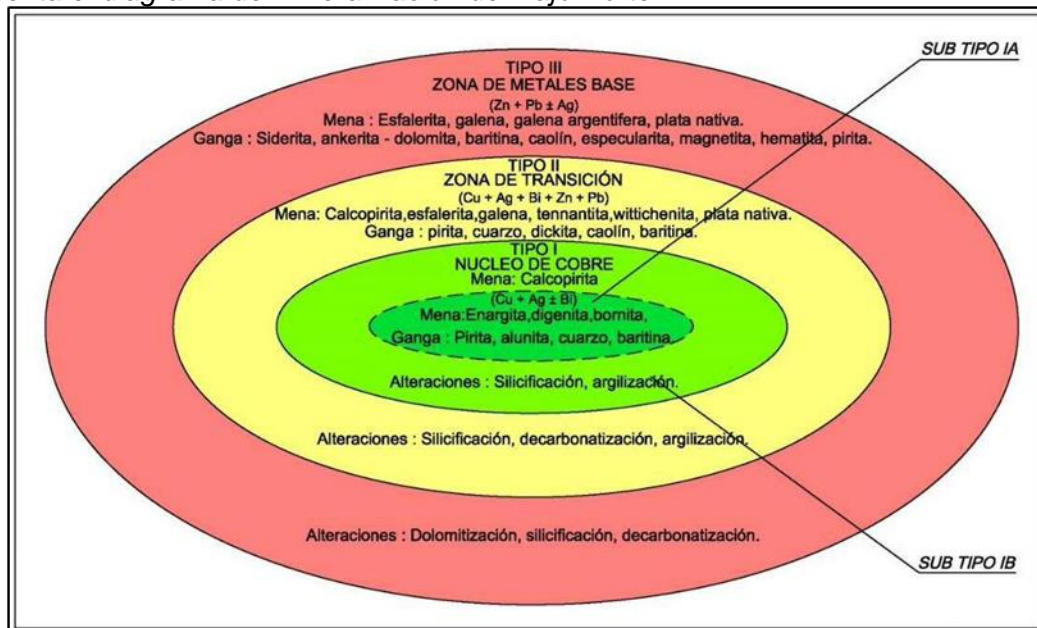
baritina y en menor proporción pirita y hematita. La ocurrencia de estos minerales se da como relleno de fracturas u oquedades y como reemplazamientos masivos.

TIPO III (Zona de Metales Base: Zn + Pb + Ag):

Es el halo más externo de mineralización y por su volumen, el de mayor importancia económica. Se encuentra emplazada en rocas dolomíticas y en menor proporción en niveles de chert negro. Su mineralogía está constituida por esfalerita y galena como minerales de mena, los cuales ocurren como relleno de fracturas, cavidades, disseminaciones y reemplazamientos masivos, constituyendo zonas de “roca sulfurosa”. La ganga está representada por pirita, specularita, magnetita, caolín, baritina, siderita, ankerita - dolomita y fluorita menos común; todos ellos ocurren como relleno de fracturas y cavidades.

Figura 13

Presenta el diagrama de mineralización del Tajo Norte



Nota: (Bendezú, & Fonboté, 2008)

3.3 Modelamiento geológico 3D.

La creación de modelos 3D con Leapfrog Geo es una actividad clave en el modelamiento geológico, ya que permite visualizar y analizar la distribución de rocas y minerales. Es importante actualizar el modelo 3D a corto plazo con los datos obtenidos en la exploración de la Mina El Brocal. Además, es crucial comparar los modelos 3D a largo,

mediano y corto plazo, y estimar los recursos a largo plazo para entender y manejar de manera efectiva los aspectos geológicos esenciales para la operación minera.

3.3.1 Modelo genético

El distrito minero de Colquijirca está ubicado sobre rocas pertenecientes a las filitas del Grupo Excelsior, areniscas y conglomerados rojos del Grupo Mitu, seguidos por calizas marinas del Grupo Pucará, y hacia la parte superior, conglomerados y facies continentales de brechas carbonatadas de la Formación Calera, de edad Eoceno-Oligoceno. Estas unidades están intruidas por el complejo volcánico Marcapunta del Mioceno medio (11.5 ± 0.4 Ma).

Debido al avance del tajo a lo largo de los años, el depósito de Colquijirca está actualmente expuesto, lo que facilita la identificación geológica de la cuenca terciaria. Se pueden encontrar pliegues asimétricos y sinclinales compuestos por rocas carbonatadas y detríticas, atribuidas a la Formación Calera del Eoceno-Oligoceno, que se consideran como el hospedante de la mineralización. El depósito también presenta intercalaciones volcanoclásticas (tefras de ceniza), lo cual es evidencia de actividad volcánica que fue contemporánea a la sedimentación.

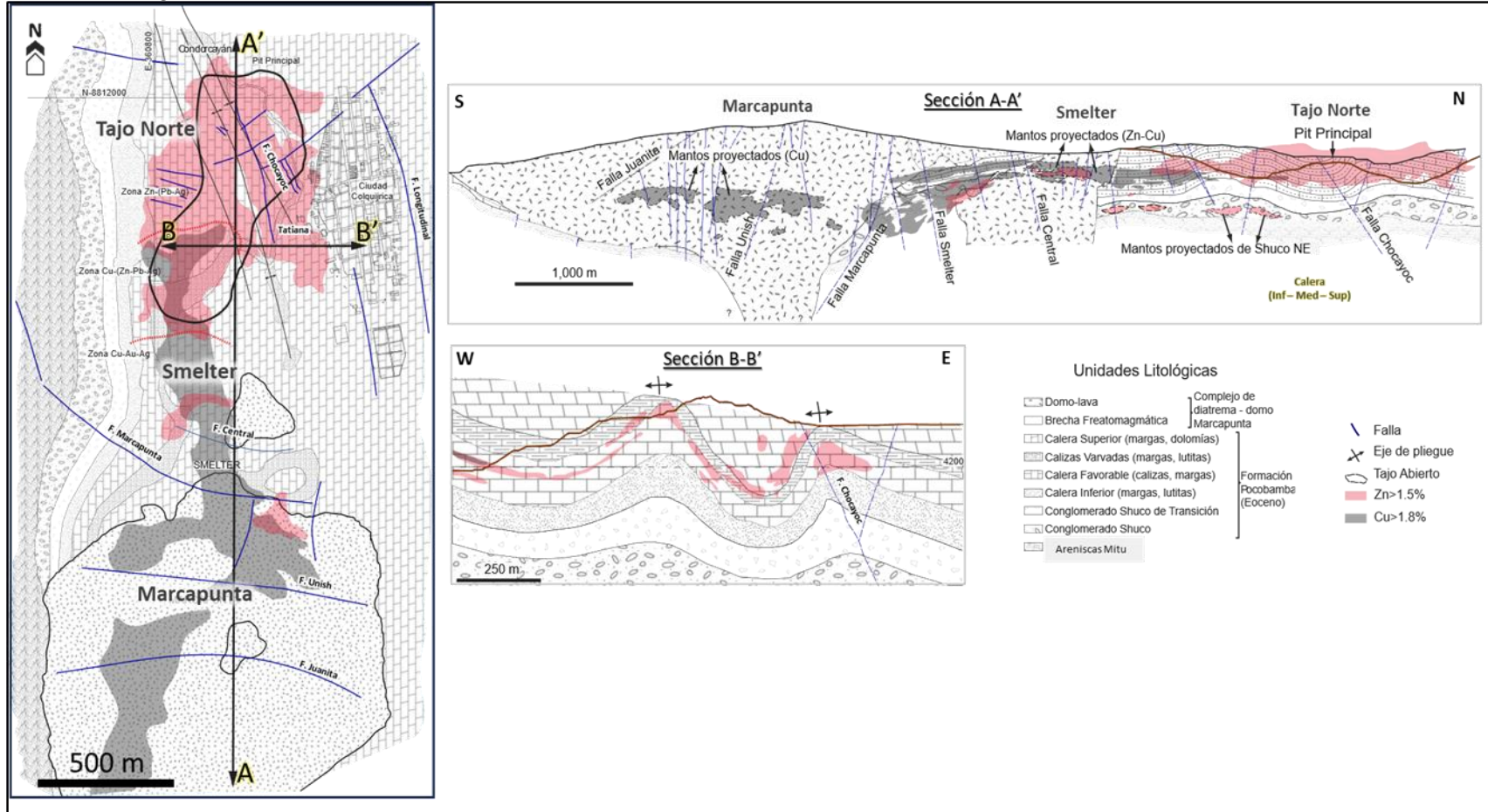
Además, con la revisión de 5 perforaciones, se ha identificado en profundidad la secuencia de conglomerados Shuco del Eoceno superior, que subyace sobre la Calera Inferior y está en contacto deposicional con las areniscas del Mitu del Pérmico-Triásico (Megard, 1978). Al sur, en Smelter y Marcapunta, la secuencia está levantada e intruida por domos y diques de composición dacítica debido al diatreme, el cual muestra una fuerte alteración argílica avanzada y se reconoce como el foco de mineralización en el distrito minero.

El complejo diatreme-domo Marcapunta, que está expuesto en el centro del distrito de Colquijirca (Sillitoe 2000; Bendezú et al. 2003; Sarmiento 2004), es uno de una serie de edificios volcánicos Miocénicos, incluidos el Cerro de Pasco y Yanamate. Consiste en múltiples intrusiones de domos de lava de composición principalmente dacítica. Las brechas de inyección y explosión, así como las capas piroclásticas, típicas de los

conductos de diatreme, se reconocen ampliamente en profundidad. La falla normal con buzamiento hacia adentro, ubicada en las áreas periféricas, sugiere que todo el edificio se colapsó, probablemente antes de los principales episodios de mineralización (Bendezú et al. 2003).

Figura 14

Muestra el modelo genético de la mina El Brocal



Nota: Modificado de Bendezú et al. 2003.

3.3.2 Modelo geológico empleando el software Leapfrog Geo.

El modelamiento geológico 3D en Leapfrog Geo, consiste en la creación y construcción de los “wireframe” de la mineralización, litología, alteración y estructura. Este esquema tridimensional es fundamental y se utiliza en la estimación de recursos minerales y deben ser validados por los geólogos de exploración y modelamiento.

Estos wireframe deben representar el modelo genético del depósito y mayor medida debe reproducir la geometría en de la estructura tanto longitudinal como lateralmente.

Para el proceso de construir wireframe utilizaremos la base de datos actualizado; incluye: Collar, Survey, Assay. El proceso de modelamiento geológico 3D en Leapfrog Geo sigue varias etapas hasta llegar a construir un sólido confiable que permita realizar una estimación razonable de los recursos minerales.

Para un modelado geológico 3D efectivo en Leapfrog Geo, es crucial tener una comprensión clara del modelo genético del depósito. En este sentido, las etapas a seguir para obtener el wireframe se detalla a continuación.

3.3.2.1 Elaboración del modelo litológico. Para la elaboración del modelo litológico se debe tener un buen entendimiento del modelo genético del yacimiento, así mismo debe contarse con interpretaciones en secciones maestras para el ajuste de los sólidos en 3D.

3.3.2.2 Recepción de las bases de datos. Consta de recopilar la información de sondajes diamantinos y canales de producción, se requiere las siguientes tablas principales: Collar, Survey, Assay, adicionalmente se debe incluir tablas de litología, alteración, mineralización, etc.

Tabla 1*Muestra los datos del collar*

HOLEID	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN	PROFUNDIDAD
1-170DDH	361055.9	8811061.9	4403.37	183.6
1-182DDH	361200.1	8811212.5	4379.02	199.75
1-186DDH	361048.5	8811262.8	4397.05	166.9
1-190DDH	361159.6	8811312.3	4378.71	195.9
1-198DDH	361196.3	8811412.4	4357.22	179.85
1-202DDH	360956.7	8811462.8	4405.04	123.25
1-206DDH	361105.6	8811512.6	4371.17	167
1-214DDH	361155.8	8811612.9	4354.6	137
1-344DDH	360484.72	8806313.15	4199.13	126
1-380DDH	360789.91	8806762.96	4283.41	350.3
1-388DDH	360693.06	8806856.11	4290.11	348.2
1-404DDH	360534.27	8807082.99	4291.16	315.95
1-408DDH	360789.47	8807112.17	4337.42	324.75
1-412DDH	360612.408	8807163.973	4314.162	339.5
1-498-18	360590.09	8808244.78	4048.99	143.3

Nota: Elaboración propia.**Tabla 2***Muestra los datos de la tabla Survey*

HOLEID	PROFUNDIDAD	DIP	AZIMUT
1-170DDH	183.6	70	270
1-182DDH	199.75	68	270
1-186DDH	166.9	72	270
1-190DDH	195.9	87	270
1-198DDH	179.85	67	270
1-202DDH	123.25	65	270
1-206DDH	167	71	270
1-214DDH	137	90	0
1-344DDH	126	90	0
1-380DDH	350.3	90	0
1-388DDH	348.2	90	0
1-404DDH	315.95	90	0
1-408DDH	324.75	90	0
1-412DDH	339.5	90	0
1-498-18	143.3	89.8	115.46
1-498-18	72.6	89.79	117.2
1-498-18	447.95	89.82	122.81

Nota: Elaboración propia.

Tabla 3*Muestra los datos de la tabla Assay*

HOLEID	FROM	TO	Muestra	Ag(oz)	Pb(%)	Zn(%)	Cu(%)	Fe(%)	As(%)	Au(g/t)
1-170DDH	100	101	A14209	0.29	0.22	0.82		4.44		
1-170DDH	101	102	A14210	0.1	0.46	1.8		15.72		
1-170DDH	102	103	A14211	0.06	0.3	1.2		18.06		
1-170DDH	103	104	A14212	0.06	0.05	0.26		3.26		
1-170DDH	104	105	A14213	0.1	0.07	0.42		3.9		
1-170DDH	105	106	A14214	0.1	0.21	0.9		8.3		
1-170DDH	106	107	A14215	0.03	0.07	0.4		4.56		
1-170DDH	107	108	A14216	0.16	0.38	0.9		6.46		
1-170DDH	108	109	A14217	0.1	0.4	1.5		17.2		
1-170DDH	109	110	A14218	0.06	0.34	1.72		17.54		
1-170DDH	110	111	A14219	0.16	0.8	3.54		21.24		
1-170DDH	111	112	A14220	1.74	3.32	8.68	0.01	7.7		
1-170DDH	112	113	A14221	0.71	2.52	7.44		6.22		
1-170DDH	113	114	A14222	0.51	2.2	5.96		23.22		
1-170DDH	114	115	A14223	0.35	1.06	2.92		38.16		
1-170DDH	115	116	A16420	0.19	0.53	4.4	0.01	26.24		
1-170DDH	116	117	A16421	0.1	0.19	0.92		6.86		

Nota: Elaboración propia.

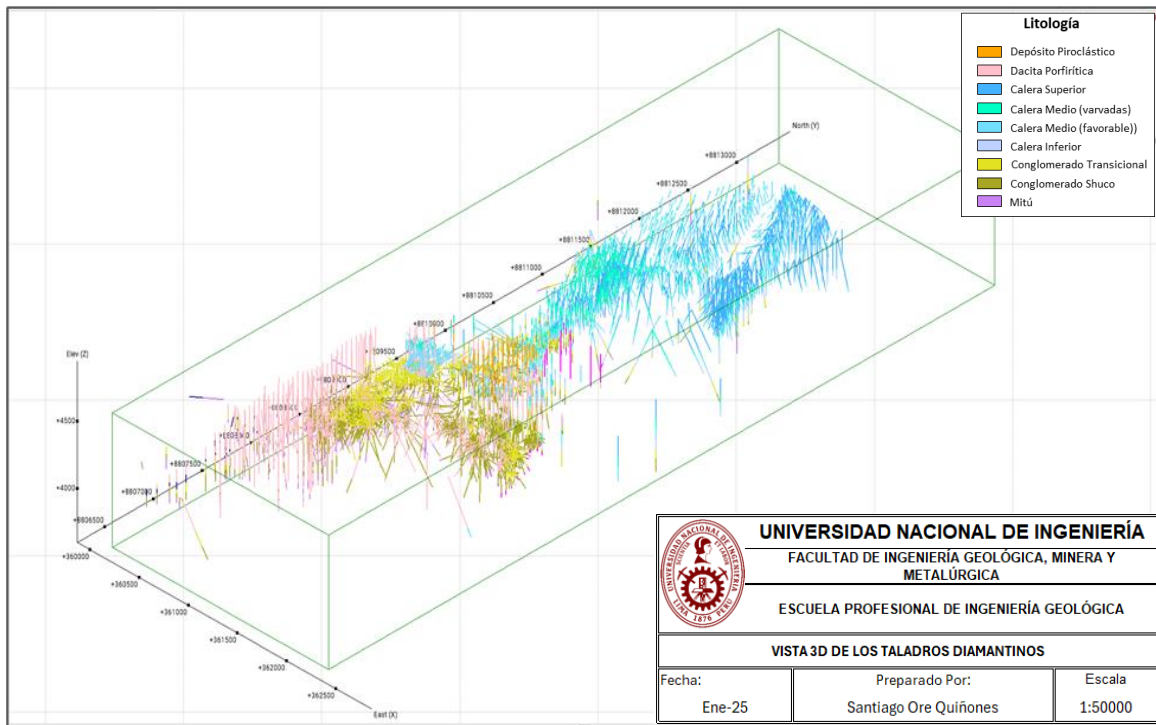
Tabla 4*Muestra los datos de la tabla litología*

HOLEID	FROM	TO	TIPO	SUBTIPO	TEXTURA	COMPOSICION	GEOINTERP	COD_LIT
1-170DDH	0	15.65	Cuaternario	Suelo	Conglomeradico		Calera Sup	Q
1-170DDH	15.65	30.6	Sedimentario	Caliza	Indiferenciado	Calcarea	Calera Sup	CLZA
1-170DDH	30.6	64.3	Sedimentario	Caliza	Indiferenciado	Calcarea	Calera Sup	CLZA
1-170DDH	64.3	94.55	Sedimentario	Lutita	Indiferenciado	Indiferenciado	Calera Med(var)	LUT
1-170DDH	94.55	125.8	Sedimentario	Dolomia	Mudstone	Indiferenciado	Calera Med(fav)	DOLO
1-170DDH	125.8	128.7	Volcánico Fragmental	Toba	Indiferenciado	Indiferenciado	Calera Med(fav)	TOBA
1-170DDH	128.7	136.5	Sedimentario	Dolomia	Mudstone	Indiferenciado	Calera Med(fav)	DOLO
1-170DDH	136.5	150.7	Sedimentario	Caliza	Indiferenciado	Calcarea	Calera Med(fav)	CLZA
1-170DDH	150.7	158.75	Sedimentario	Dolomia	Mudstone	Indiferenciado	Calera Med(fav)	DOLO
1-170DDH	158.75	158.85	Volcánico Fragmental	Toba	Indiferenciado	Indiferenciado	Calera Med(fav)	TOBA
1-170DDH	158.85	171.65	Sedimentario	Dolomia	Mudstone	Indiferenciado	Calera Med(fav)	DOLO
1-170DDH	171.65	183.6	Sedimentario	Caliza	Indiferenciado	Calcarea	Calera Med(fav)	CLZA
1-186DDH	0	2.9	Cuaternario	Coluvial	Conglomeradico		Calera Sup	Q
1-186DDH	2.9	20.65	Sedimentario	Caliza	Indiferenciado	Calcarea	Calera Sup	CLZA
1-186DDH	20.65	23.15	Sedimentario	Caliza	Indiferenciado	Calcarea	Calera Sup	CLZA
1-186DDH	23.15	23.85	Sedimentario	Limolita	Fino	Indiferenciado	Calera Sup	LIMO
1-186DDH	23.85	24.2	Sedimentario	Caliza	Indiferenciado	Calcarea	Calera Sup	CLZA
1-186DDH	24.2	27.2	Sedimentario	Margas	Fino	Bituminosa	Calera Sup	MRG
1-186DDH	27.2	30.2	Sedimentario	Caliza	Indiferenciado	Calcarea	Calera Sup	CLZA
1-186DDH	30.2	36.25	Sedimentario	Lutita	Indiferenciado	Indiferenciado	Calera Sup	LUT
1-186DDH	36.25	64.2	Sedimentario	Dolomia	Mudstone	Indiferenciado	Calera Med(var)	DOLVA
1-186DDH	64.2	66.3	Sedimentario	Lutita	Indiferenciado	Indiferenciado	Calera Med(fav)	LUT
1-186DDH	66.3	104.4	Sedimentario	Dolomia	Mudstone	Indiferenciado	Calera Med(fav)	DOLO

Nota: Elaboración propia.

Figura 15

Vista 3D de los datos



Nota: Elaboración propia.

3.3.2.3 Recepción de la topografía del proyecto. Se debe tener la información actualizada de la topografía y los límites del proyecto.

Tabla 5

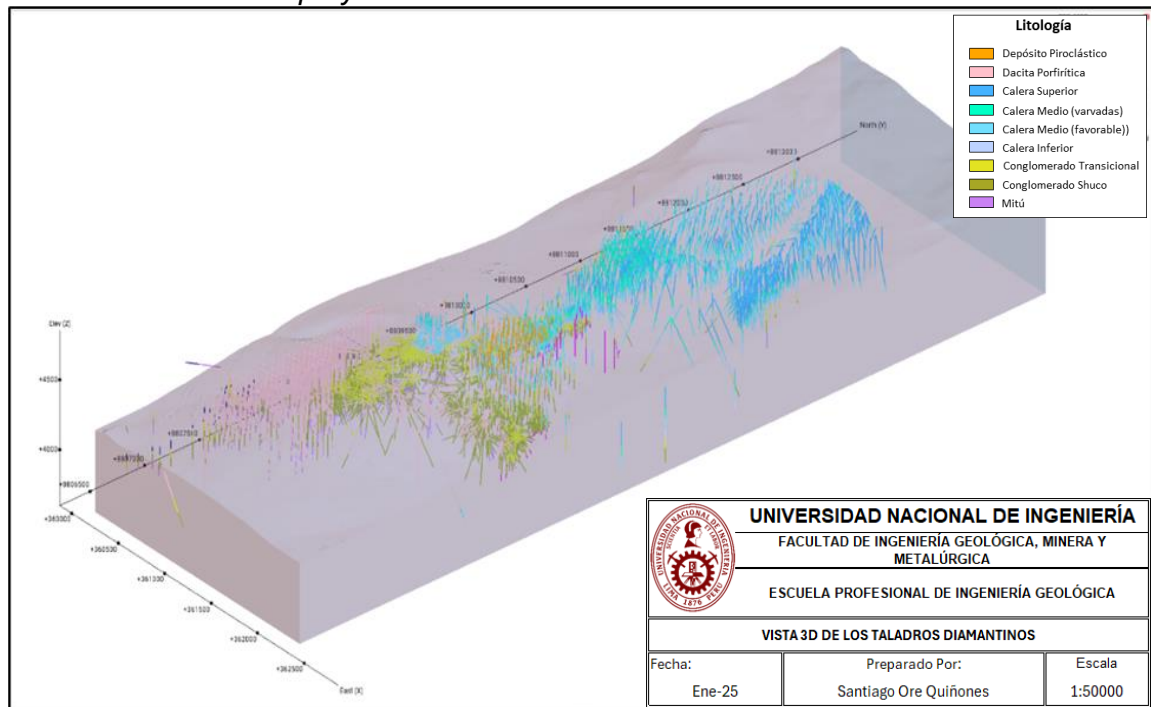
Muestra los límites del proyecto

	MÍNIMO	MÁXIMO
Este	360100	362300
Norte	8806350	8813200
<i>Elevación</i>	<i>3600</i>	<i>4600</i>

Nota: Elaboración propia.

Figura 16

Muestra los límites del proyecto en 3D



Nota: Elaboración propia.

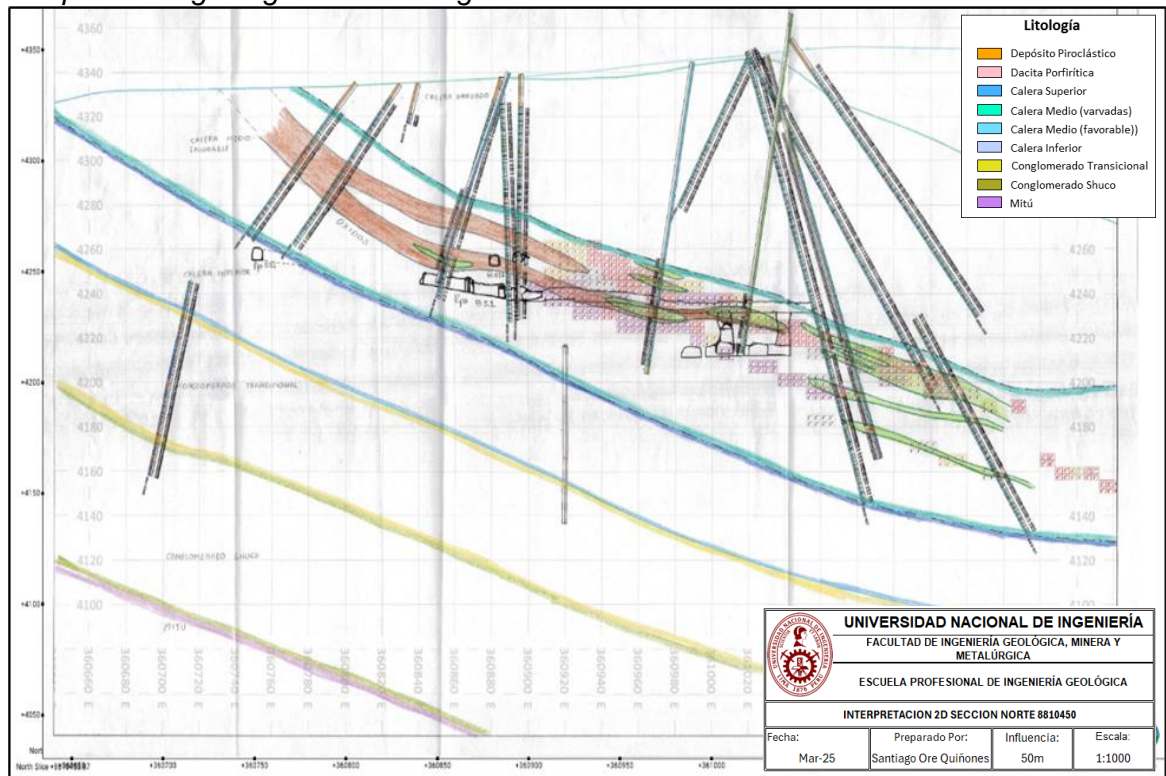
3.3.2.4 Recepción de las interpretaciones geológicas en 2D. Se requiere interpretar la geometría en 2D de la litología y de los mantos para tener un buen control de tendencias estructurales, se recopiló mapeos geológicos a escala 1K (litológico, alteración hidrotermal, mineralización y estructural), con el fin de entender las unidades litológicas presentes dentro el distrito minero Colquijirca.

Además, de la recopilación de data histórica (1993 hasta 2020) de cartografiado geológico de superficie, cartografiado en interior mina y recolección de hojas de logueo de sondajes que se realizaron durante los años de operación de la mina Colquijirca.

Con toda esta data más trabajos previos se ha logrado generar una columna litoestratigráfica y para definir controles estructurales; todo ello en conjunto, se ha utilizado para la generación de un modelo litológico y estructural del yacimiento.

Figura 17

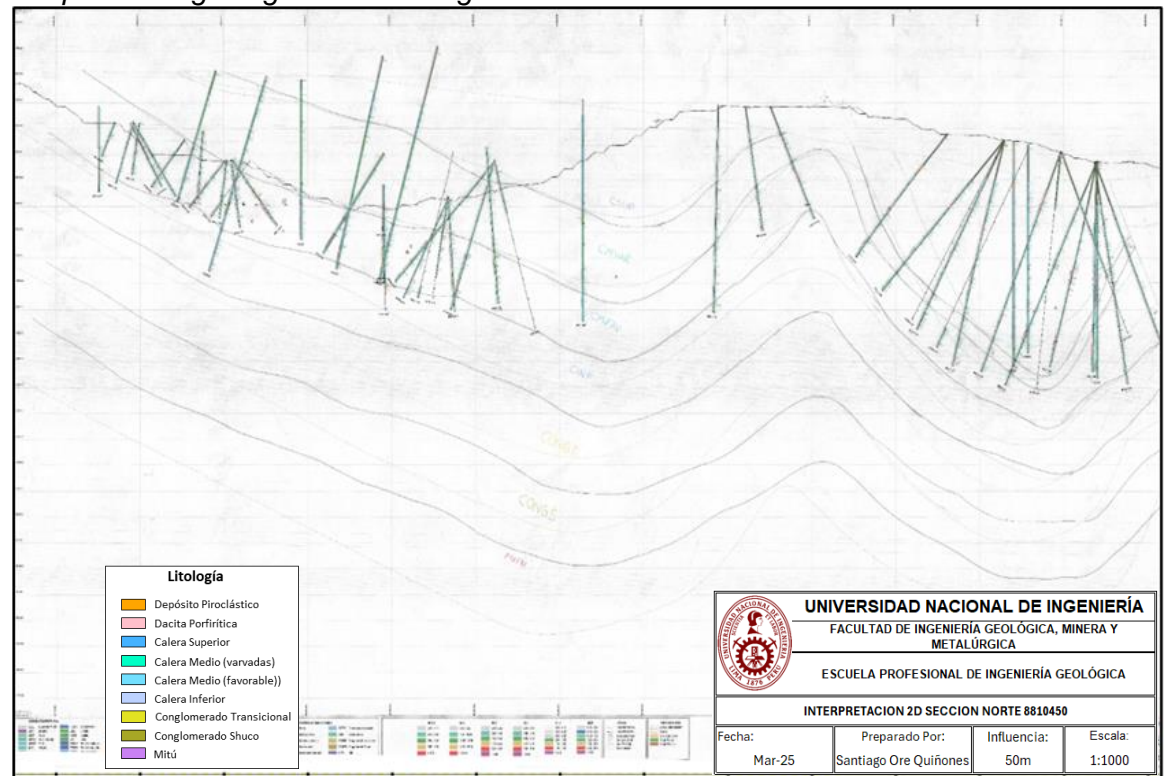
Interpretación geológica de la litología en 2D



Nota: Elaboración propia.

Figura 18

Interpretación geológica de la litología en 2D



Nota: Elaboración propia.

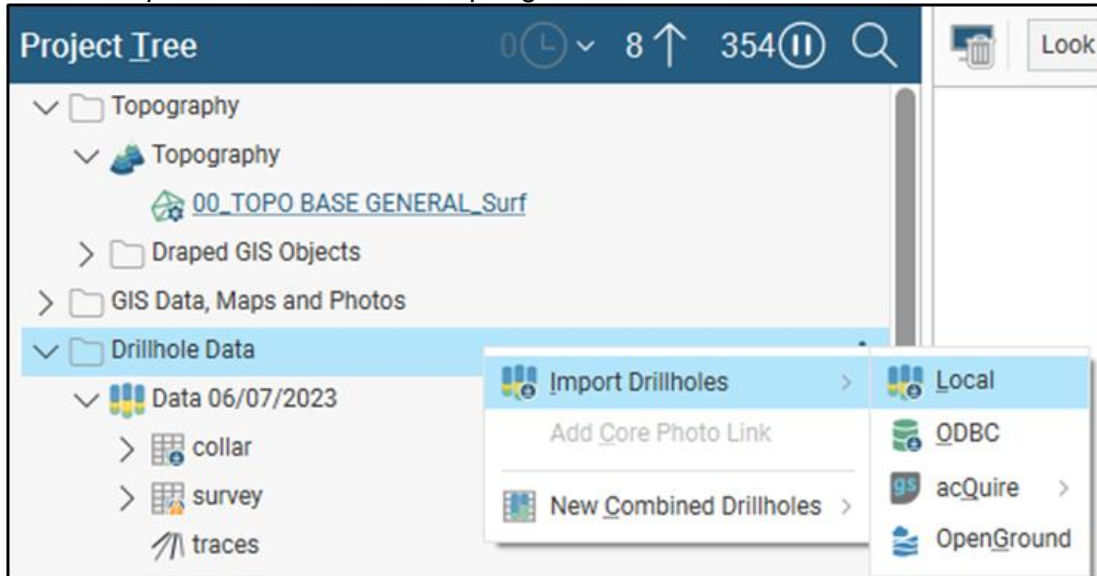
3.3.2.5 Elaboración e interpretación geológica en 3D usando Leapfrog Geo.

Importación y validación de datos de taladros diamantinos y canales.

En la carpeta “Drillhole Data” importaremos a partir de un archivo csv, los datos de survey, collar y assay de cada una de las muestras que ingresaremos a nuestro modelo.

Figura 19

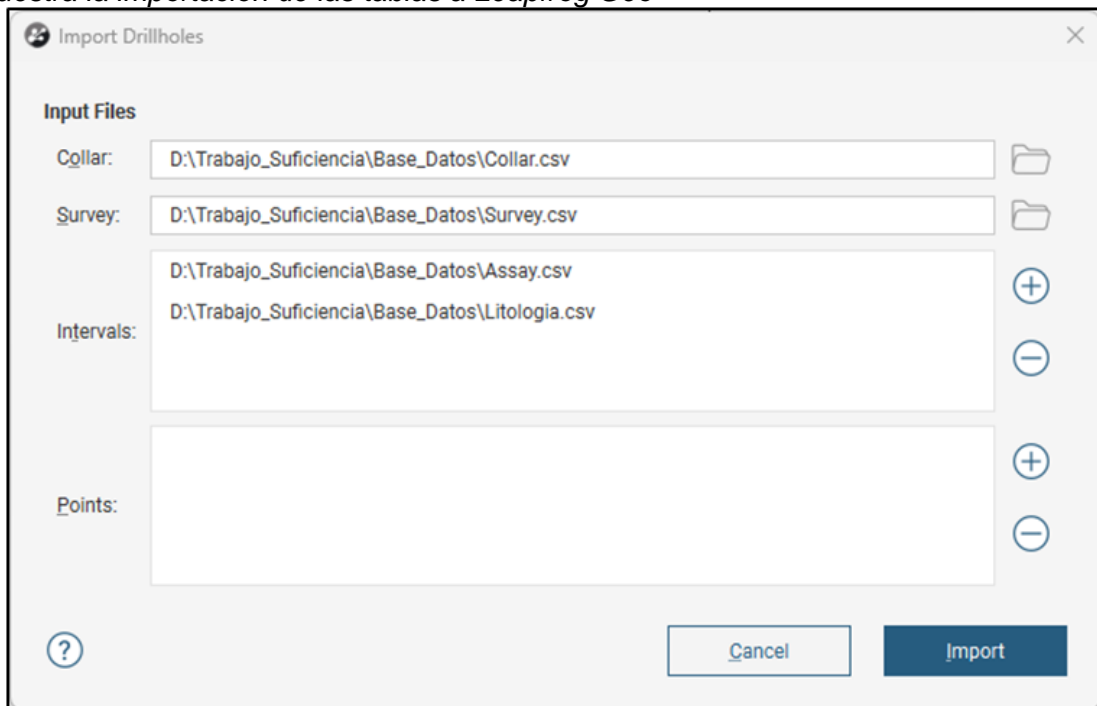
Muestra la importación de datos a Leapfrog Geo



Nota: Elaboración propia.

Figura 20

Muestra la importación de las tablas a Leapfrog Geo



Nota: Elaboración propia.

Importando mapeos y secciones base.

Cada uno de los mapeos y secciones interpretadas por los geólogos es importado en el Leapfrog Geo, lo cual nos permitirá realizar nuestro modelamiento en el software en base a la interpretación geológica de cada una de las estructuras. Esta interpretación debe ajustarse fielmente a la información y criterios geológicos existentes.

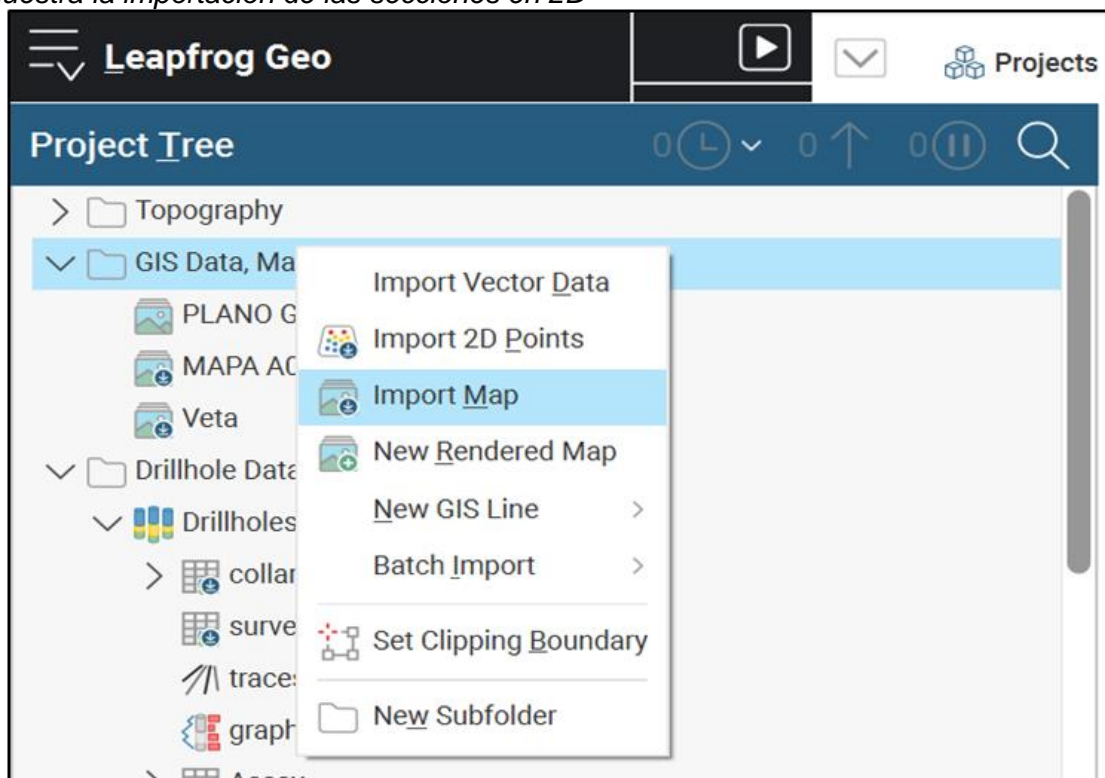
Con estos mapeos reproduciremos en nuestro modelo en Leapfrog Geo las estructuras principales, ramales, sigmoide y fallas, incluyendo cabalgamientos.

La interpretación geológica debe incluir la participación del geólogo de la zona a modelar.

En la carpeta “GIS Data, Maps and Photos” se ingresan los mapeos geológicos de labores, para ello seleccionamos la opción “Import Map”.

Figura 21

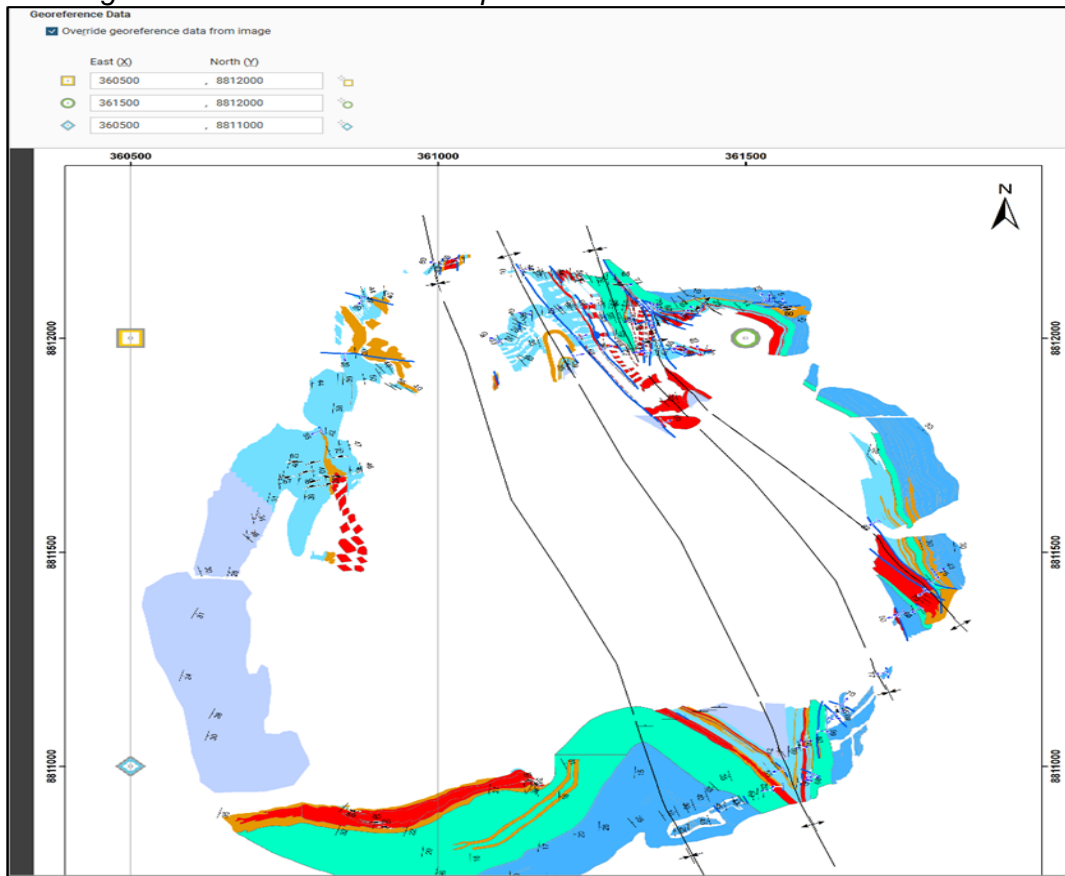
Muestra la importación de las secciones en 2D



Nota: Elaboración propia.

Figura 22

Muestra la georreferenciación de la interpretación en 2D

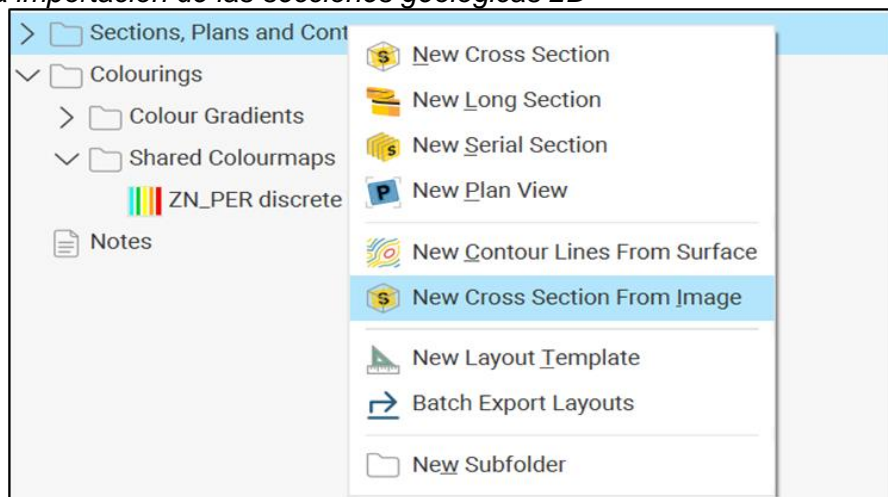


Nota: Elaboración propia.

Las interpretaciones de secciones geológicas se importan en la carpeta “Cross Section and Contours”, mediante la opción “New Cross Section From Image”; y se realiza el mismo procedimiento de importación de mapas.

Figura 23

Muestra la importación de las secciones geológicas 2D



Nota: Elaboración propia..

3.3.2.6 Elaboración de los sólidos litológicos. En la tabla de litología se tiene el campo geointerpretación, este sirve como base para la interpretación 3D. Se crea el campo Geo_MOD, donde se va a guardar los tramos seleccionados que finalmente participara en la construcción de los sólidos.

- GEOINTERP: Interpretación realizada al momento del logeo.
- GEO_MOD: Campo principal para el modelamiento geológico.
- DESCRIPCIÓN: Descripción del tramo de logeo.

Tabla 6

Muestra los datos de la tabla litología

HOLEID	FROM	TO	DESCRIPTION	GEINTERP	GEO_MOD
170004	15.65	30.60	Secuencia calcárea constituido	CaleraSup	Calera superior
17000H	15.65	30.60	Secuencia calcárea constituido	CaleraSup	Calera superior
17000H	30.60	64.30	Caliza a los 30.60m. se vuelve	CaleraSup	Calera superior
170004	64.30	94.55	Arcillita gris de tonalidad verde	CaleraMed (var)	Calera medio (var)
17000H	94.55	125.80	Intercalaciones de dolomía	CaleraMed (fav)	Calera medio (favorable)
17000H	125.80	128.70	Toba de color gris blanquecina	CaleraMed (fav)	Calera medio (favorable)
17000H	128.70	136.50	Intercalación de dolomía color	CaleraMed (fav)	Calera medio (favorable)
170004	136.50	150.70	Roca silicificada probable caliza	CaleraMed (fav)	Calera medio (favorable)
17000H	150.70	158.75	Dolomía de color gris y beige	CaleraMed (fav)	Calera medio (favorable)
17000H	158.75	158.85	Toba gris ligeramente blanqueada	CaleraMed (fav)	Calera medio (favorable)
17000H	158.85	171.65	Intercalación de dolomía gris	CaleraMed (fav)	Calera medio (favorable)
17000H	171.65	183.60	Caliza gris se presenta moderada	CaleraMed (fav)	Calera medio (favorable)
186004	29.00	30.00	Material suelto cuaternario	CaleraSup	Calera superior
18600H	2.90	20.65	Secuencia calcareo constituido	CaleraSup	Calera superior
18600H	20.65	23.15	Secuencia calcareo constituido	CaleraSup	Calera superior
18600H	23.15	23.85	Limo - limolitas blanquecinas	CaleraSup	Calera superior
18600H	23.85	24.20	Secuencia calcareo constituido	CaleraSup	Calera superior
18600H	24.20	27.20	Margas amarillentas de fractura	CaleraSup	Calera superior
18600H	27.20	30.20	Calizas cherticas de aspecto	CaleraSup	Calera superior
18600H	30.20	36.25	Arcillitas grises intercalando con	CaleraSup	Calera superior
186DDH	36.25	64.20	Secuencia predominantemente caliza	CaleraMed (var)	Calera medio (var)

Nota: Elaboración propia

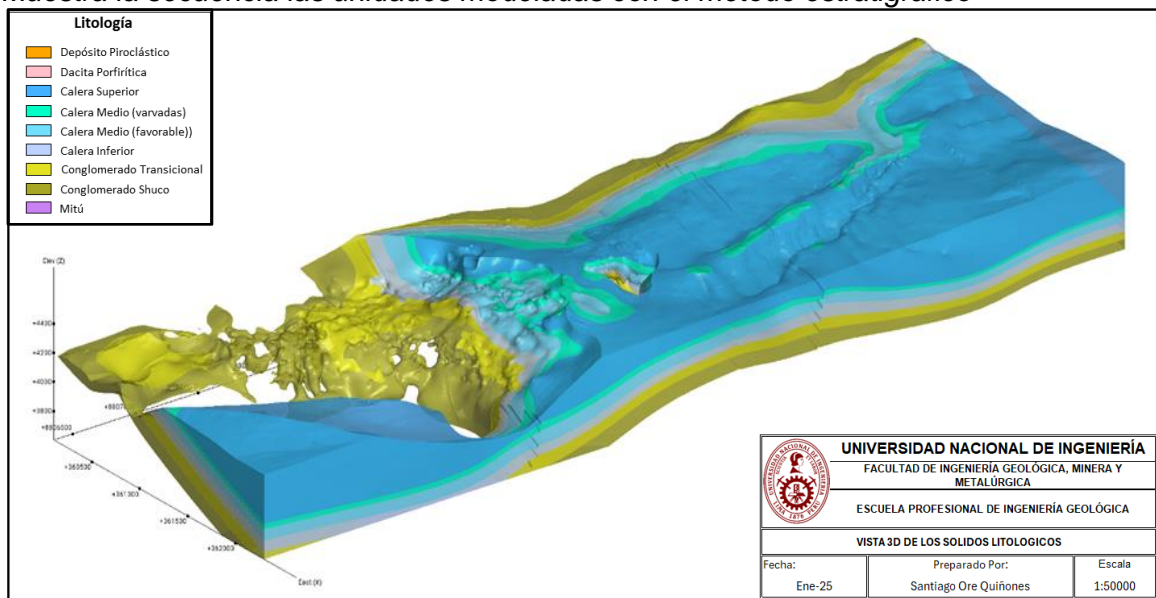
3.3.2.7 Definición de unidades modelables. Se tienen dos tipos de sólidos considerados para el modelo:

Modelo estratigráfico.

Para las unidades modelables Caleras, Conglomerados y Mitu se ha considerado una secuencia estratigráfica de deposición y; para la zona de marcapunta suroeste, se ha realizado una subdivisión erosiva para afinar los estratos, pues se tiene una discordancia que pone en contacto los conglomerados shuco y transicional con las unidades calera medio favorable y varvada inclusive.

Figura 24

Muestra la secuencia las unidades modeladas con el método estratigráfico



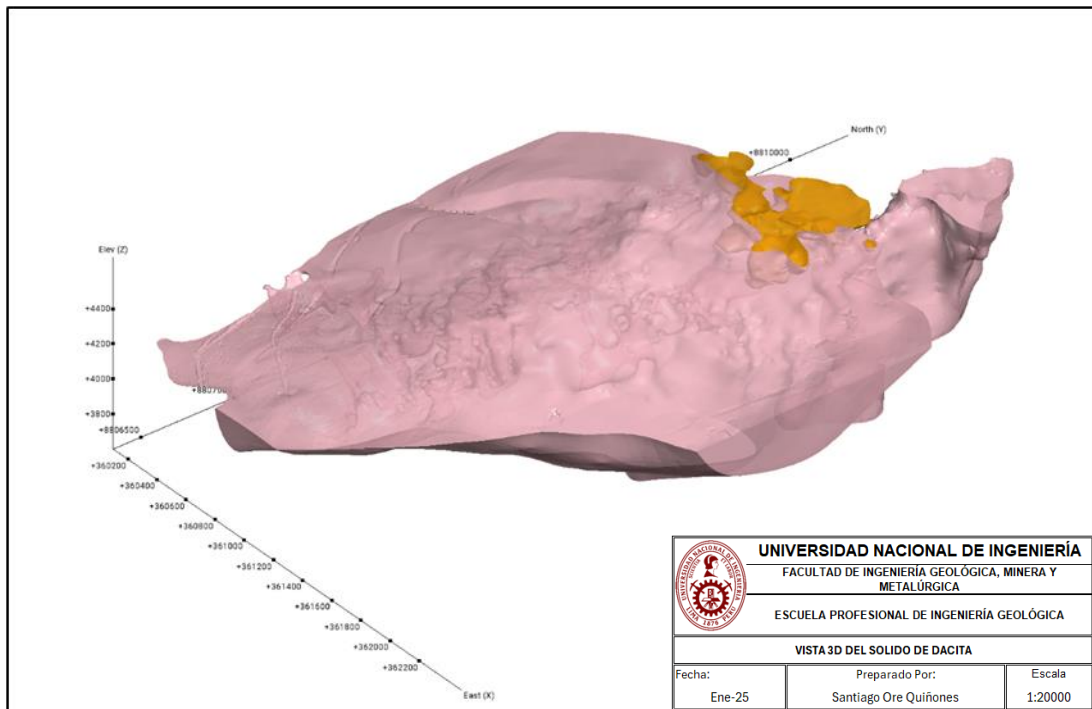
Nota: Elaboración propia.

Intrusivos.

Para las unidades, Dacita porfirítica y Depósito piroclástico se han modelado como intrusivos con tendencia isotrópica debido a la geometría irregular, sobre todo de las dacitas. Sin embargo, se han observado e interpretado tendencias locales en forma de diques y sill, añadiendo controles locales para modelar una geometría acorde con dicha interpretación

Figura 25

Muestra la secuencia las unidades modeladas con método intrusión



Nota: Elaboración propia.

Tabla 7

Muestra las litologías modeladas

N°	LITOLOGÍA	CÓDIGO	COLOR	R	G	B
1	Dacita porfírica	DAPO		255	217	216
2	Depósito piroclástico	PIRO		255	165	0
3	Calera superior	CSUP		68	178	255
4	Calera medio (varvadas)	CMVAR		0	255	197
5	Calera medio (favorable)	CMFAV		114	223	254
6	Calera inferior	CINF		189	210	255
7	Conglomerado transicional	CONGT		226	226	34
8	Conglomerado shuco	CONGS		167	167	37
9	Mitu	MITU		202	129	244

Nota: Elaboración propia.

3.3.2.8 Validación del modelo geológico. La validación del modelo geológico consta de dos partes:

Validación cuantitativa del modelo litológico (Back-Flagging):

Se realizó una validación cuantitativa mediante un análisis de back-flagging, en el que se comparó la litología logueada en sondajes (GEO_MOD) con la asignada por el modelo 3D. Como se muestra en la Tabla 8, todas las unidades litológicas presentan una

correspondencia superior al 95%, con excepción de la Calera Superior (86.9%), donde la discrepancia se atribuye a zonas de relleno en el Tajo Norte.

El alto porcentaje de coincidencia confirma que el modelo geológico 3D representa adecuadamente la geometría de las unidades litológicas, proporcionando una base sólida para la estimación de recursos.

Tabla 8

Muestra la validación de las unidades modeladas

LITOLOGÍA	METROS	PORCENTAJE (%)
GEO_MOD: Calera inferior	23,358	98.3
GEO_MOD: Calera medio (favorable)	92,912	98.8
GEO_MOD: Calera medio (varvadas)	37,255	97.8
GEO_MOD: Calera superior	44,336	86.9
GEO_MOD: Conglomerado shuco	116,333	98.7
GEO_MOD: Conglomerado transicional	58,097	98.5
GEO_MOD: Dacita porfirítica (Dacita Domo)	109,968	99.2
GEO_MOD: Dacita porfirítica (Dacita_NE)	502	100
GEO_MOD: Dacita porfirítica (Dacita_Smelter)	2,986	99.2
GEO_MOD: Depósito piroclástico	6,506	95.9
GEO_MOD: Mitu	21,138	96.6

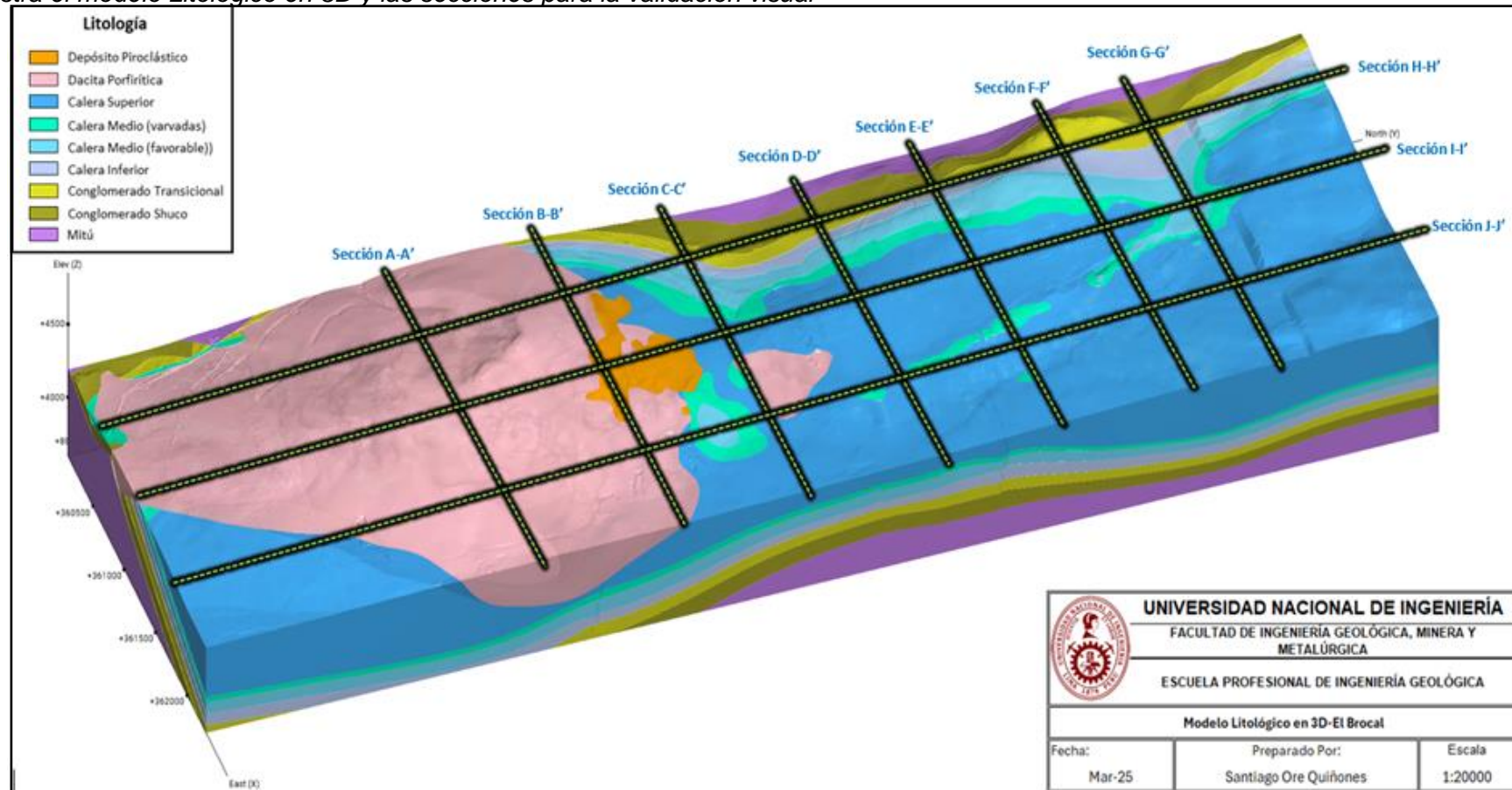
Nota: Elaboración propia.

Validación visual.

En cuanto a la validación visual, se debe tener en cuenta que los contornos de la superficie guarden correspondencia con los datos de sondajes y las interpretaciones en 2D.

Figura 26

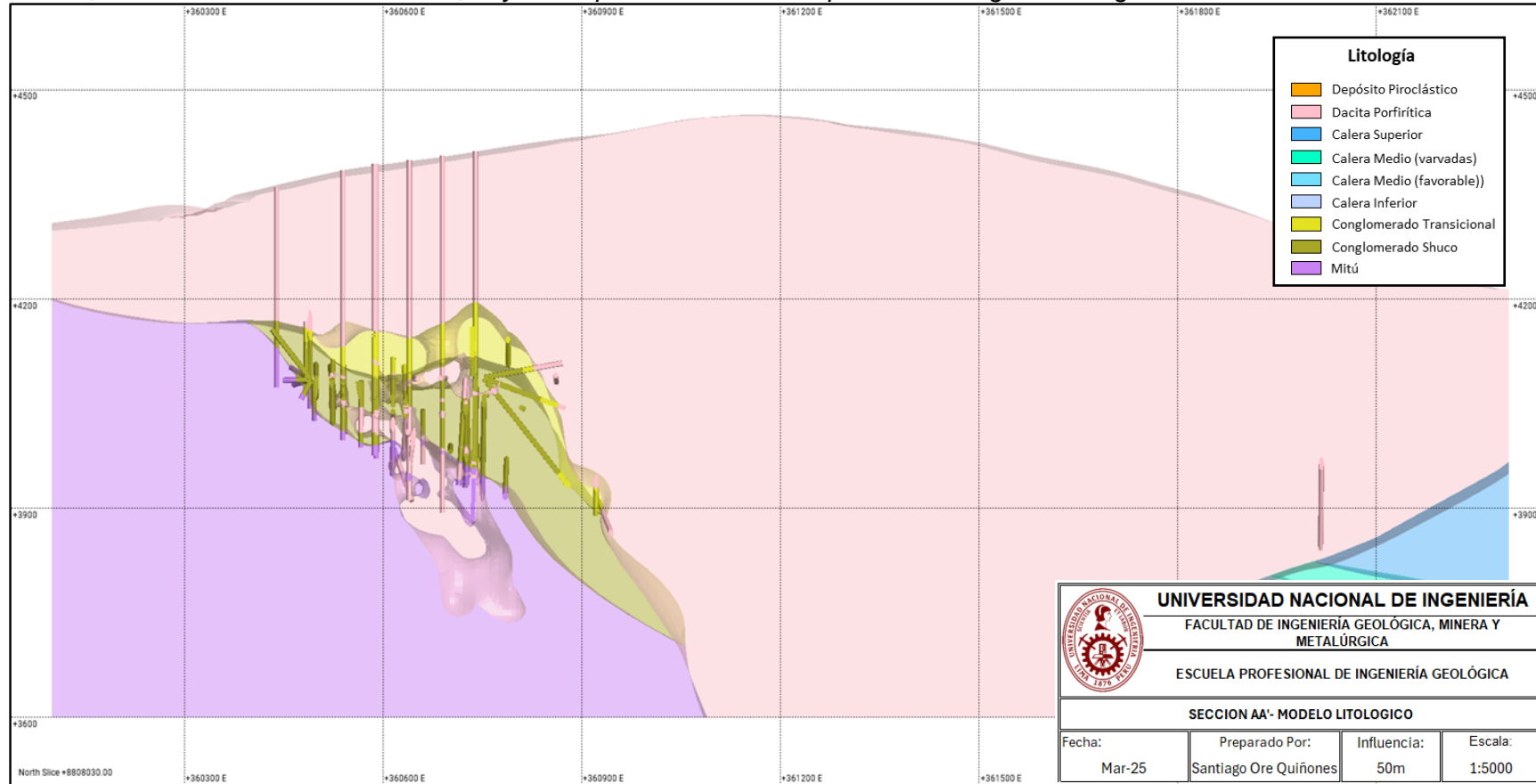
Muestra el modelo Litológico en 3D y las secciones para la validación visual



Nota: Elaboración propia.

Figura 27

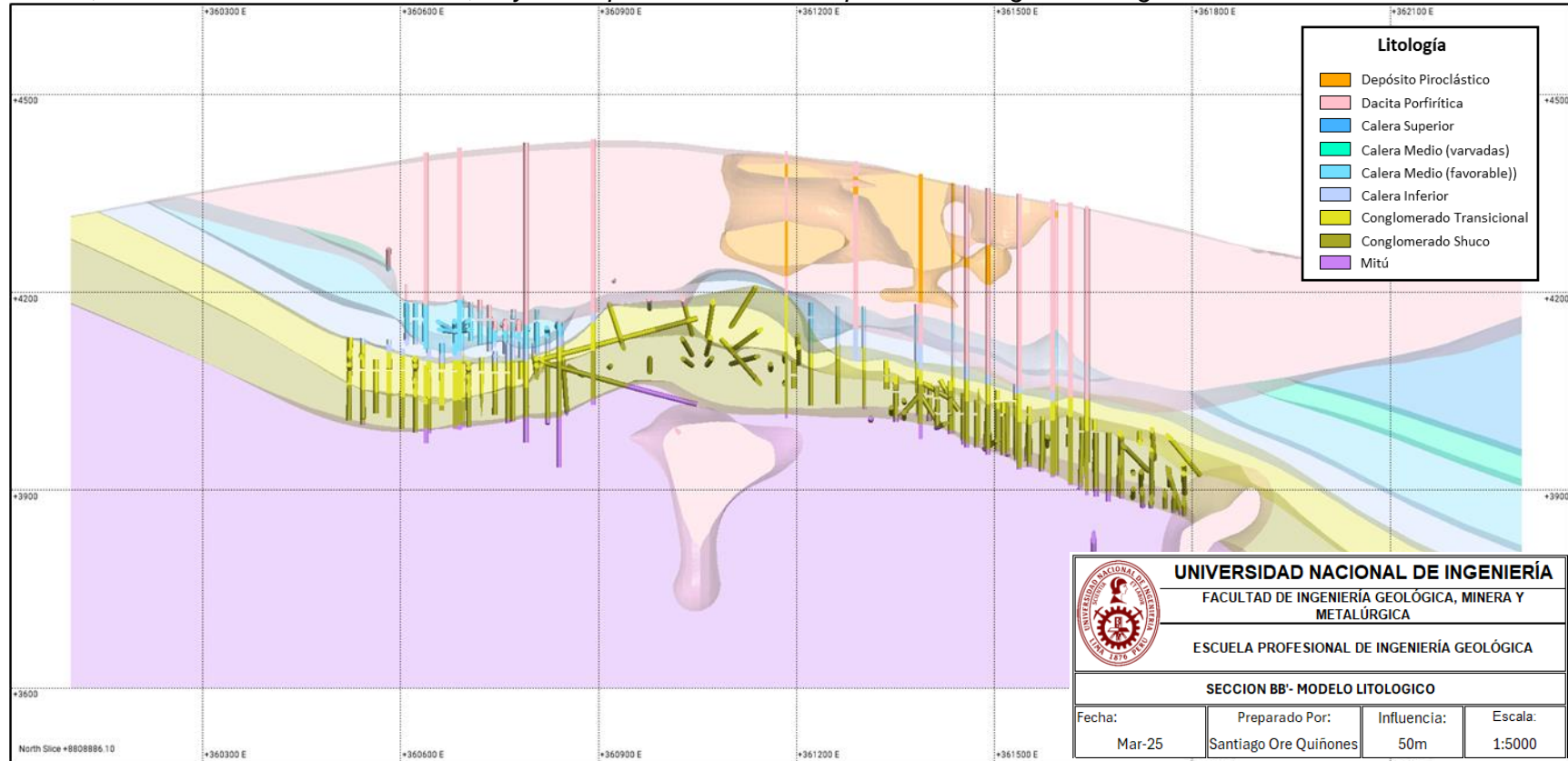
Sección AA', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada



Nota: Elaboración propia.

Figura 28

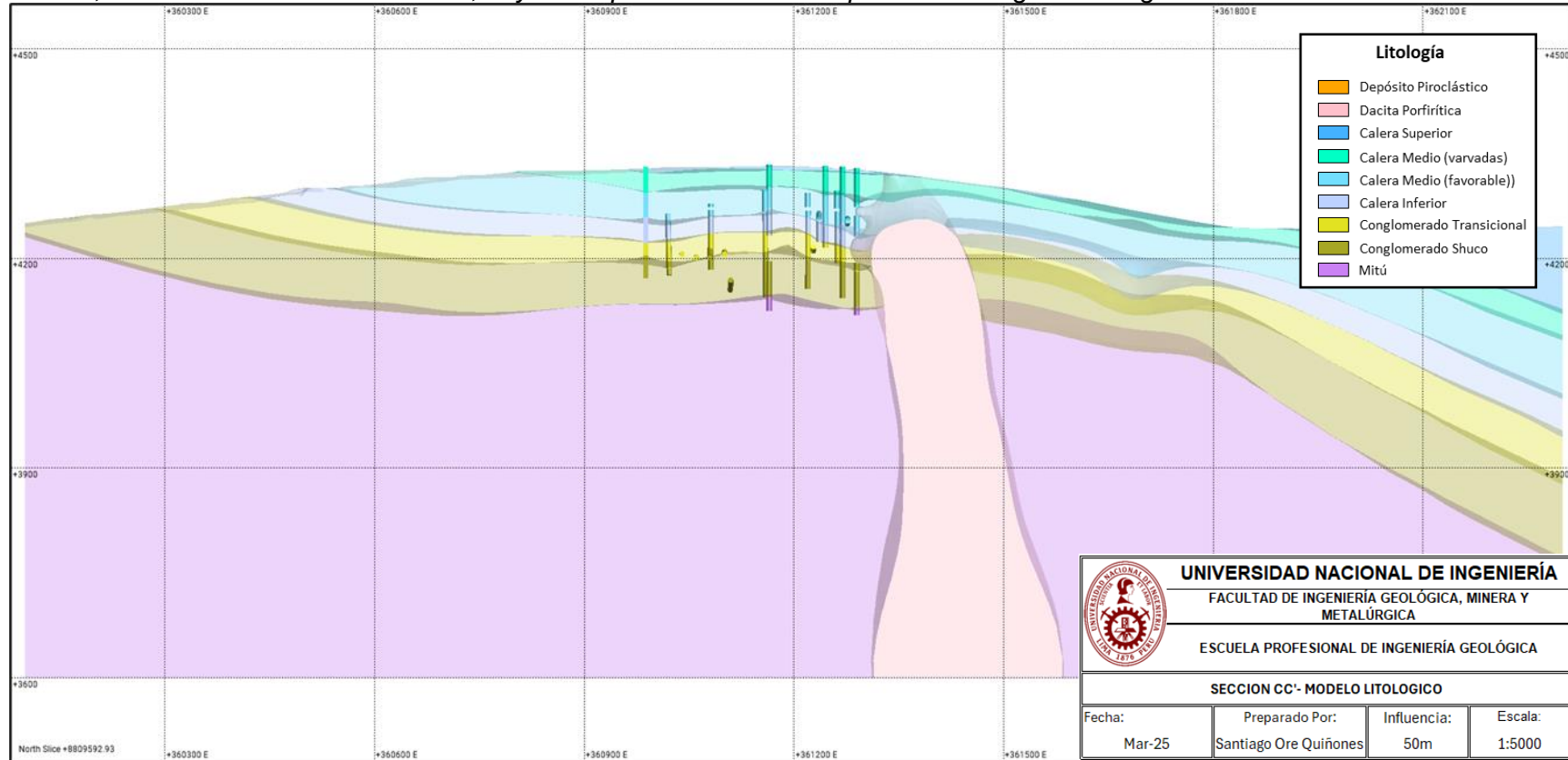
Sección BB', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada



Nota: Elaboración propia.

Figura 29

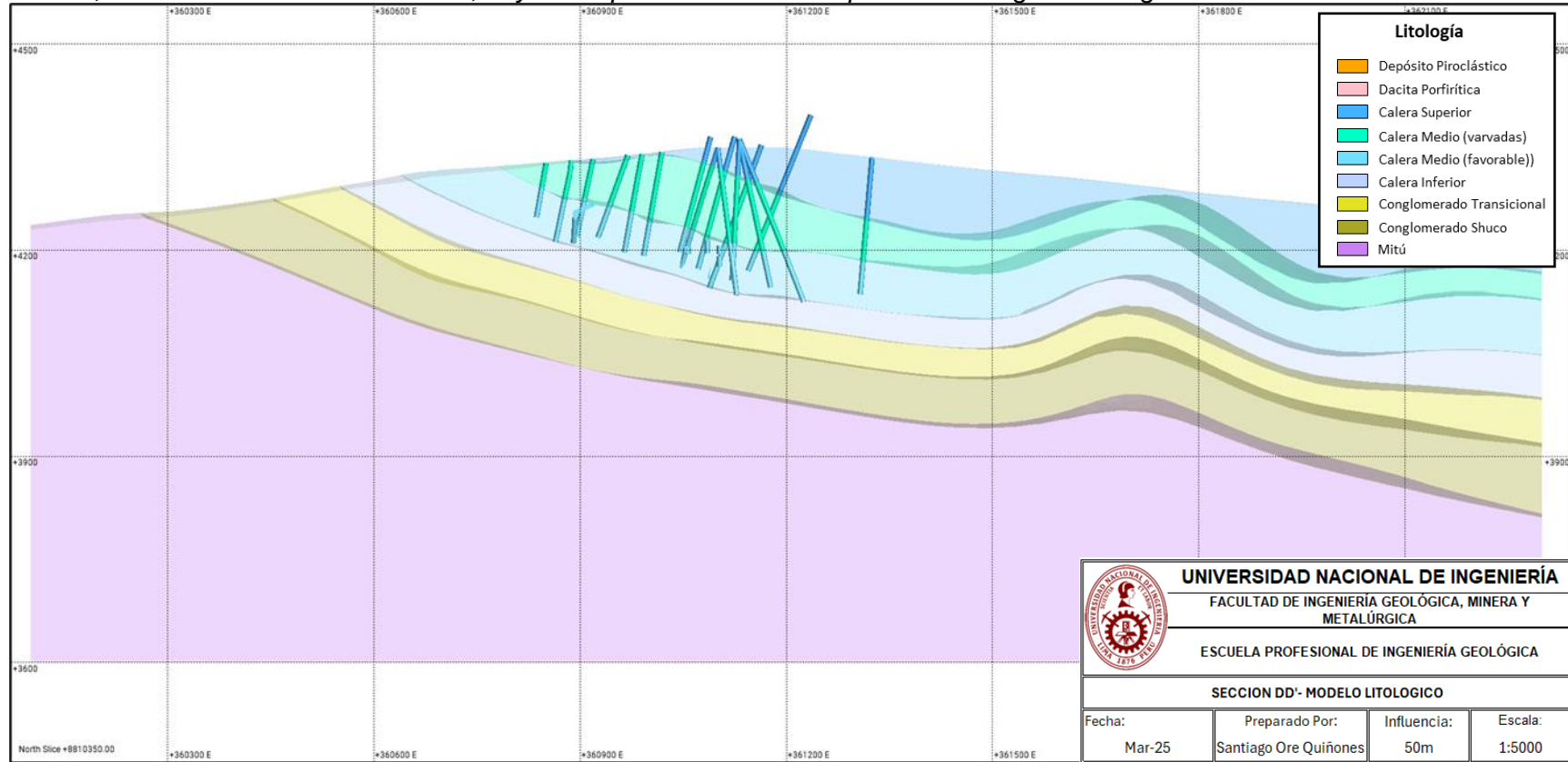
Sección CC', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada



Nota: Elaboración propia.

Figura 30

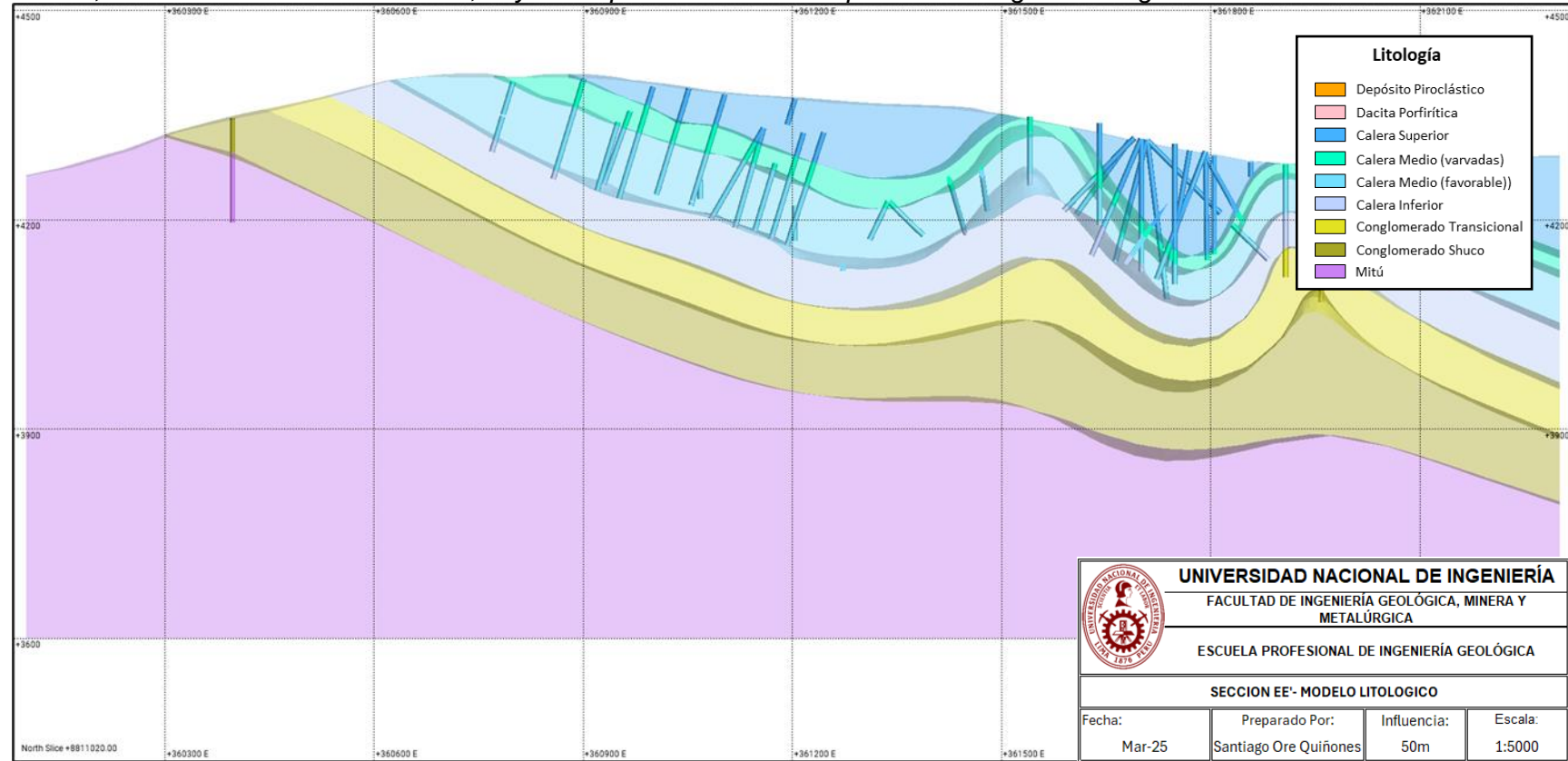
Sección DD', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada



Nota: Elaboración propia.

Figura 31

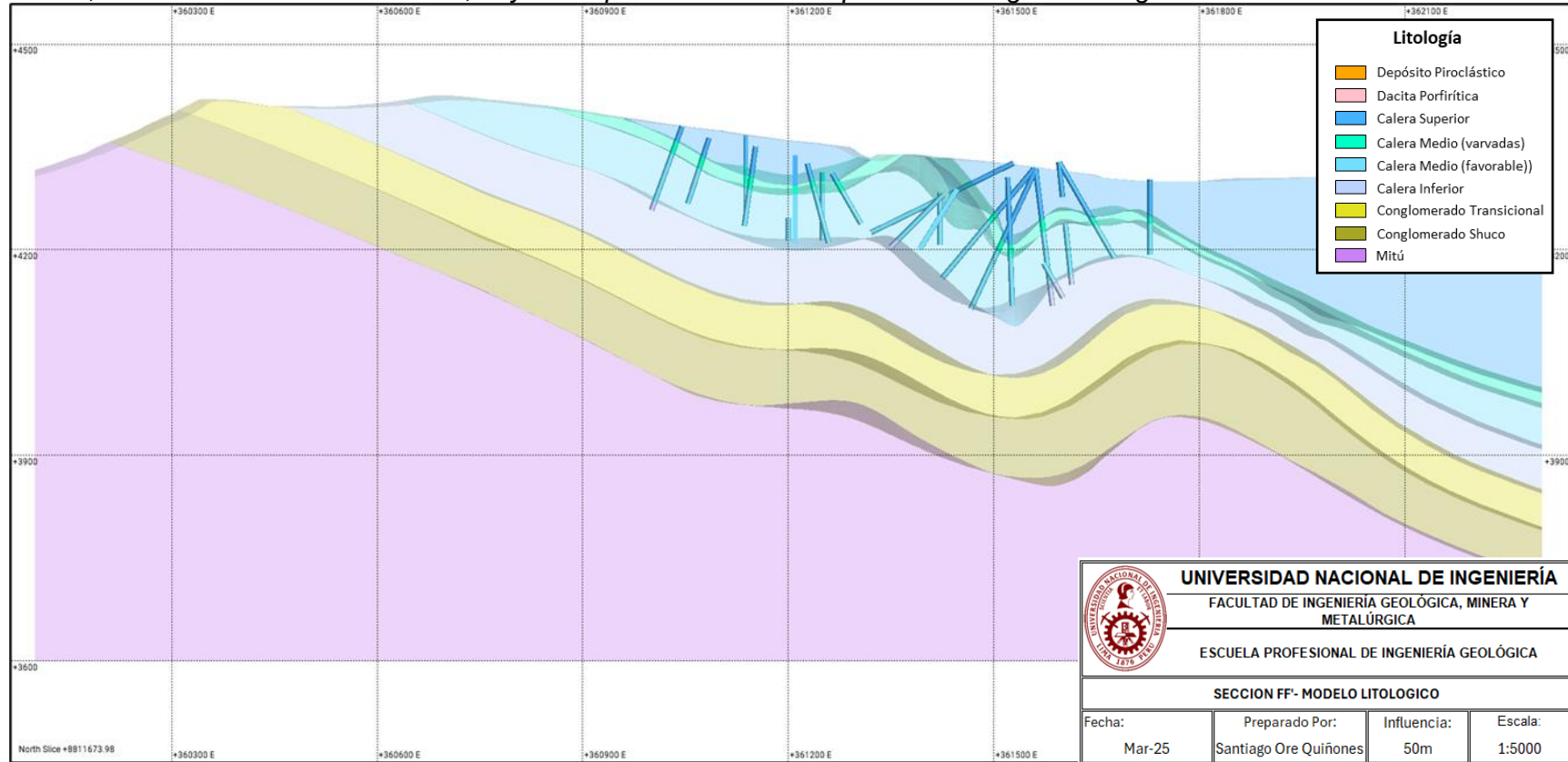
Sección EE', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada



Nota: Elaboración propia.

Figura 32

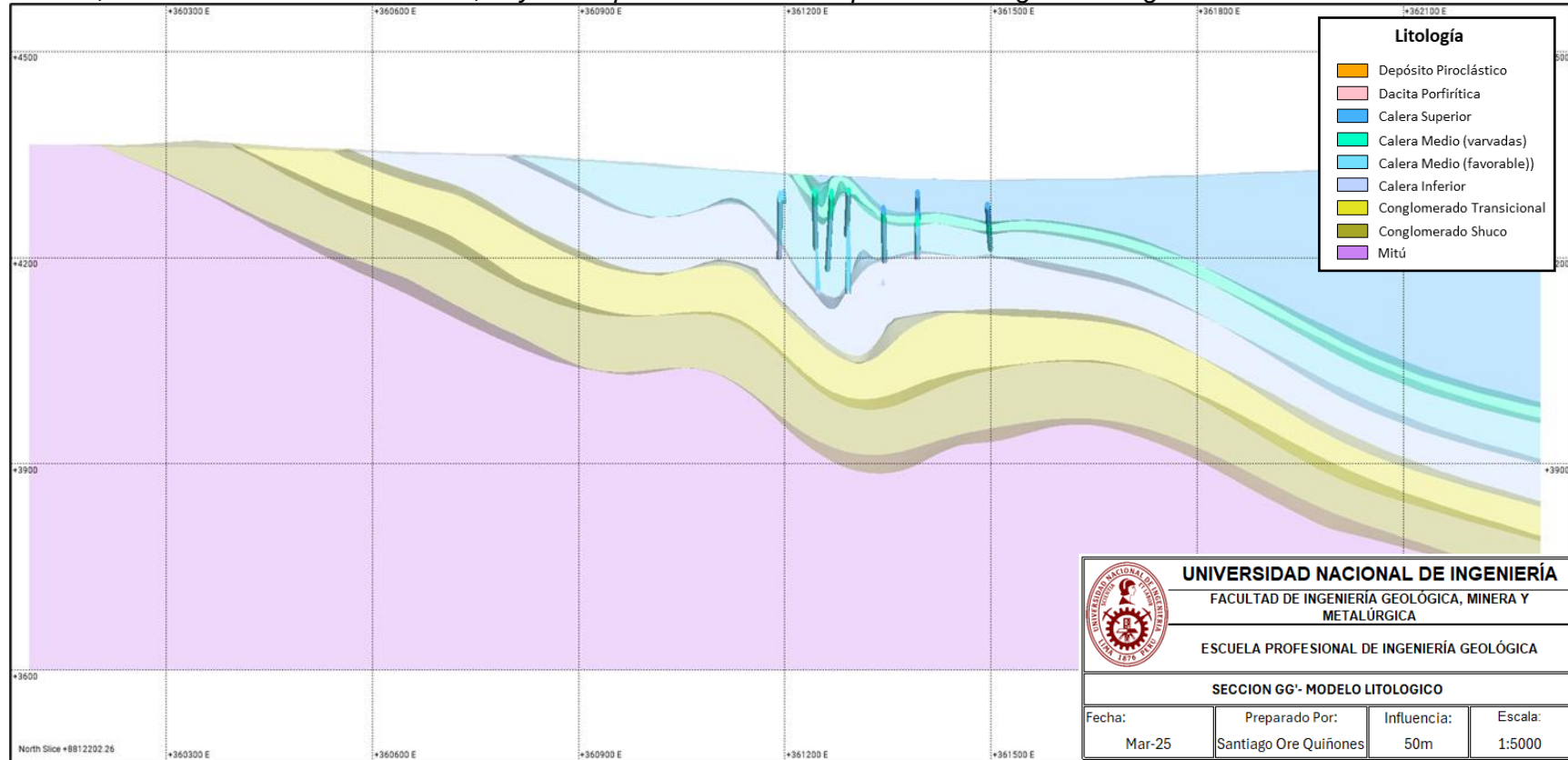
Sección FF', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada



Nota: Elaboración propia.

Figura 33

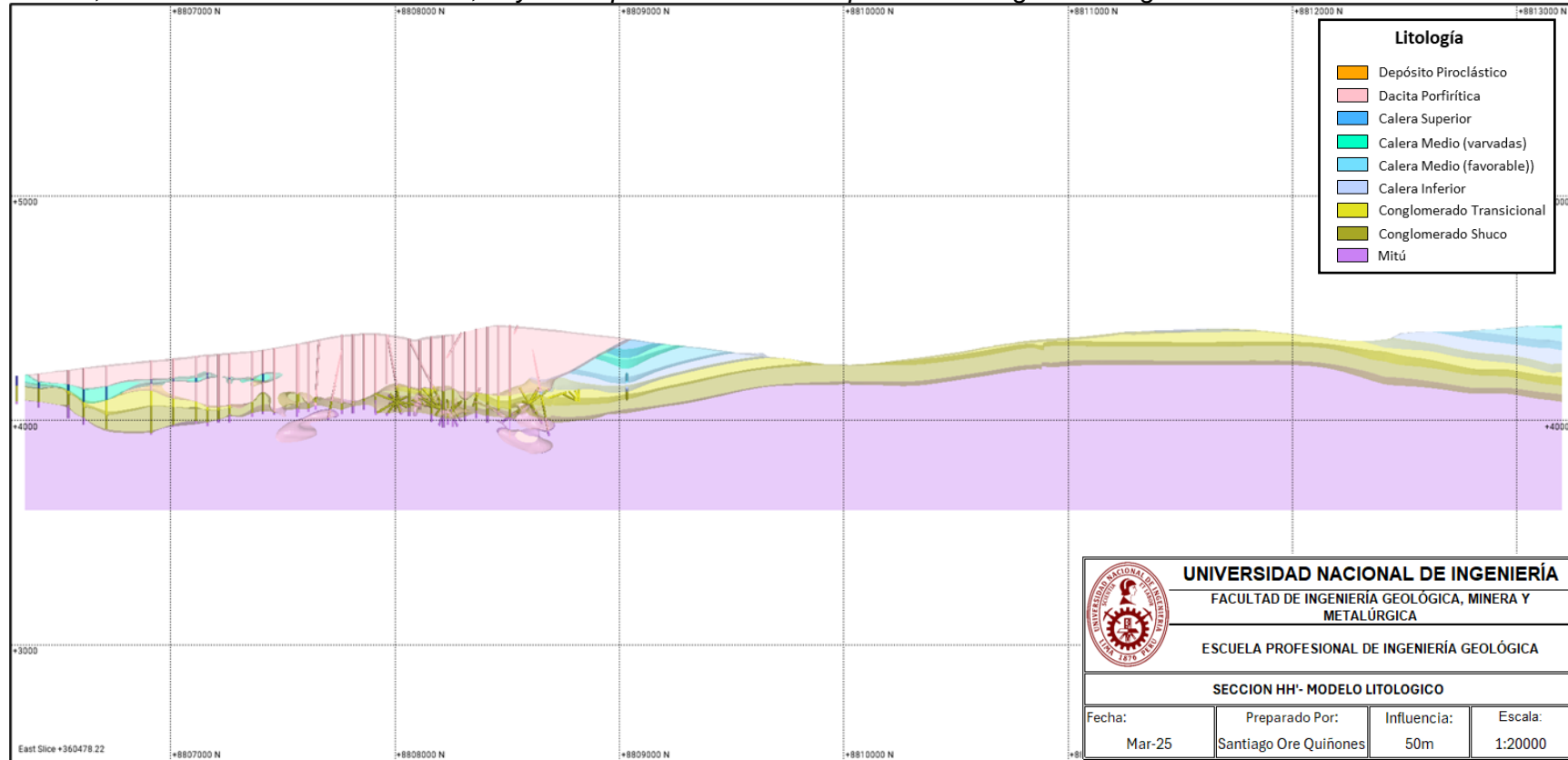
Sección GG', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada



Nota: Elaboración propia.

Figura 34

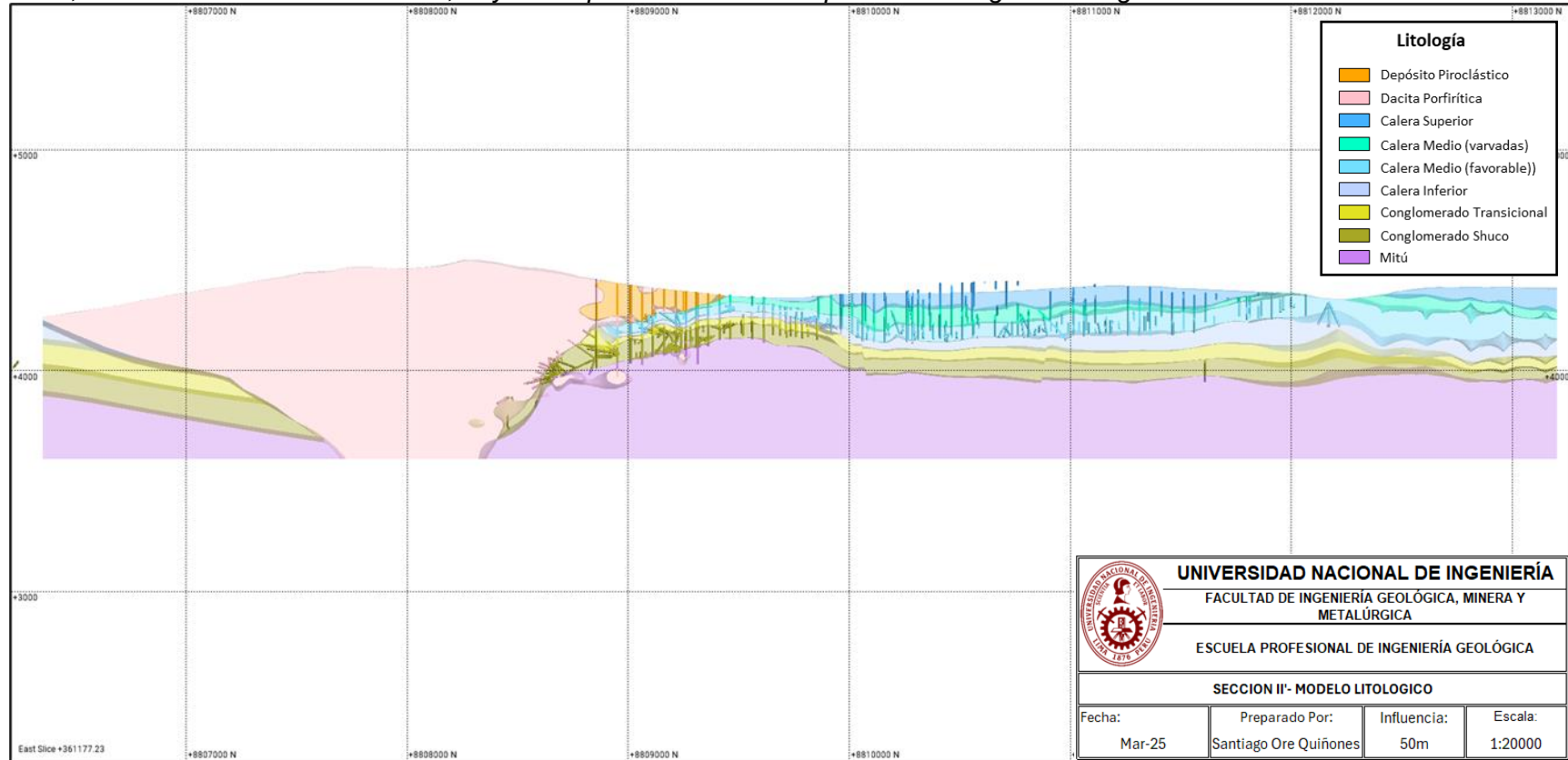
Sección HH', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada



Nota: Elaboración propia.

Figura 35

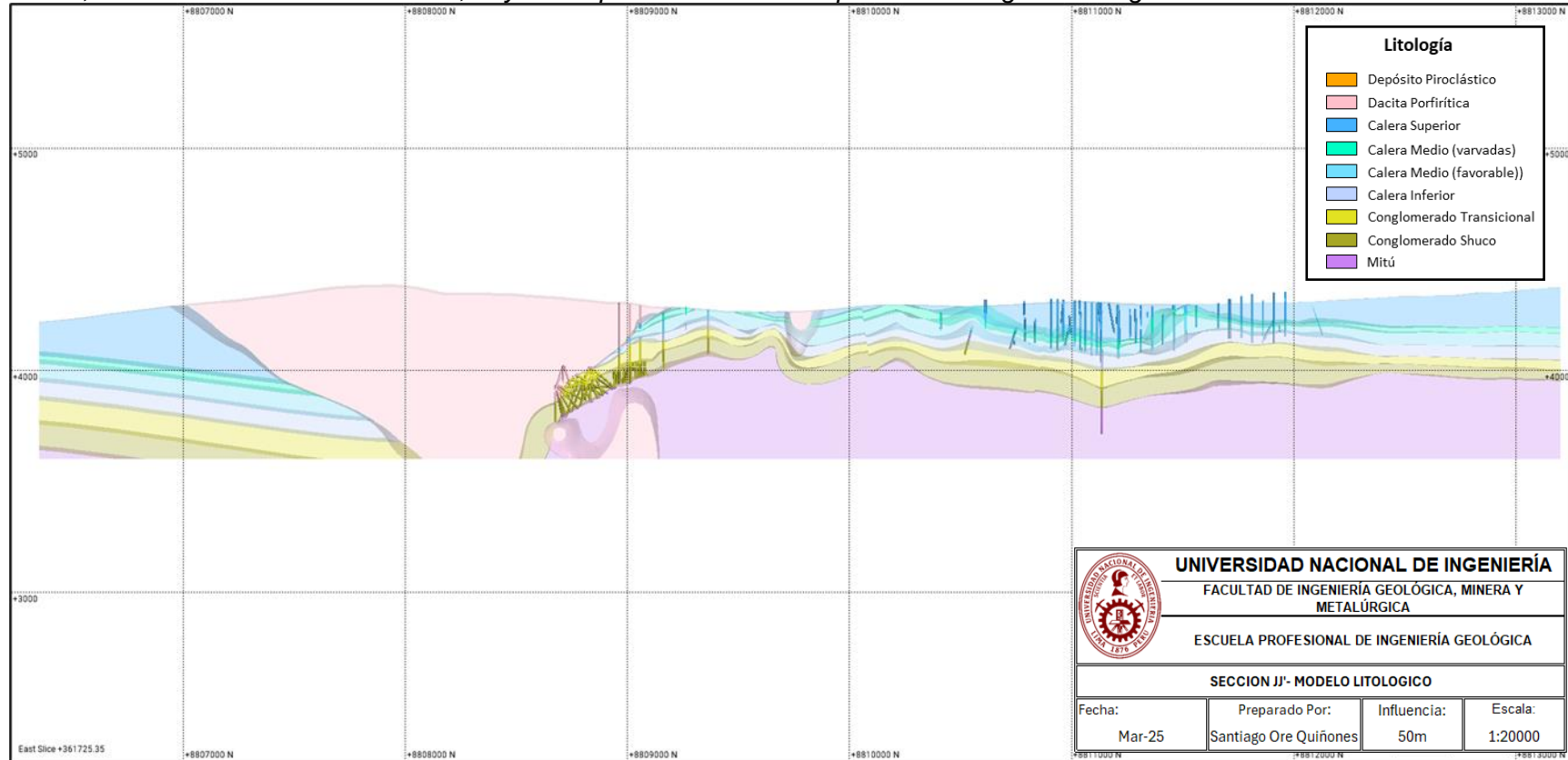
Sección II', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada



Nota: Elaboración propia.

Figura 36

Sección JJ', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada



Nota: Elaboración propia.

3.3.3 Elaboraciones envolventes de ley (Mantos mineralizados).

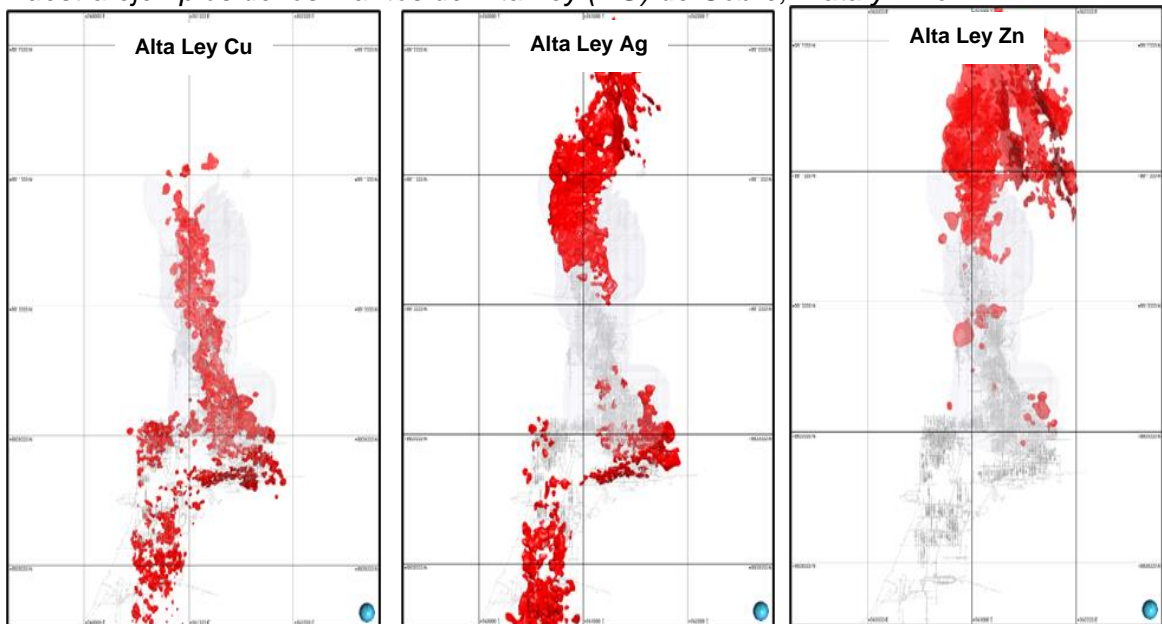
El proceso de construcción se realizó en el software de modelamiento Leapfrog Geo. Las envolventes se construyeron respetando el modelo litológico, dentro de los estratos favorables para cada mineralización, también se tomó en cuenta las tendencias estructurales de las respectivas litologías.

Se modelaron mantos zinc, mantos plomo, mantos cobre, mantos oro y mantos de plata.

Los mantos están compuestos por envolventes de baja ley (LG) y de Alta Ley (HG), estos han sido definidos a partir de la ley de las muestras.

Figura 37

Muestra ejemplos de los mantos de Alta Ley (HG) de Cobre, Plata y Zinc

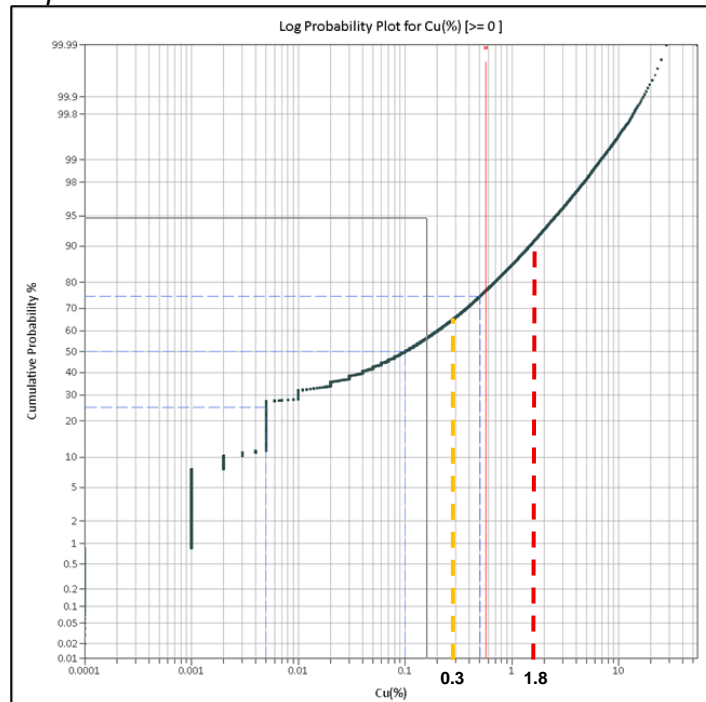


Nota: Elaboración propia.

3.3.3.1 Modelamiento de envolventes de Cobre. El cobre se modeló considerando los cutoff observados en los gráficos Log-Probabilísticos, en los cuales fue posible definir para una ley media de 0,3% de Cu y una ley alta de 1,80% de Cu. Las figuras (39,40) que se muestran a continuación corresponden a plantas y secciones del modelamiento realizado en cada una de las unidades del modelo litológico, además, se muestran los sólidos obtenidos a través de los Indicadores de Leapfrog.

Figura 38

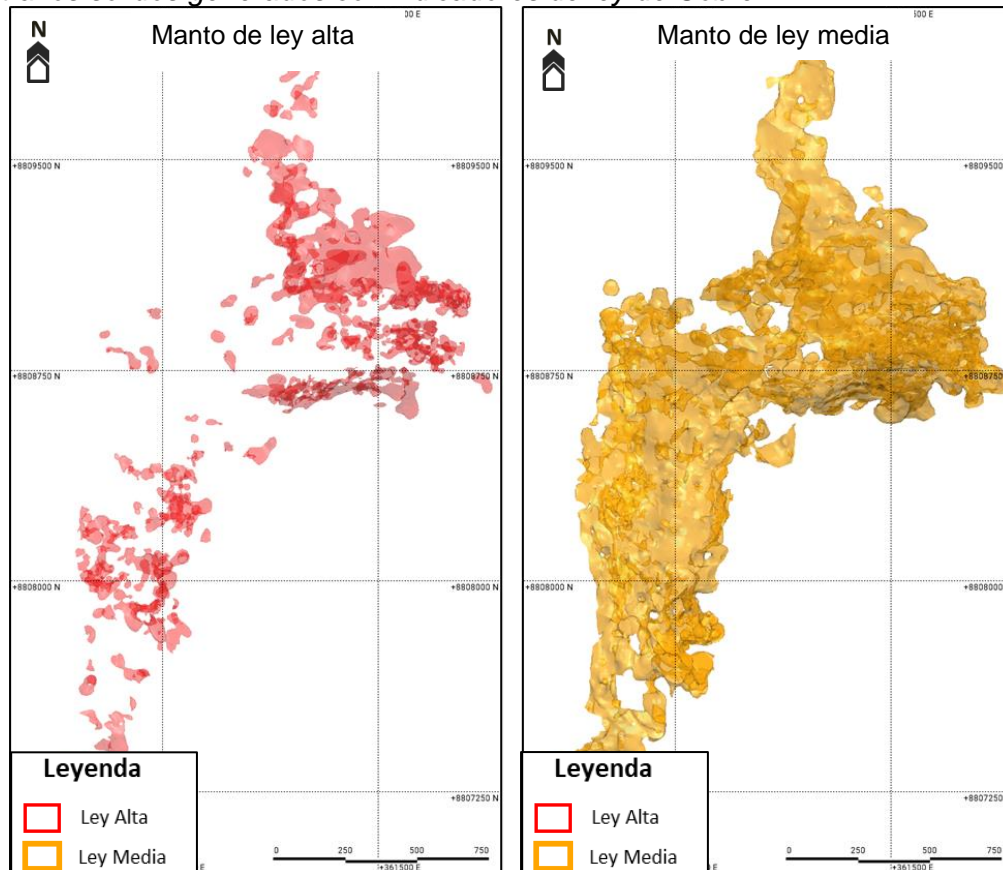
Muestra la curva de probabilidad acumulada de Cobre



Nota: Elaboración propia.

Figura 39

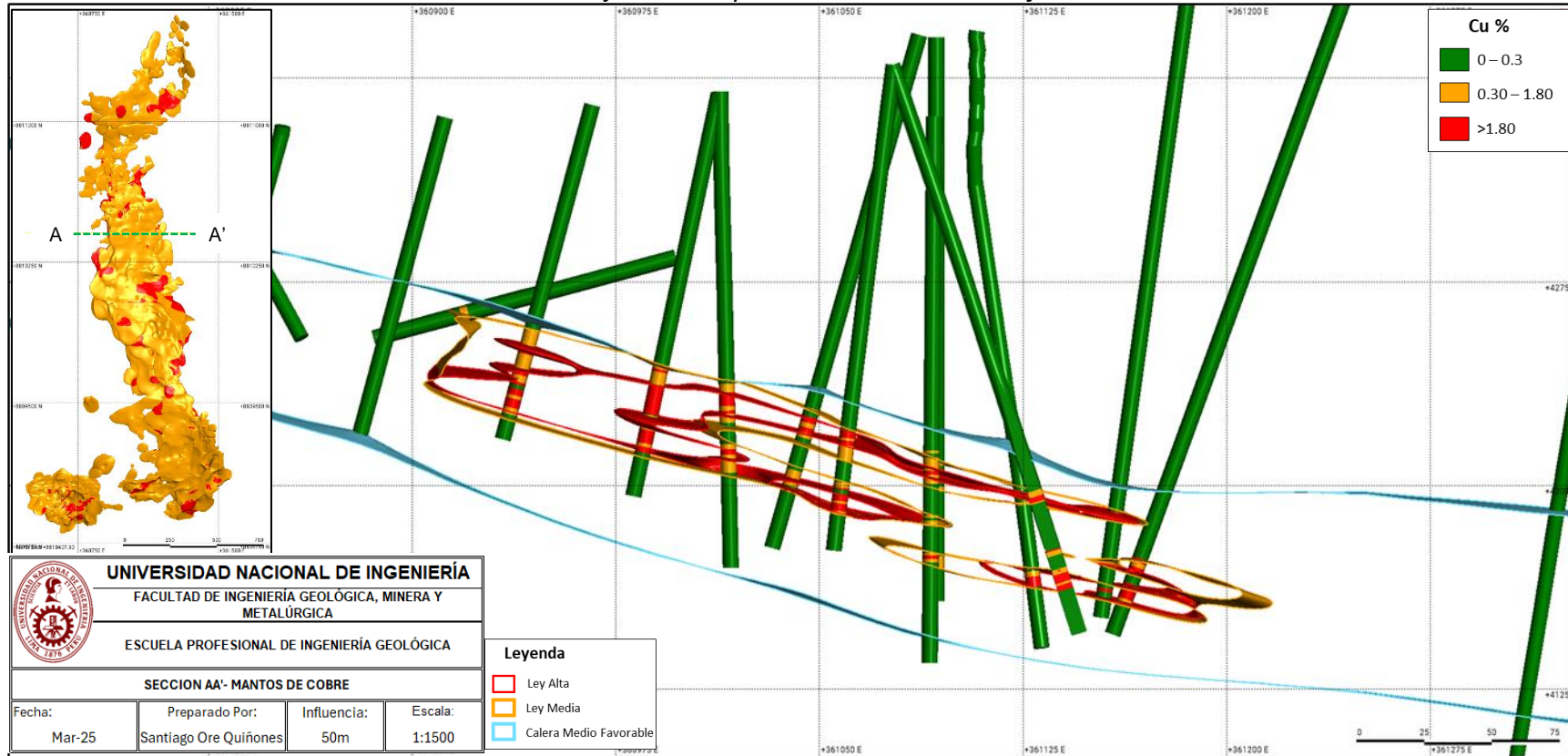
Muestra los sólidos generados con indicadores de ley de Cobre



Nota: Elaboración propia.

Figura 40

Sección AA' Muestra los sólidos modelados en sección y su correspondencia con los sondajes



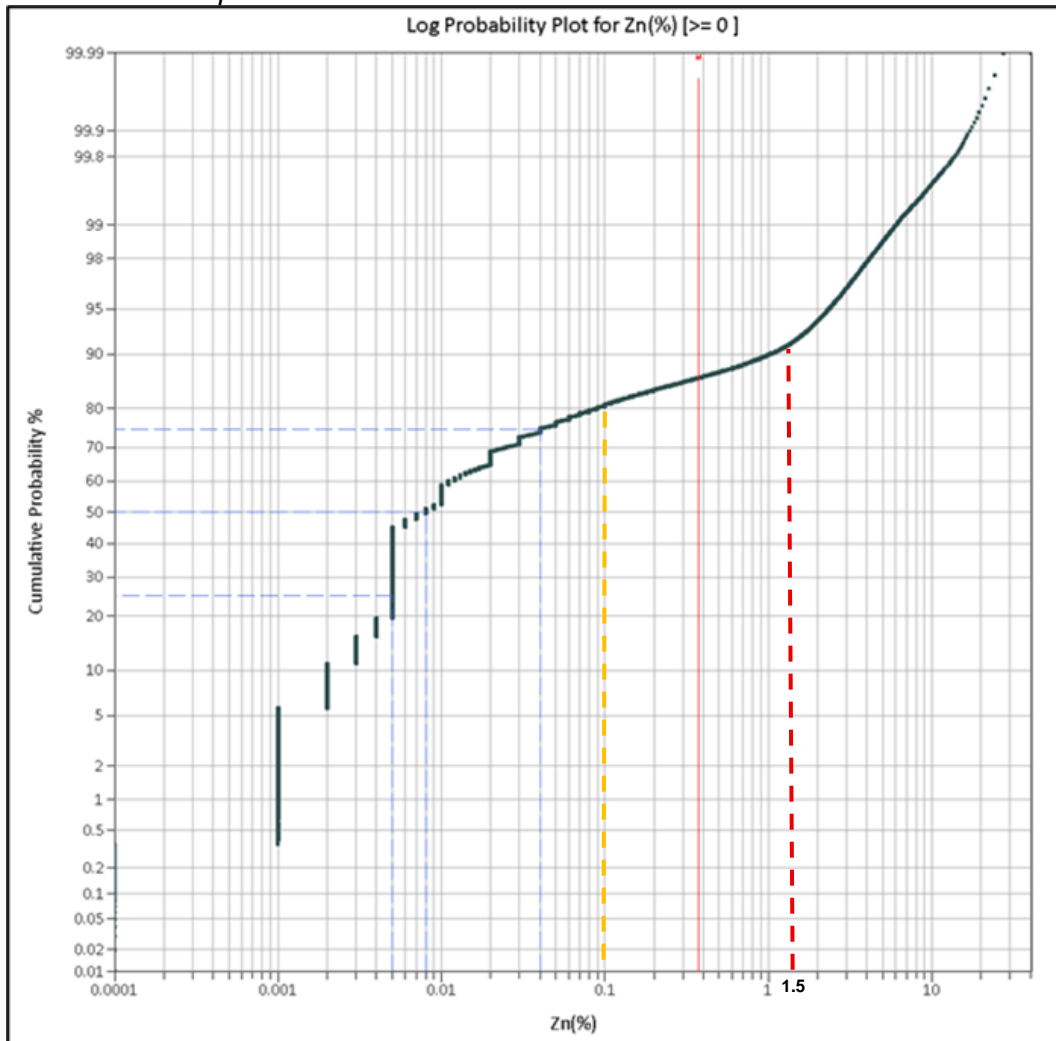
Nota: Elaboración propia.

3.3.3.2 Modelamiento de envoltentes de Zinc. El zinc se modeló considerando los cutoff observados en los gráficos Log-Probabilísticos, en los cuales fue posible definir para una ley media de 0,1% de Zn y una ley alta de 1,5% de Zn.

Las figuras (42,43) que se muestran a continuación corresponden a plantas y secciones del modelamiento realizado en cada una de las unidades del modelo litológico, además, se muestran los sólidos obtenidos a través de los Indicadores de Leapfrog.

Figura 41

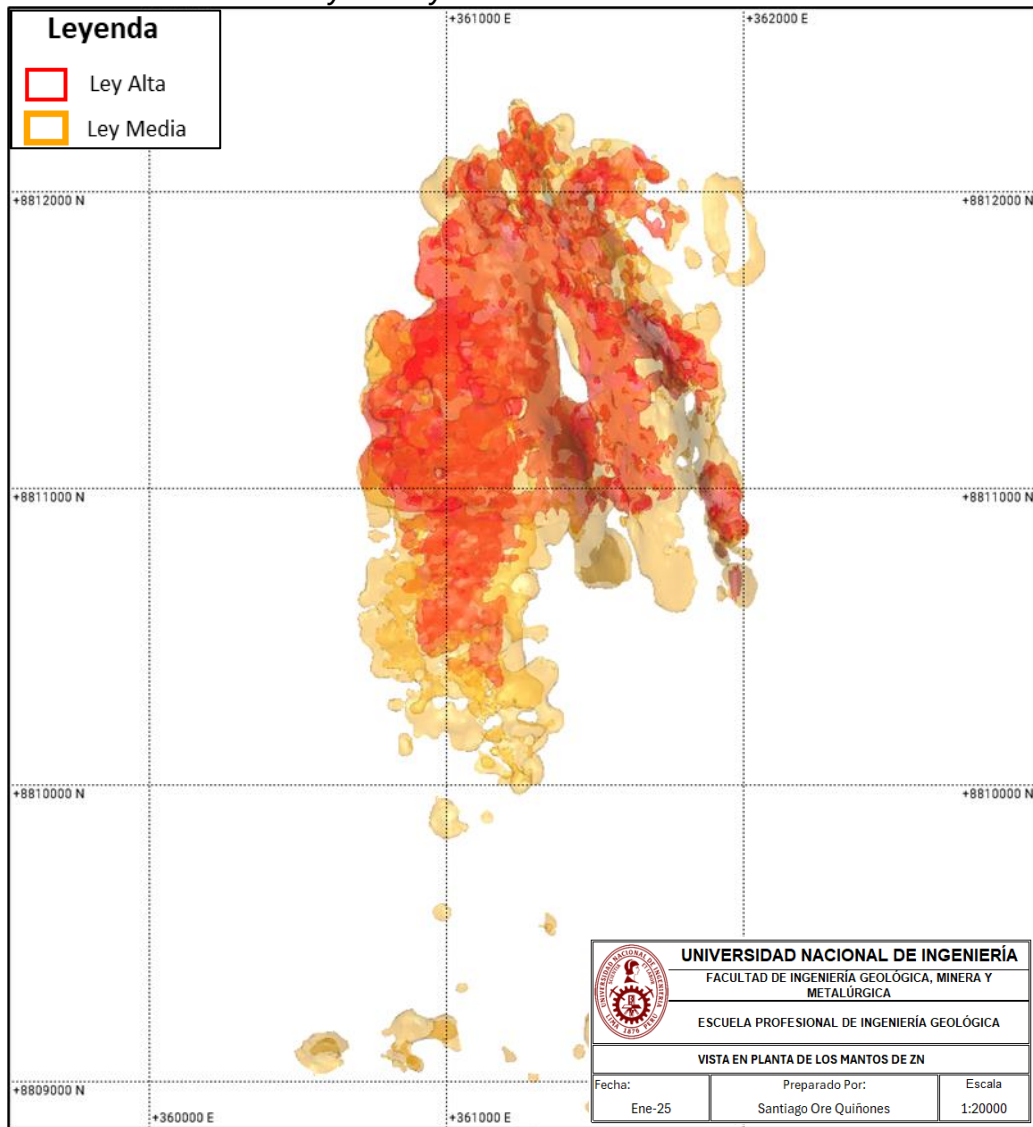
Muestra la curva de probabilidad acumulada de Zinc



Nota: Elaboración propia.

Figura 42

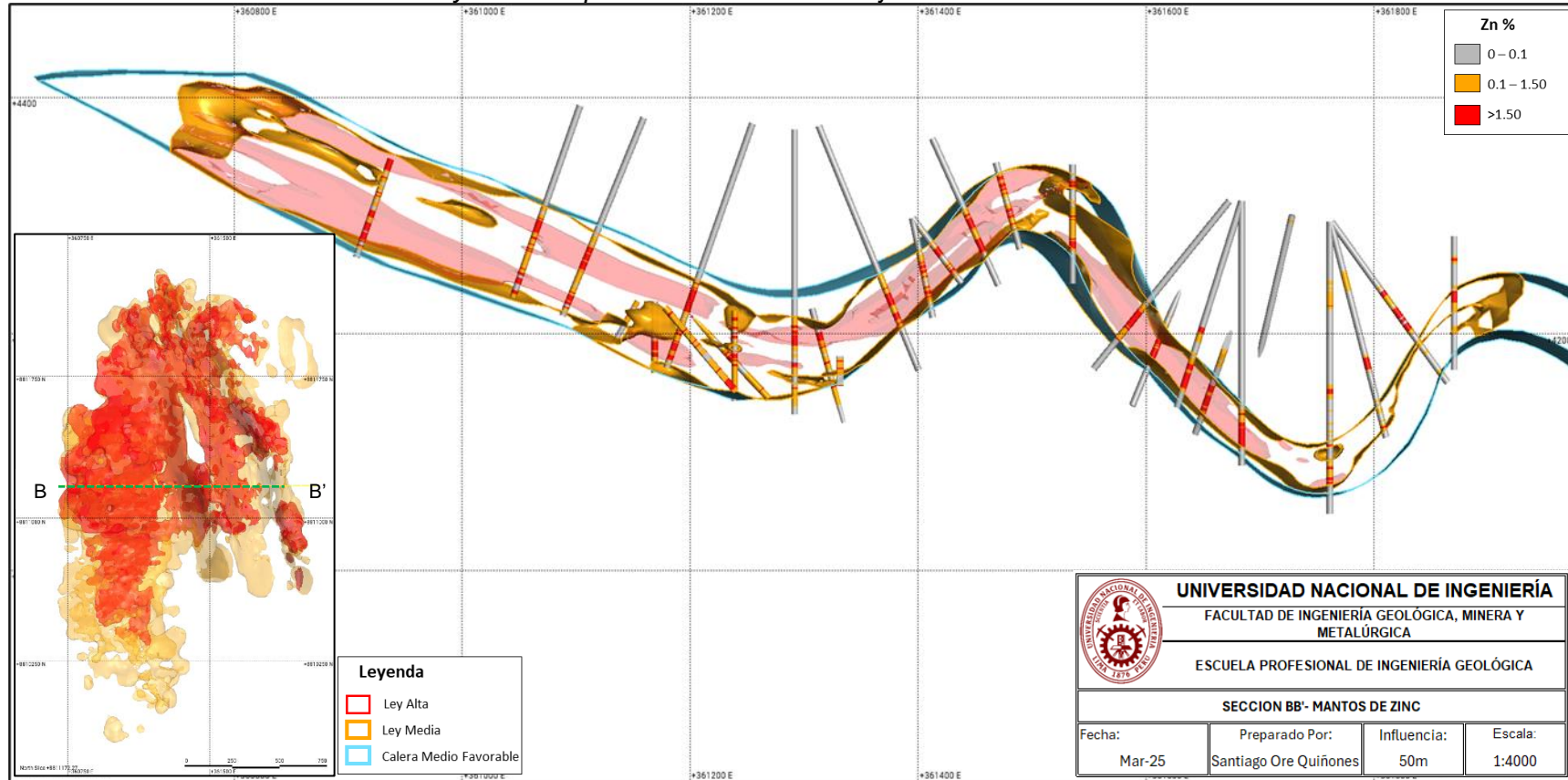
Muestra los sólidos de media y alta ley de Zn.



Nota: Elaboración propia.

Figura 43

Muestra los sólidos modelados en sección y su correspondencia con los sondajes



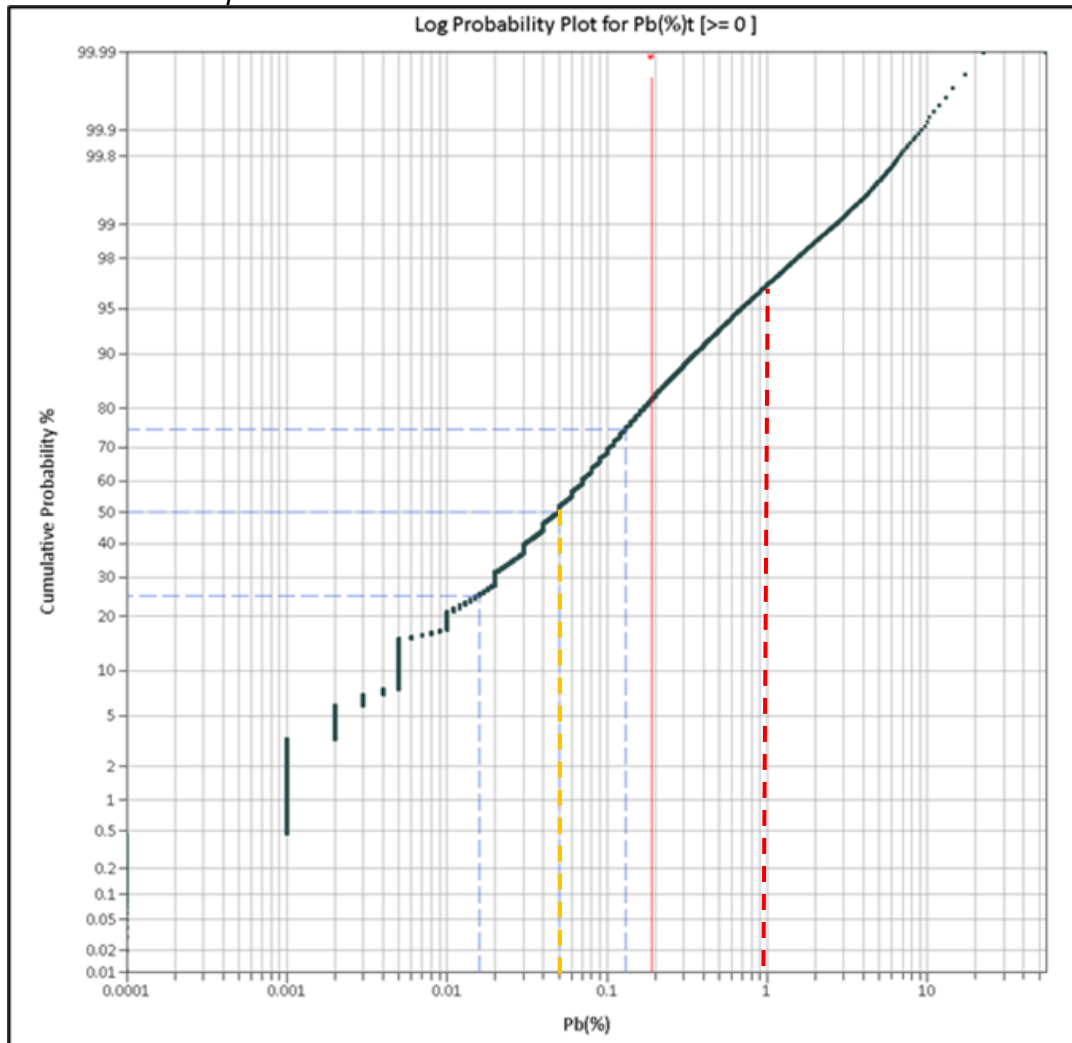
Nota: Elaboración propia.

3.3.3.3 Modelamiento de envoltentes de Plomo. El plomo se modeló considerando los cutoff observados en los gráficos Log-Probabilísticos, en los cuales fue posible definir para una ley media de 0,05% de Pb y una ley alta de 1.0% de Pb.

Las figuras (45,46) que se muestran a continuación corresponden a plantas y secciones del modelamiento realizado en cada una de las unidades del modelo litológico, además, se muestran los sólidos obtenidos a través de los Indicadores de Leapfrog.

Figura 44

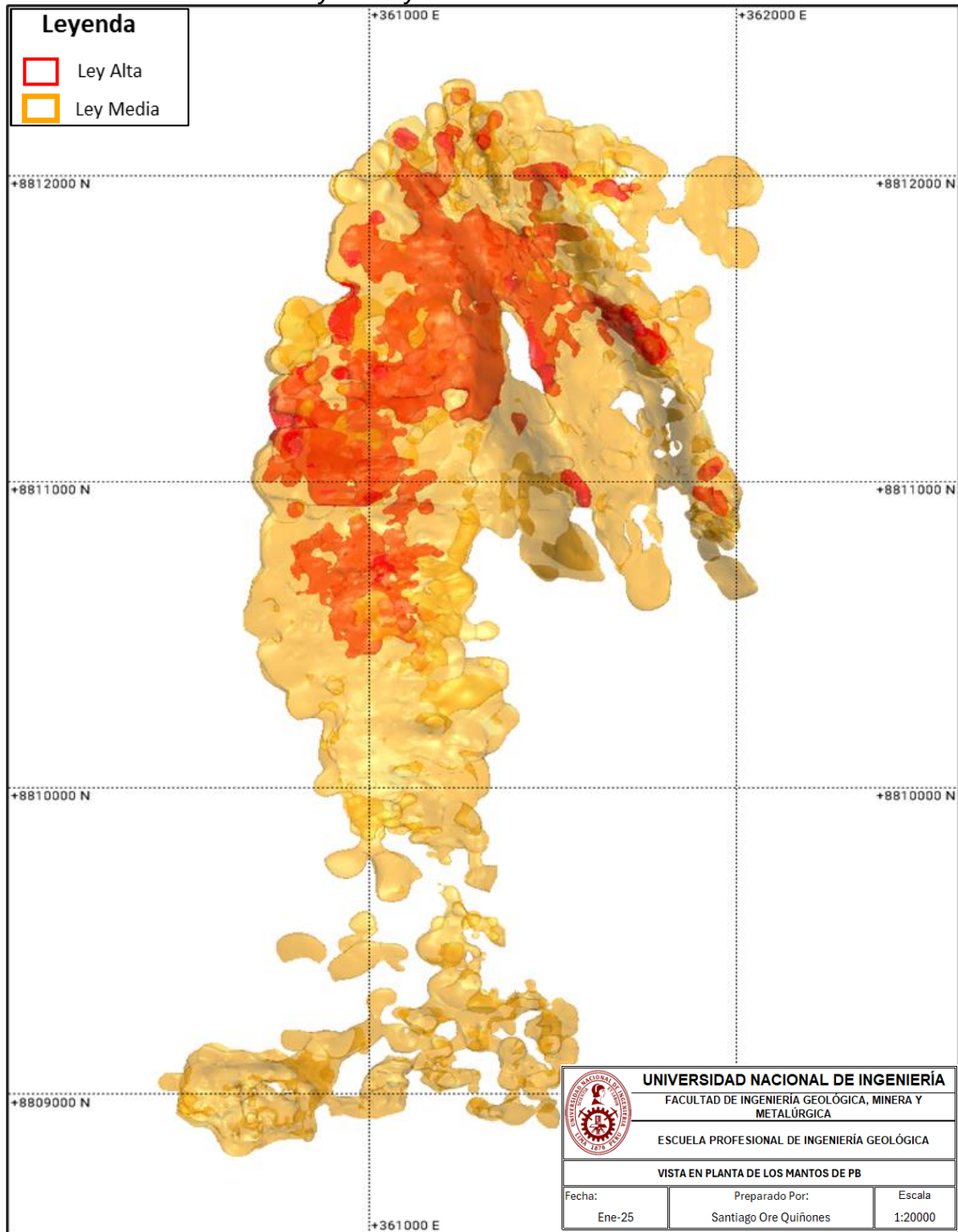
Muestra la curva de probabilidad acumulada de Plomo



Nota: Elaboración propia.

Figura 45

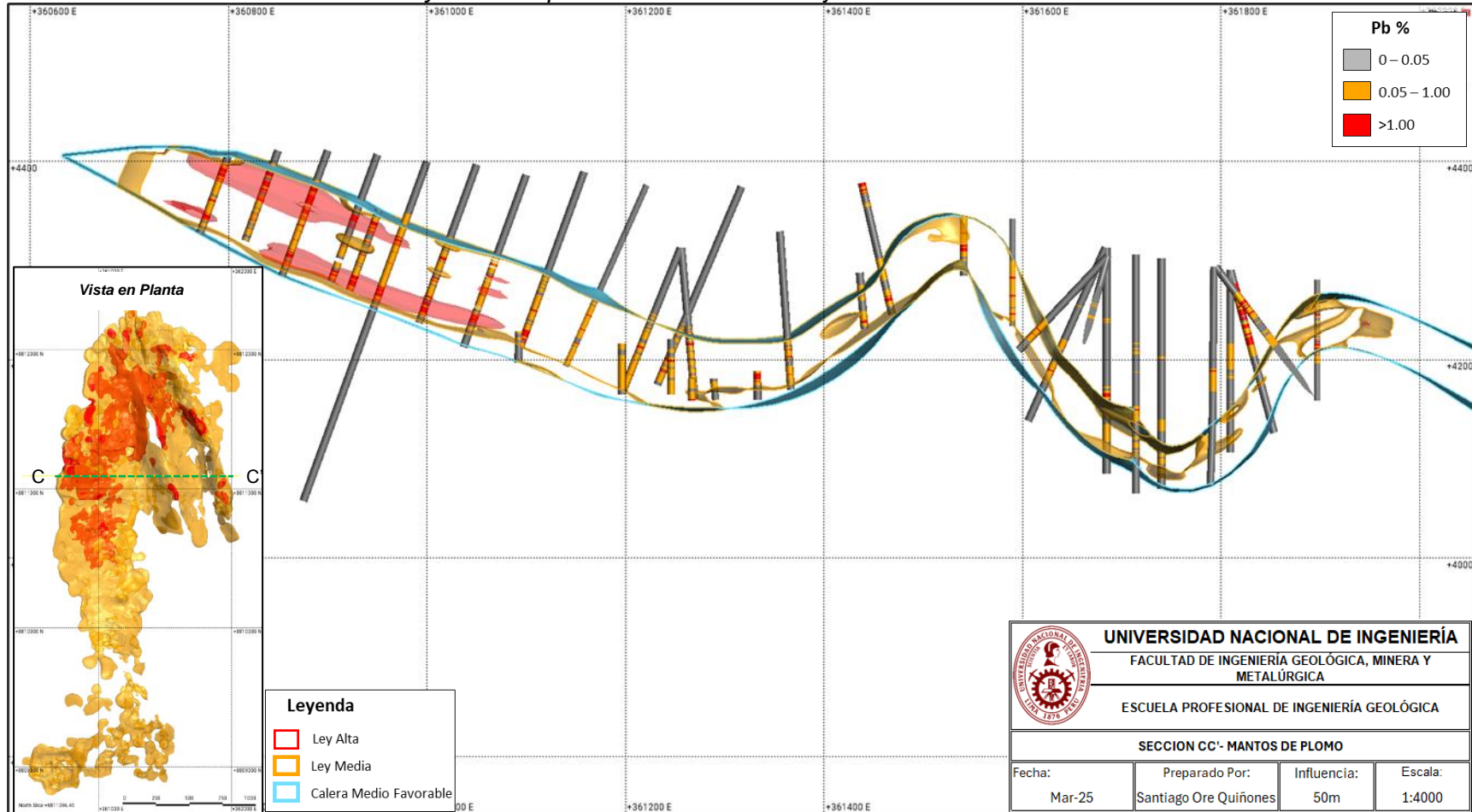
Muestra los sólidos de media y alta ley de Pb



Nota: Elaboración propia.

Figura 46

Muestra los sólidos modelados en sección y su correspondencia con los sondajes



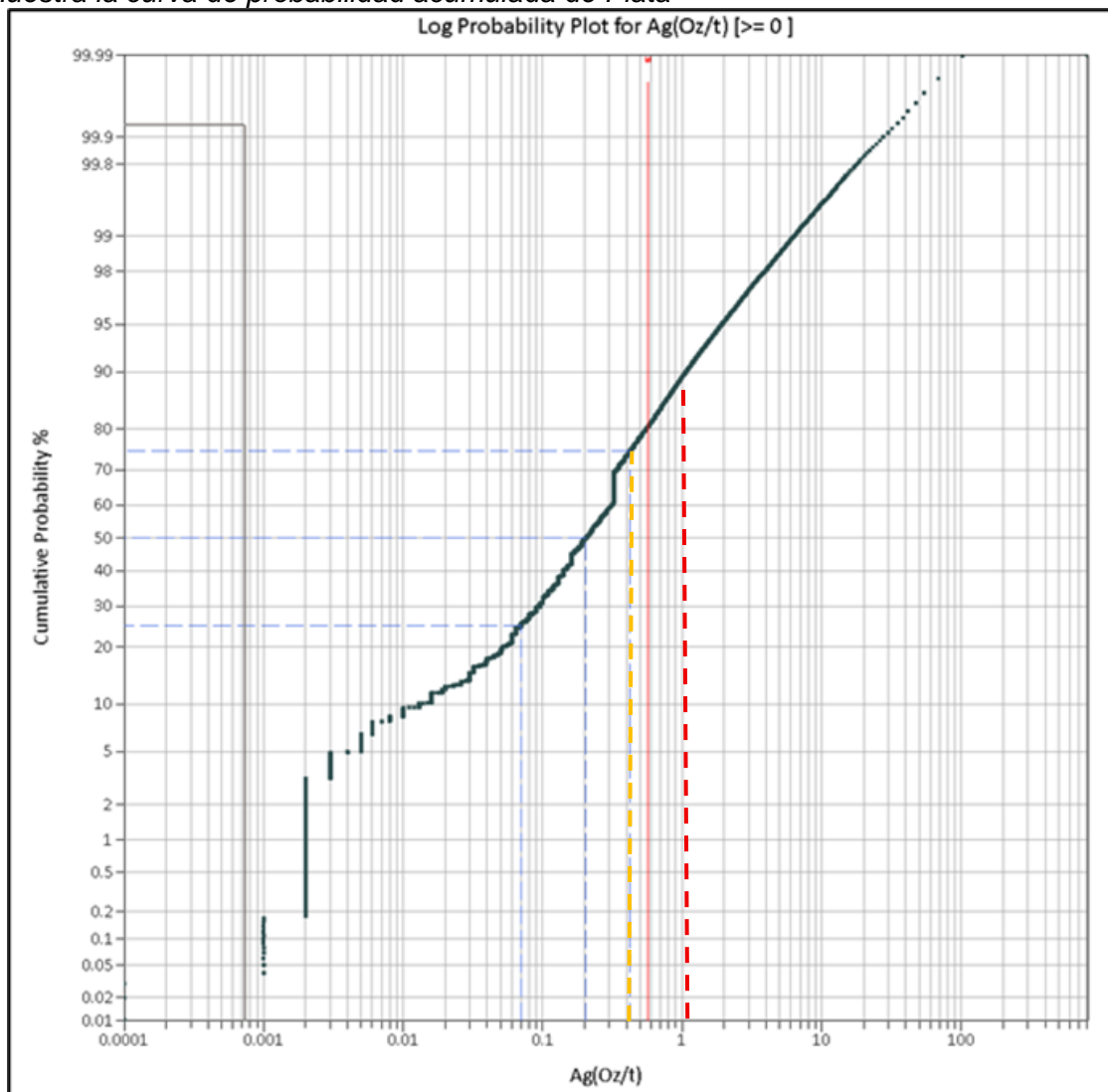
Nota: Elaboración propia.

3.3.3.4 Modelamiento de envoltantes de Plata. La plata se modeló considerando los cutoff observados en los gráficos Log-Probabilísticos, en los cuales fue posible definir para una ley media de 0,32 onzas de Ag y una ley alta de 1.0 onzas de Ag.

Las figuras (48,49) que se muestran a continuación corresponden a plantas y secciones del modelamiento realizado en cada una de las unidades del modelo litológico, además, se muestran los sólidos obtenidos a través de los Indicadores de Leapfrog.

Figura 47

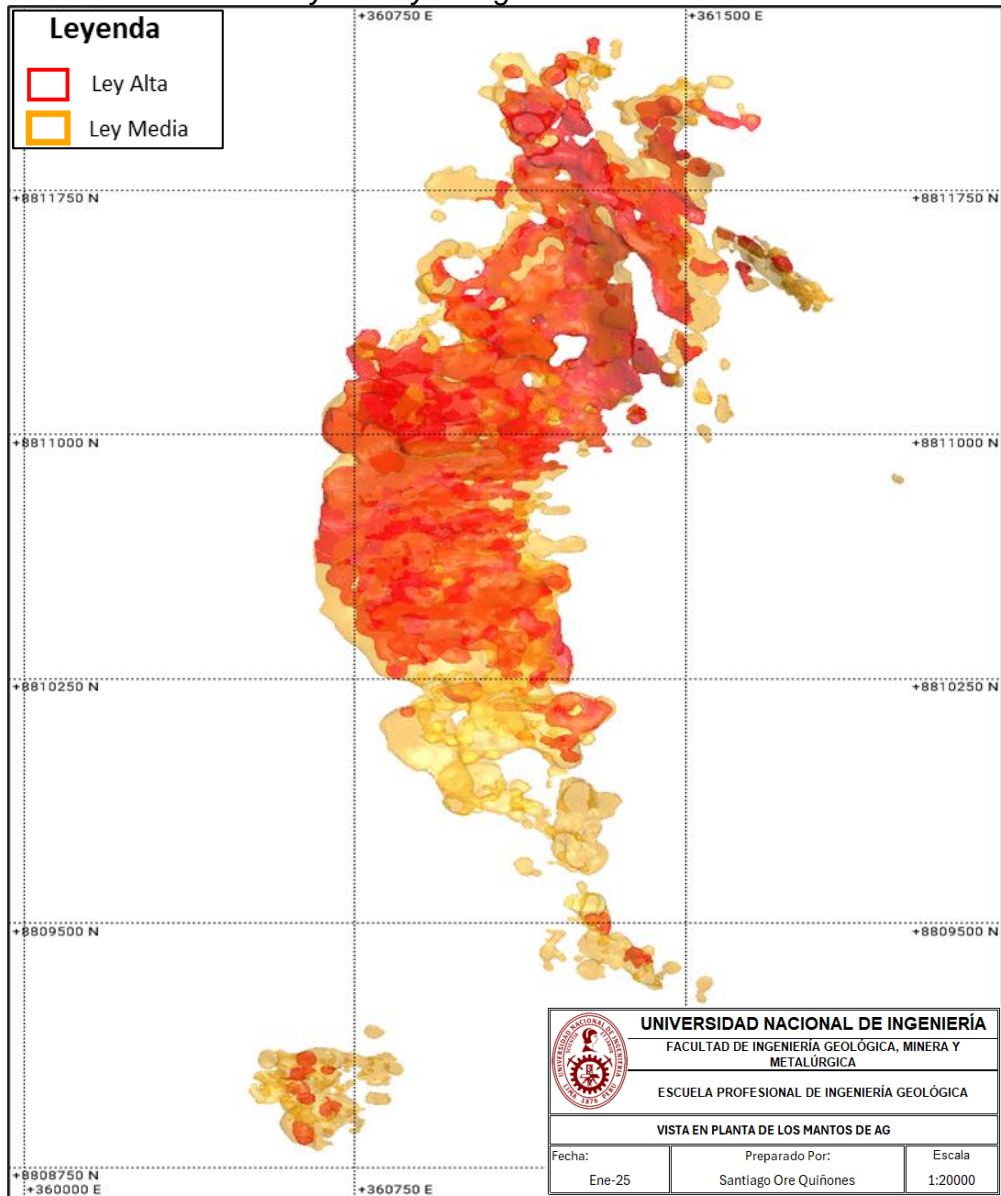
Muestra la curva de probabilidad acumulada de Plata



Nota: Elaboración propia.

Figura 48

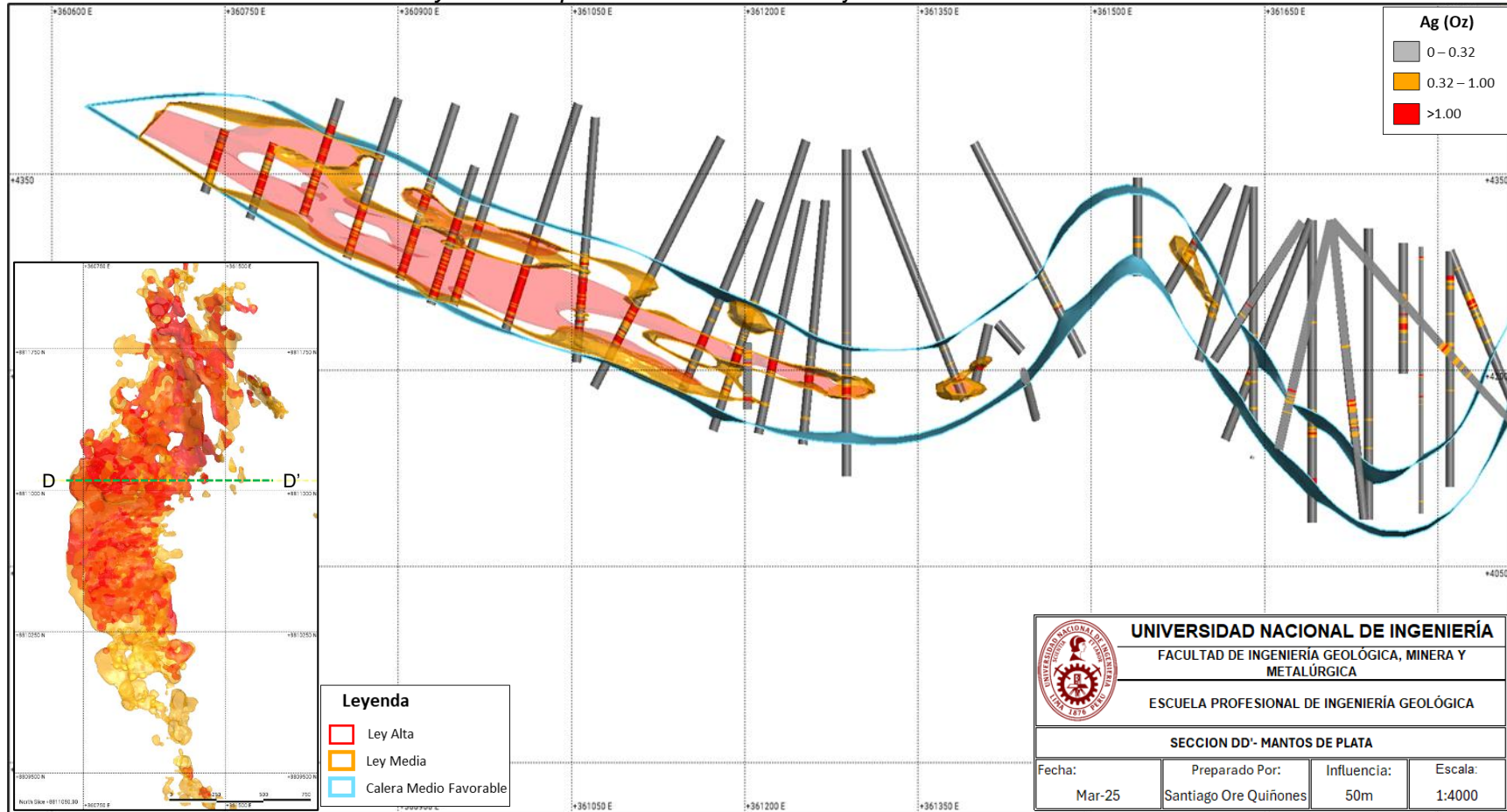
Muestra los sólidos de media y alta ley de Ag.



Nota: Elaboración propia.

Figura 49

Muestra los sólidos modelados en sección y su correspondencia con los sondajes



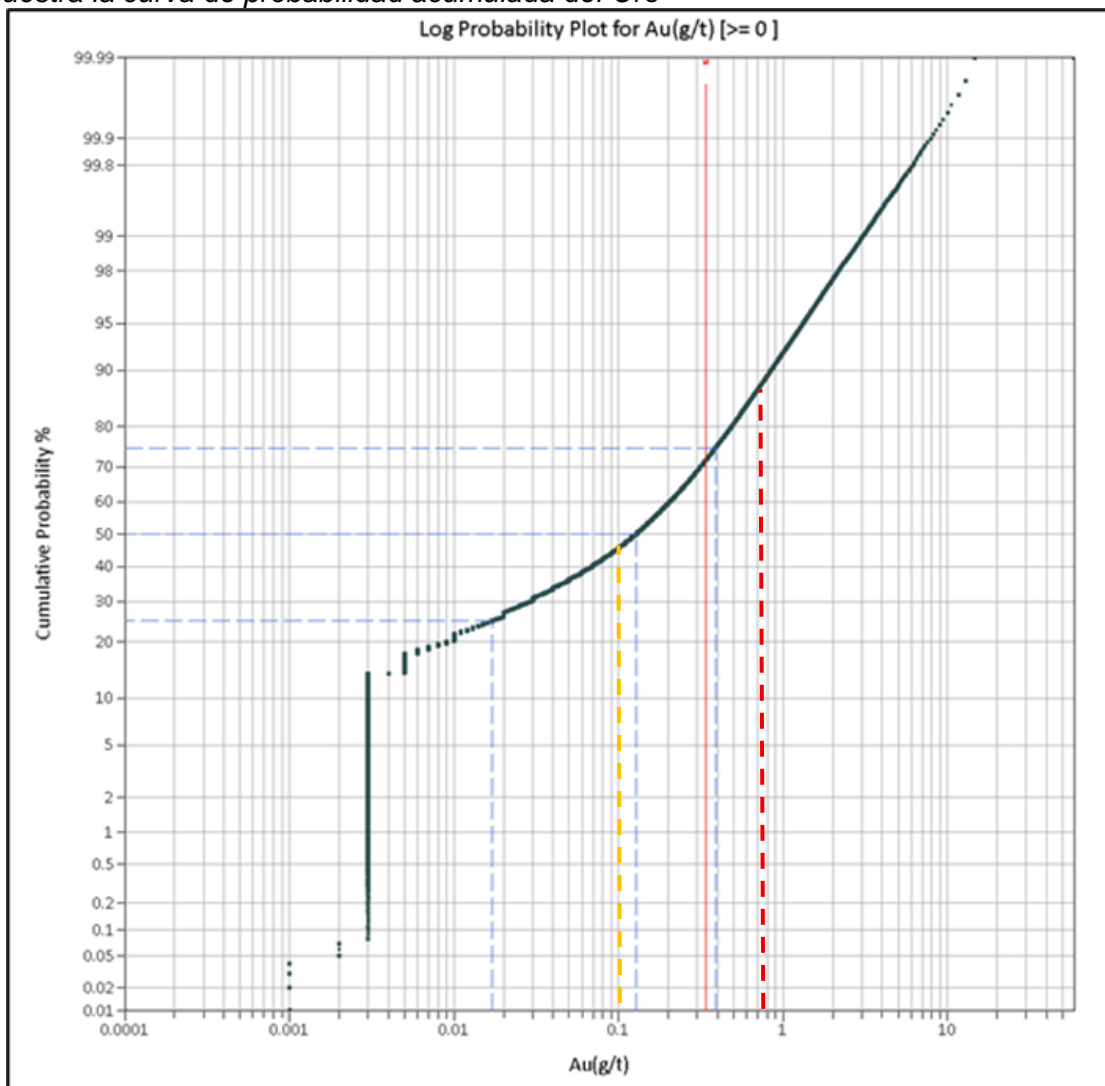
Nota: Elaboración propia.

3.3.3.5 Modelamiento de envoltentes de Oro. El oro se modeló considerando los cutoff observados en los gráficos Log-Probabilísticos, en los cuales fue posible definir para una ley media de 0,1 ppm de Au y una ley alta de 0,8 ppm de Au.

Las figuras (51,52) que se muestran a continuación corresponden a plantas y secciones del modelamiento realizado en cada una de las unidades del modelo litológico, además, se muestran los sólidos obtenidos a través de los Indicadores de Leapfrog.

Figura 50

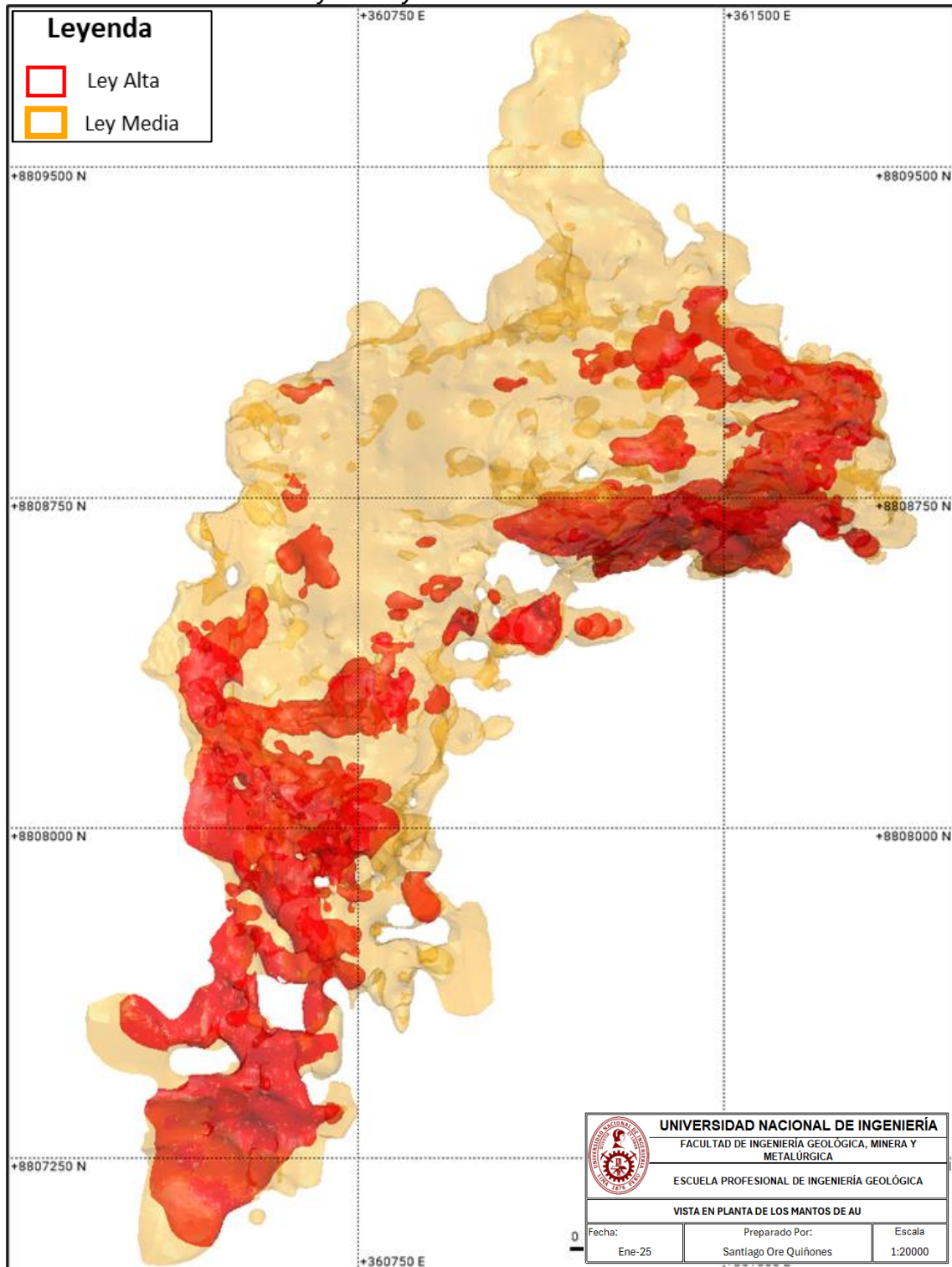
Muestra la curva de probabilidad acumulada del Oro



Nota: Elaboración propia.

Figura 51

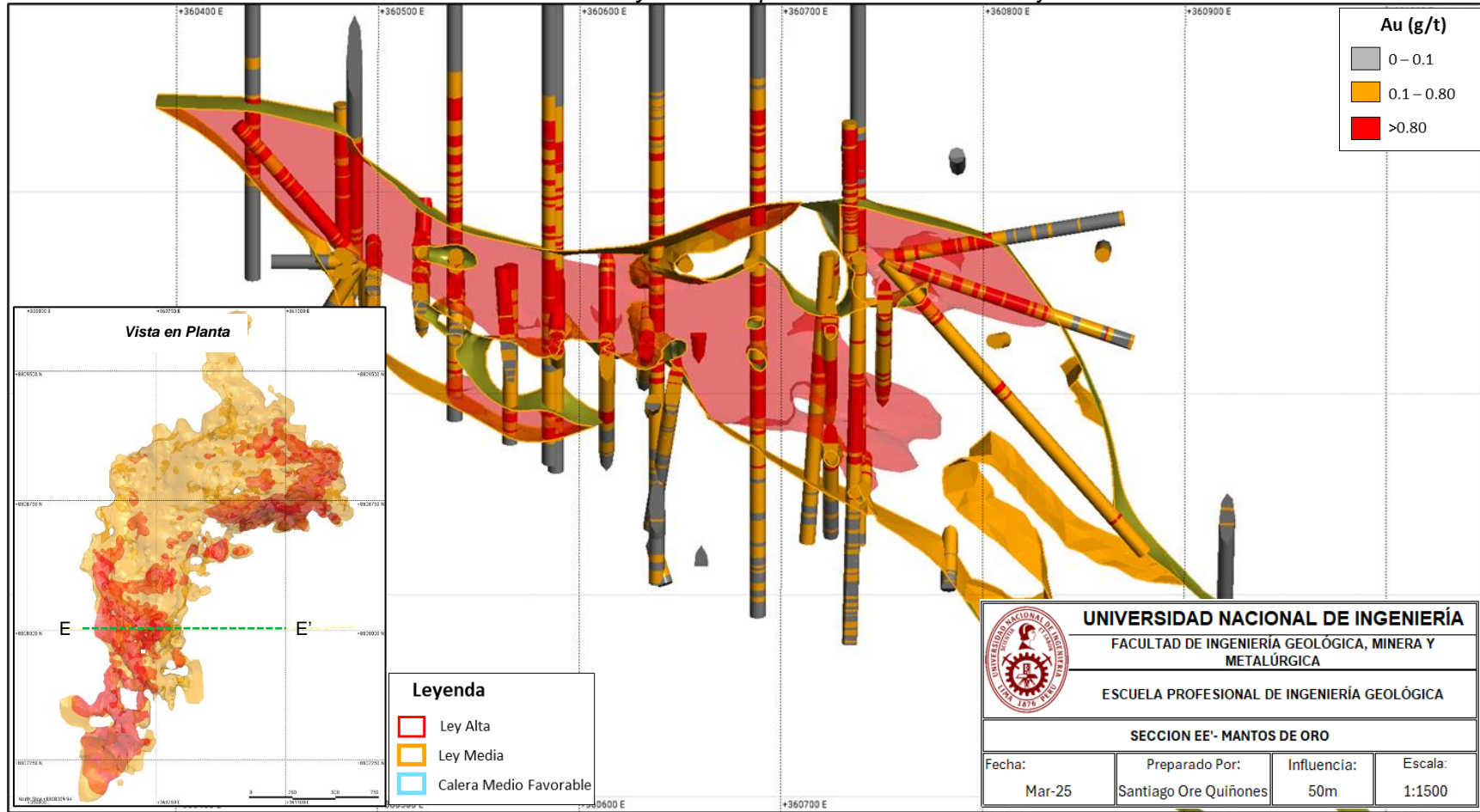
Muestra los sólidos de media y alta ley de Au.



Nota: Elaboración propia

Figura 52

Muestra los sólidos modelados en sección del manto de Oro y su correspondencia con los sondajes



Nota: Elaboración propia.

3.4 Estimación de recursos minerales.

Se ha estimado los recursos minerales de la mina El Brocal, con fecha efectiva de cierre de base de datos al 31 de diciembre 2020. El Brocal es una mina que posee operaciones a tajo abierto y subterránea, y realiza una estimación de recursos de manera independiente.

Esta sección describe la metodología de estimación de recursos.

El modelo de recursos minerales fue elaborado sobre una base de datos de 4,508 taladros diamantinos, haciendo un total de 548,935 m.

Se emplea el software Vulcan para la estimación de las leyes de oro, cobre plata, plomo y zinc. debido a su robustez en la aplicación de técnicas geoestadísticas avanzadas, entre ellos el krigeado ordinario con anisotropía dinámica, el cual es esencial para manejar la variabilidad espacial en depósitos con estructuras plegadas

3.4.1 Pasos para la estimación de recursos minerales.

La metodología de evaluación de recursos implicó los siguientes procedimientos:

- Compilación y verificación de bases de datos.
- Elaboración del modelo geológico.
- Análisis exploratorio de datos (EDA).
- Análisis variográfico.
- Estimación de leyes.
- Validación de la estimación de leyes.
- Clasificación de recursos minerales.
- Evaluación de “perspectivas razonables de extracción económica”.
- Reporte de recursos minerales.

3.4.2 Base de datos de recursos.

La base de datos de la mina se almacena en el software de gestión de información geológica acQuire e incluye todos los sondajes realizados con un total de 4,508 sondajes que suman 548,935 m, tal como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9*Muestra los sondeos por campañas de perforación*

CAMPAÑA	N° DRILLHOLES	METROS(M)
1969 - 2000	436	70,578.00
2002 - 2010	779	181,112.00
2011	61	4,609.00
2012	54	5,743.00
2013	40	3,735.00
2014	51	16,915.00
2016	67	9,998.00
2017	363	14,297.00
2018	592	44,211.00
2019	422	27,531.00
2020	330	24,016.00
2021	661	77,261.00
2022	511	55,331.00
2023	141	13,598.00
TOTAL	4,508	548,935.00

Nota: Elaboración propia.

3.4.3 Análisis Exploratorio de Datos (EDA).

Para realizar el EDA se definieron dominios conformados por la litología y el manto mineralizado.

Tabla 10*Muestra la definición de dominios de estimación*

LITOLOGÍA	CÓDIGO	ENVOLVENTE DE LEY	CÓDIGO
Calera_Inferior	2	Baja Ley	1
Calera_Medio Favorable	3	Media Ley	2
Calera_Medio Varvado	4	Alta Ley	3
Calera_Superior	5		
Conglomerado_Shuco	6		
Conglomerado_Transicional	7		
Dac_porfirítica	8		
Dep_piroclástico	9		
Mitu	10		

* Dominio = 10 * Código Litología + Código de Envolverte

Tabla 11

Muestra la estadística básica de los datos por dominio

Litología	Envolvente	Dominio	Cu (%)			Zn (%)			Pb (%)			Ag(g/t)			Au(g/t)			
			Código	Código	Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean
2		1	21	10,476	0.07	4.18	10,957	0.04	5.47	8,370	0.03	7.93	11,945	0.13	4.26	6,571	0.02	2.35
		2	22	1,774	0.94	1.21	1,271	0.65	1.15	4,174	0.18	2.19	774	0.8	1.85	3,995	0.29	1.05
		3	23	283	3.64	0.86	343	2.54	0.57				14	1.57	0.32	130	2.29	0.75
3		1	31	43,795	0.05	5.04	27,835	0.05	4.77	17,002	0.02	4.25	47,279	0.18	5.5	19,420	0.02	4.92
		2	32	11,251	0.94	1.34	22,771	0.71	1.35	47,643	0.33	1.78	13,517	0.8	2.11	9,035	0.37	2.06
		3	33	3,827	3.97	0.92	24,028	3.61	0.93	9,640	2.66	1.15	12,658	4.45	2.57	2,070	1.58	0.81
4		1	41	13,745	0.01	14.9	10,710	0.04	5.47	11,141	0.01	6.87	14,123	0.08	6.35	7,168	0.01	5.8
		2	42	50	0.86	1.25	2,214	0.66	1.45	3,007	0.37	1.39	358	0.81	2.08	98	0.62	1.1
		3	43				1,604	3.15	0.91	352	1.91	0.92	32	2.1	0.56			
5		1	51	9,956	0.004	3.55	6,729	0.04	5.37	7,554	0.03	5.88	10,103	0.08	3.78	6,097	0.01	2.14
		2	52				1,869	0.85	1.36	2,476	0.56	1.39	256	1.16	1.75			
		3	53				1,776	3.4	0.98	325	2.09	1.07						
6		1	61	30,010	0.13	2.26	71,093	0.01	5.49	32,901	0.02	2.56	35,889	0.18	1.84	12,501	0.04	1.94
		2	62	42,794	0.87	1.2	2,859	0.53	1.84	41,372	0.16	1.58	36,541	0.67	1.54	49,063	0.37	0.78
		3	63	7,525	3.96	0.93	321	4.2	0.95				7,513	2.89	2.15	16,554	1.62	0.88
7		1	71	18,610	0.11	3.05	35,111	0.02	7.79	16,433	0.02	1.11	27,911	0.19	5.01	8,693	0.03	1.65
		2	72	18,628	0.95	1.49	1,611	0.74	1.52	20,401	0.13	1.26	9,127	0.82	2.01	25,910	0.33	0.88
		3	73	1,228	4.05	0.93	118	2.59	0.85				1,176	3.66	1.75	2,889	1.59	1.11
8		1	81	31,444	0.09	5.3	24,818	0.02	7.12	14,436	0.03	2.46	23,856	0.2	3.71	27,648	0.04	2.66
		2	82	8,797	1	1.54	359	0.45	1.73	10,741	0.14	2.74	18,251	0.57	1.68	17,175	0.3	1.46
		3	83	918	3.81	0.97							1,838	3.18	1.83	434	1.59	1.05
9		1	91	1,648	0.13	4.66	1,561	0.03	2.77	1,561	0.03	2.07	1,561	0.1	2.76	1,262	0.03	2.31
		2														172	0.32	1.02
		3																
10		1	101	9,893	0.15	3.14	10,386	0.02	5.05	8,228	0.03	5.55	10,017	0.15	2.7	9,186	0.04	2.06
		2	102	3,605	0.91	1.43	353	0.4	1.44	2,510	0.12	2.01	3,551	0.53	1.29	4,331	0.25	1.17
		3	103	213	3.83	0.96							87	3.57	1.21			

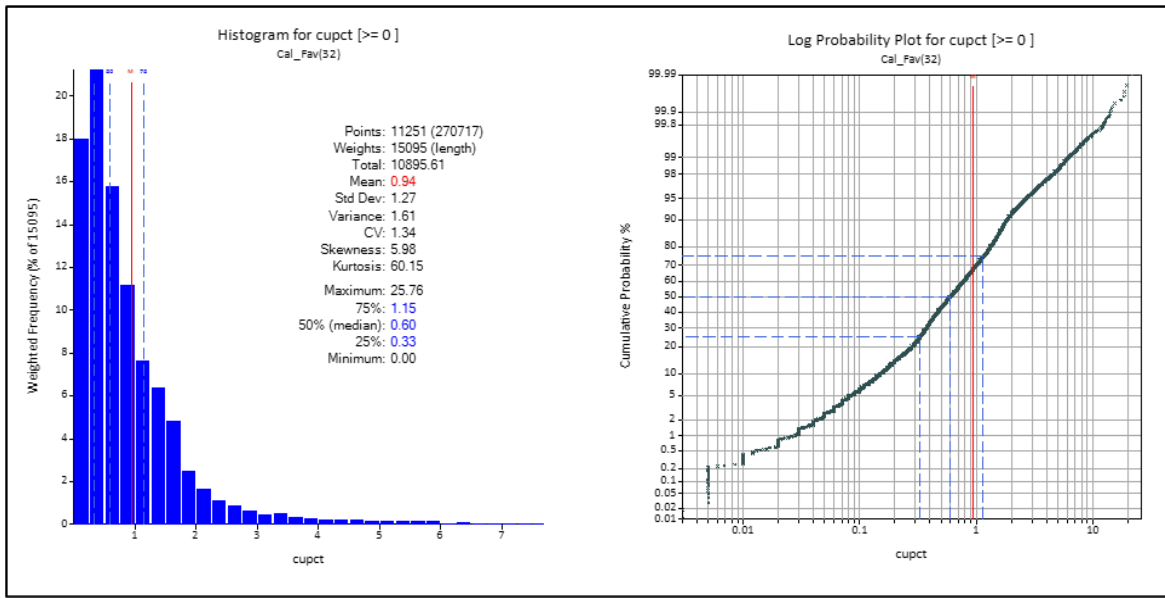
Nota: Elaboración propia.

3.4.3.1 Histogramas y Curvas de probabilidad acumulada. Se realizó los

histogramas y los gráficos de probabilidad acumulada por dominio y por elemento con el fin de analizar las distribuciones de las leyes.

Figura 53

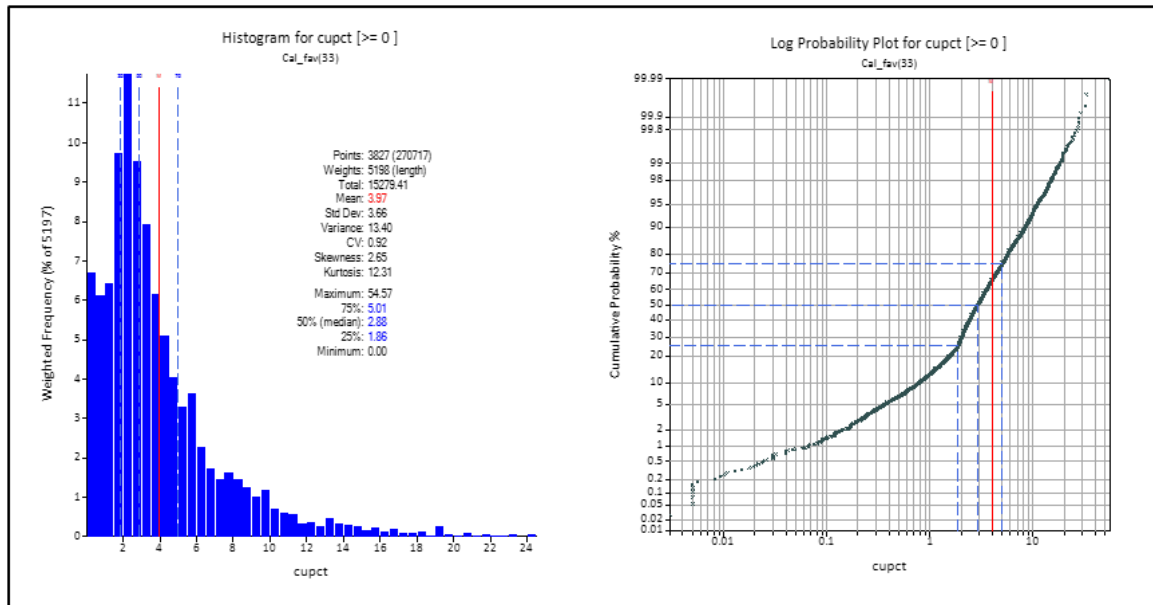
Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley media de Cu en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 54

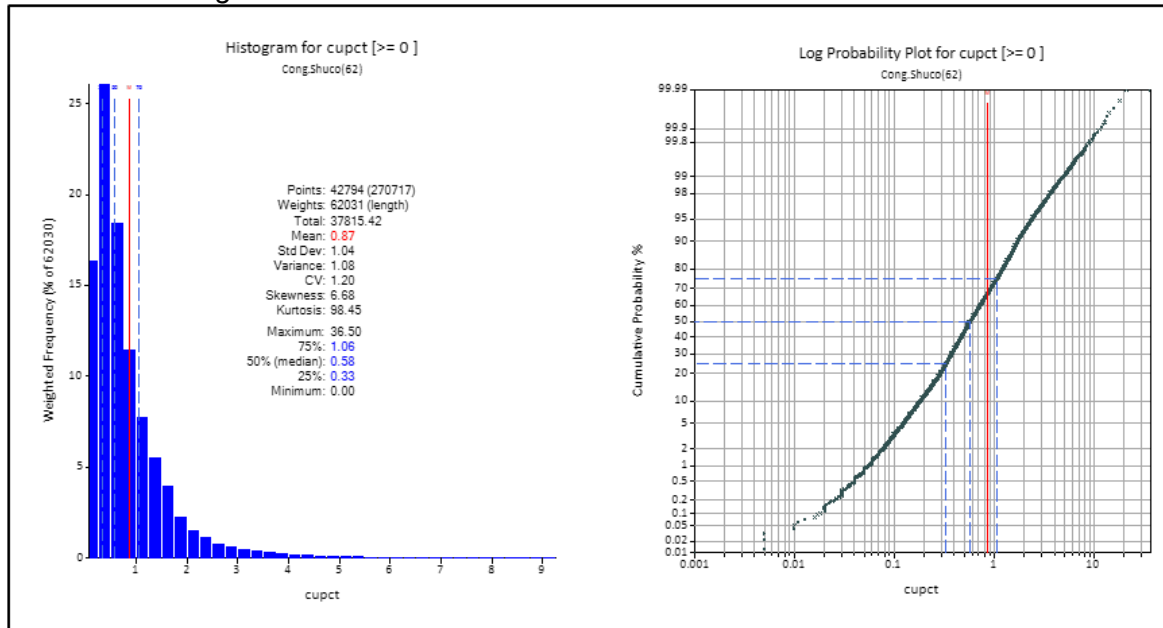
Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley alta de Cu en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 55

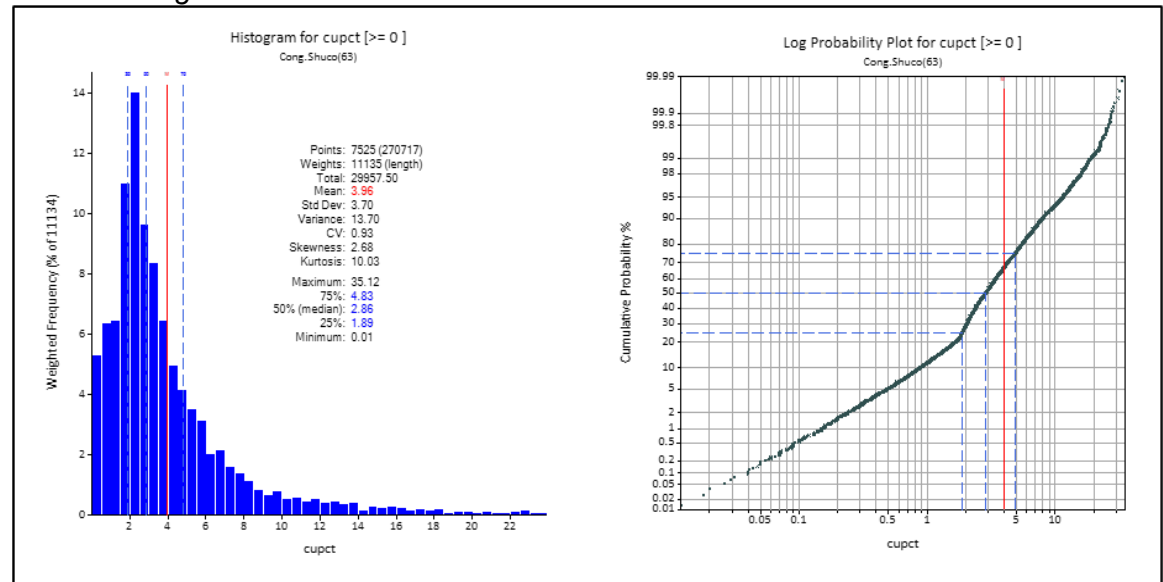
Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley media de Cu en el Conglomerado Shuco



Nota: Elaboración propia.

Figura 56

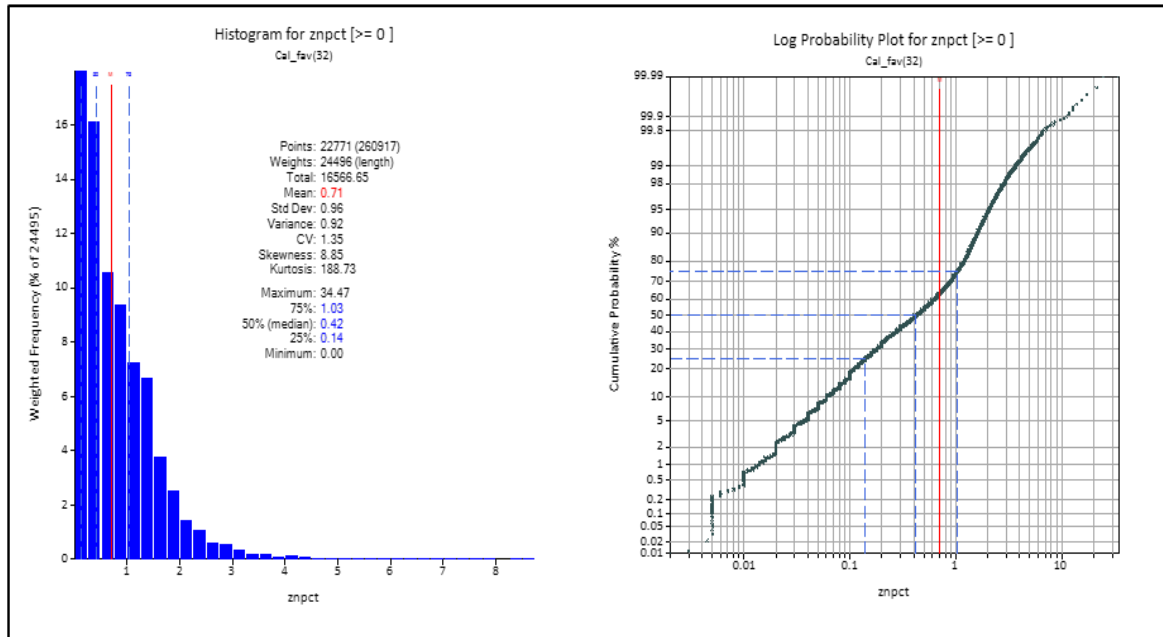
Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley alta de Cu en el Conglomerado Shuco



Nota: Elaboración propia.

Figura 57

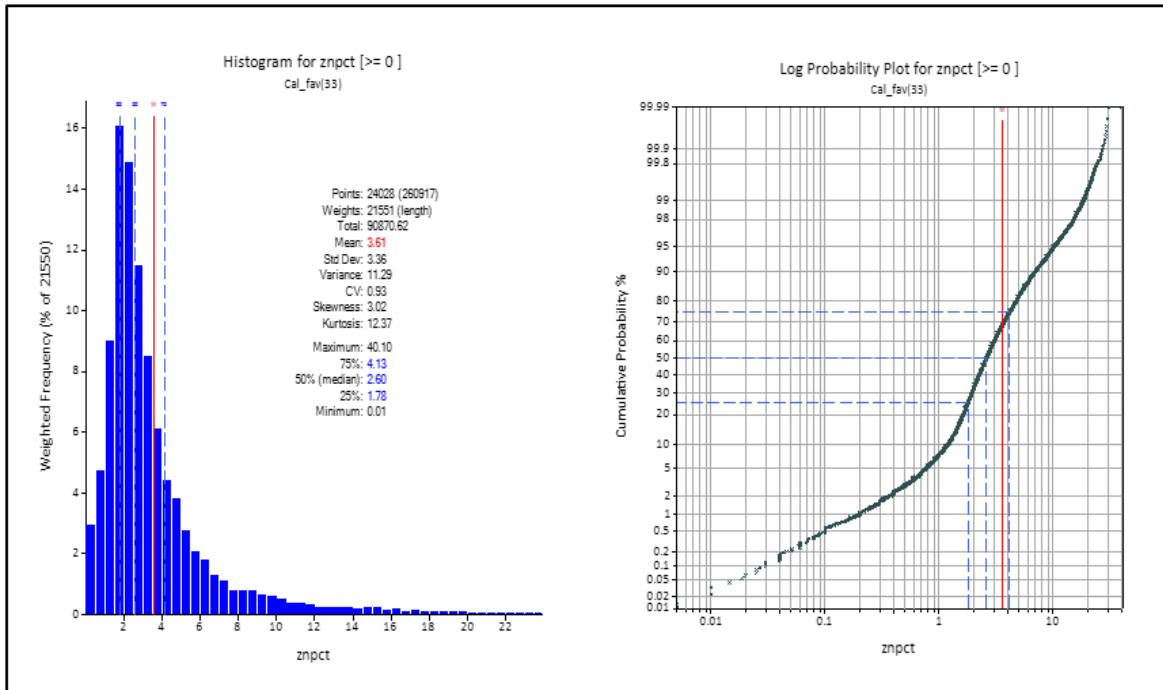
Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley media de Zn en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 58

Muestra el histograma y la curva de probabilidad acumulada para el dominio de ley alta de Zn en el Calera Medio Favorable

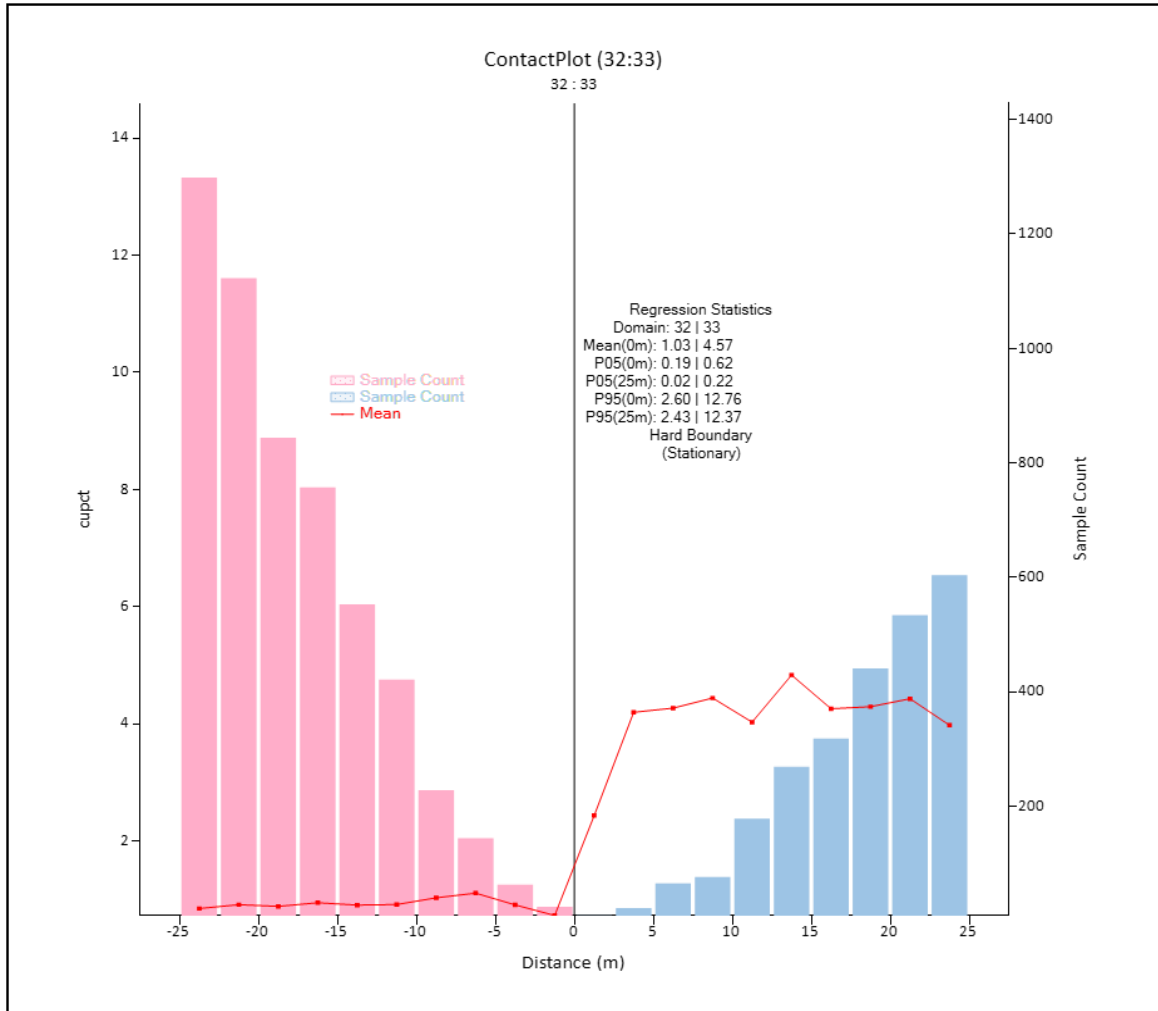


Nota: Elaboración propia.

3.4.3.2 Análisis de Contacto. Se realizó el análisis de contacto para determinar el tipo de contacto que existe entre el dominio de ley media y el dominio de ley alta.

Figura 59

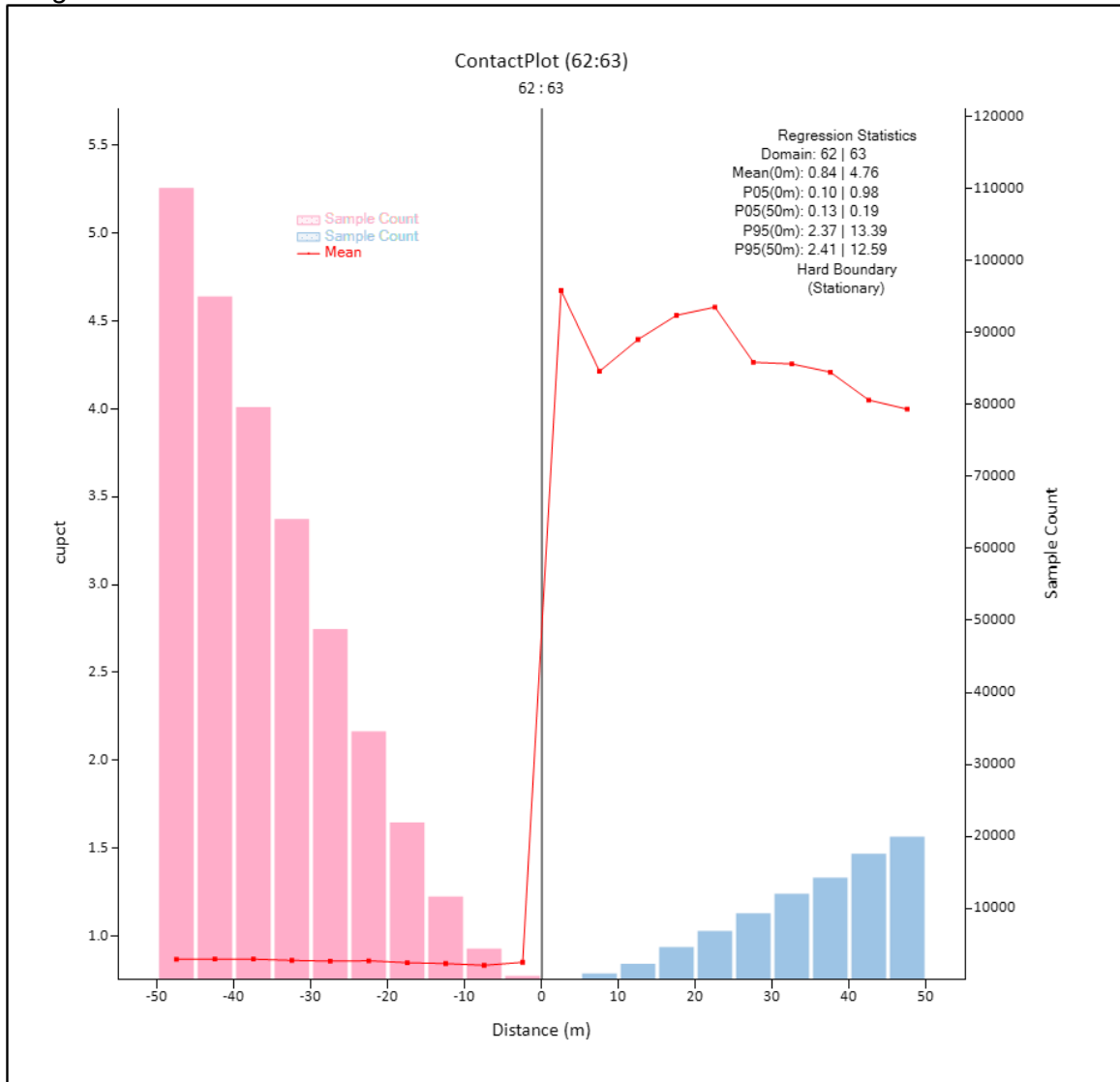
Muestra el análisis de contacto para el dominio de media y alta ley de Cu en el Calera Medio Favorable. Nótese un contacto duro



Nota: Elaboración propia.

Figura 60

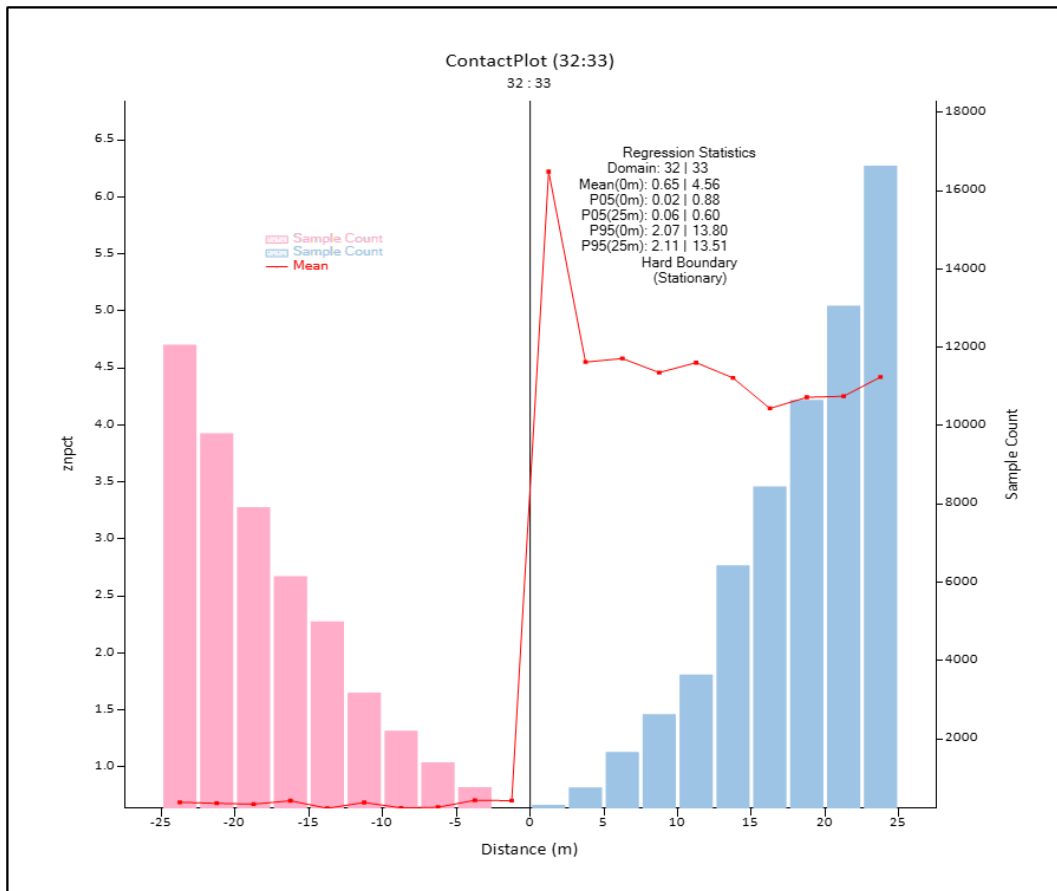
Muestra el análisis de contacto para el dominio de media y alta ley de Cu en el Conglomerado Shuco. Nótese un contacto duro



Nota: Elaboración propia.

Figura 61

Muestra el análisis de contacto para el dominio de media y alta ley de Zn en el Calera Medio Favorable. Nótese un contacto duro



Nota: Elaboración propia.

3.4.4 Análisis y tratamiento de altos erráticos (Capping).

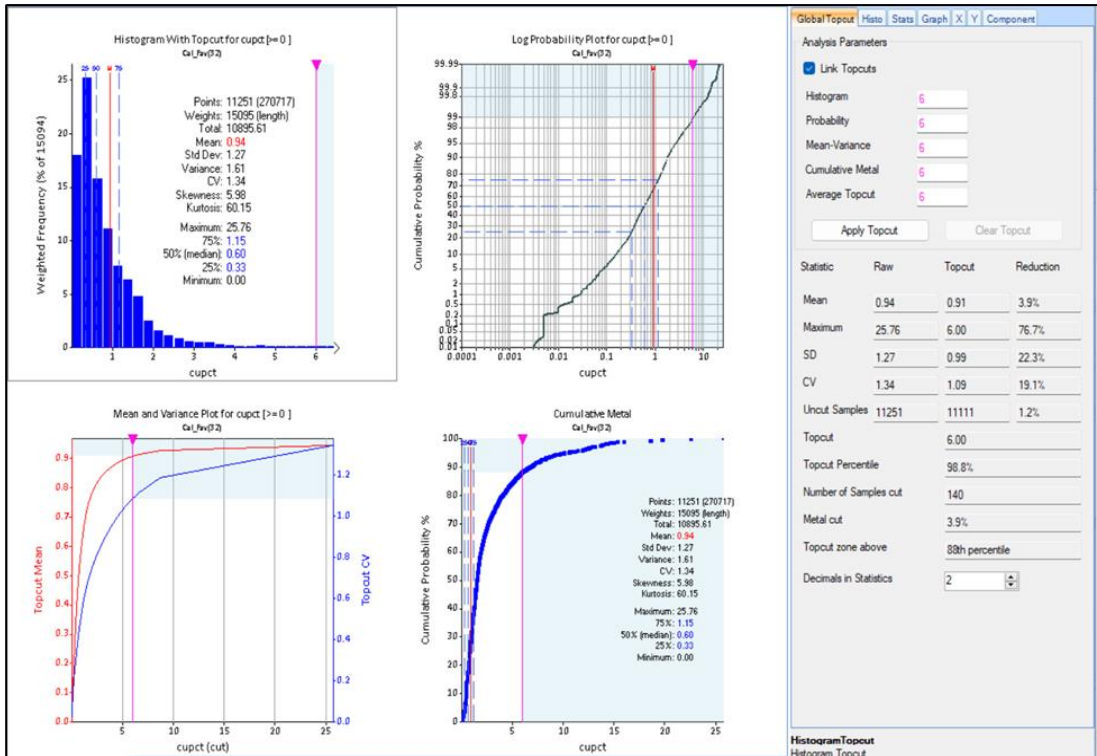
Se ha realizado un estudio para el acotamiento de los valores altos anómalos o erráticos para cada elemento, usando los datos sin compositar. El objetivo de este estudio es restringir la influencia de las leyes muy altas en la estimación, lo cual puede resultar en la sobreestimación de los Recursos Minerales. El análisis realizado para determinar los valores de restricción de leyes altas se basa en la inspección de los gráficos de la curva de probabilidad acumulada considerando una ruptura pronunciada como un umbral de recorte de leyes altas. La pérdida de contenido metálico no excedió el 5%, además se observó una reducción del coeficiente de variación. (CV)

Análisis del alto errático del Cobre.

Se realizó el análisis en cada domino, determinando el valor en base a la curva de probabilidad acumulada y al análisis de top cut.

Figura 62

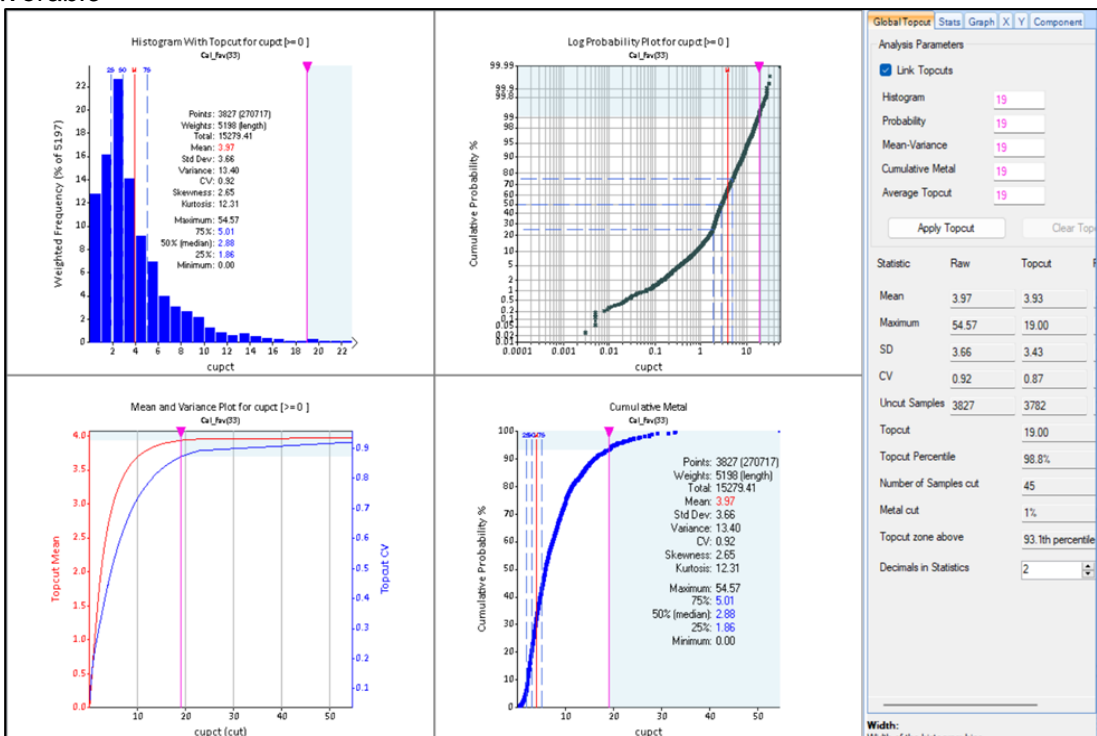
Muestra el análisis de capping para el dominio de media ley de Cu en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 63

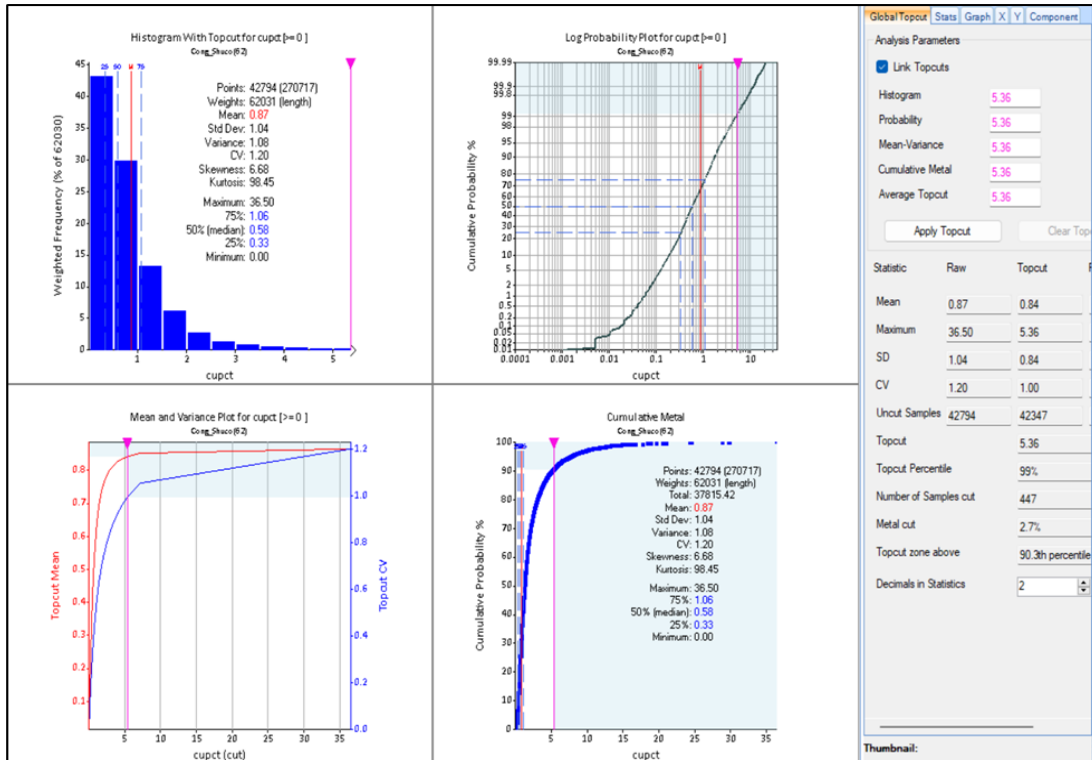
Muestra el análisis de capping para el dominio de alta ley de Cu en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 64

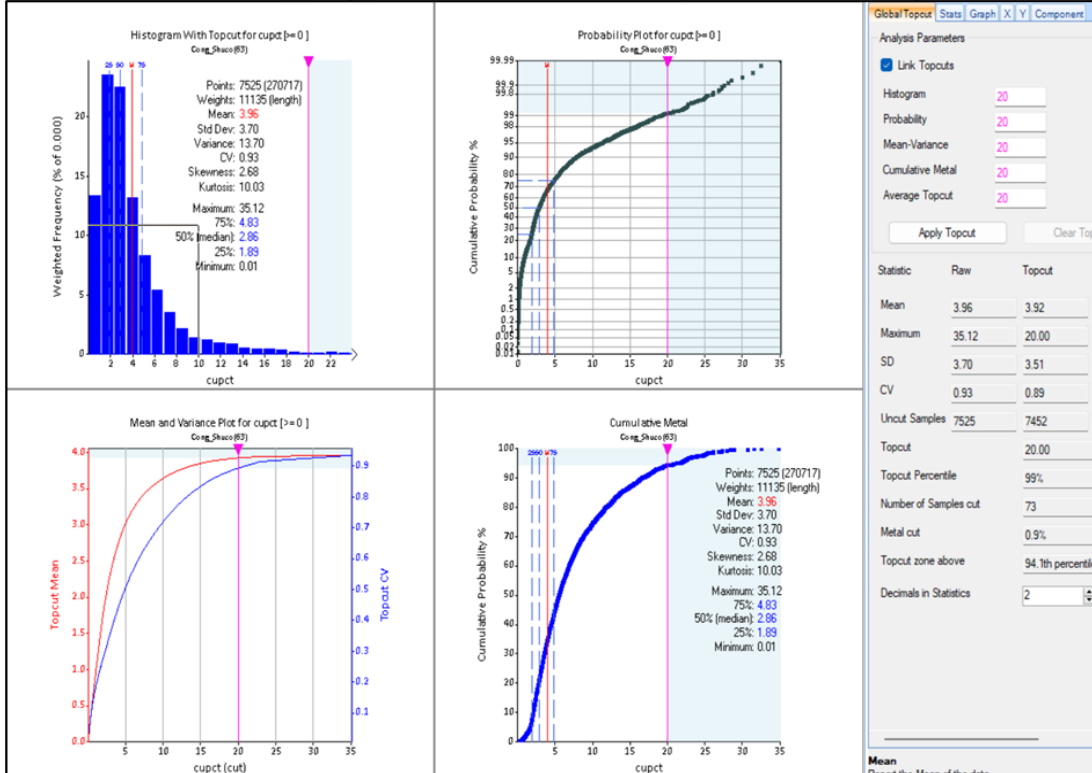
Muestra el análisis de capping para el domino de media ley de Cu en el Conglomerado Shuco



Nota: Elaboración propia.

Figura 65

Muestra el análisis de capping para el domino de alta ley de Cu en el Conglomerado Shuco



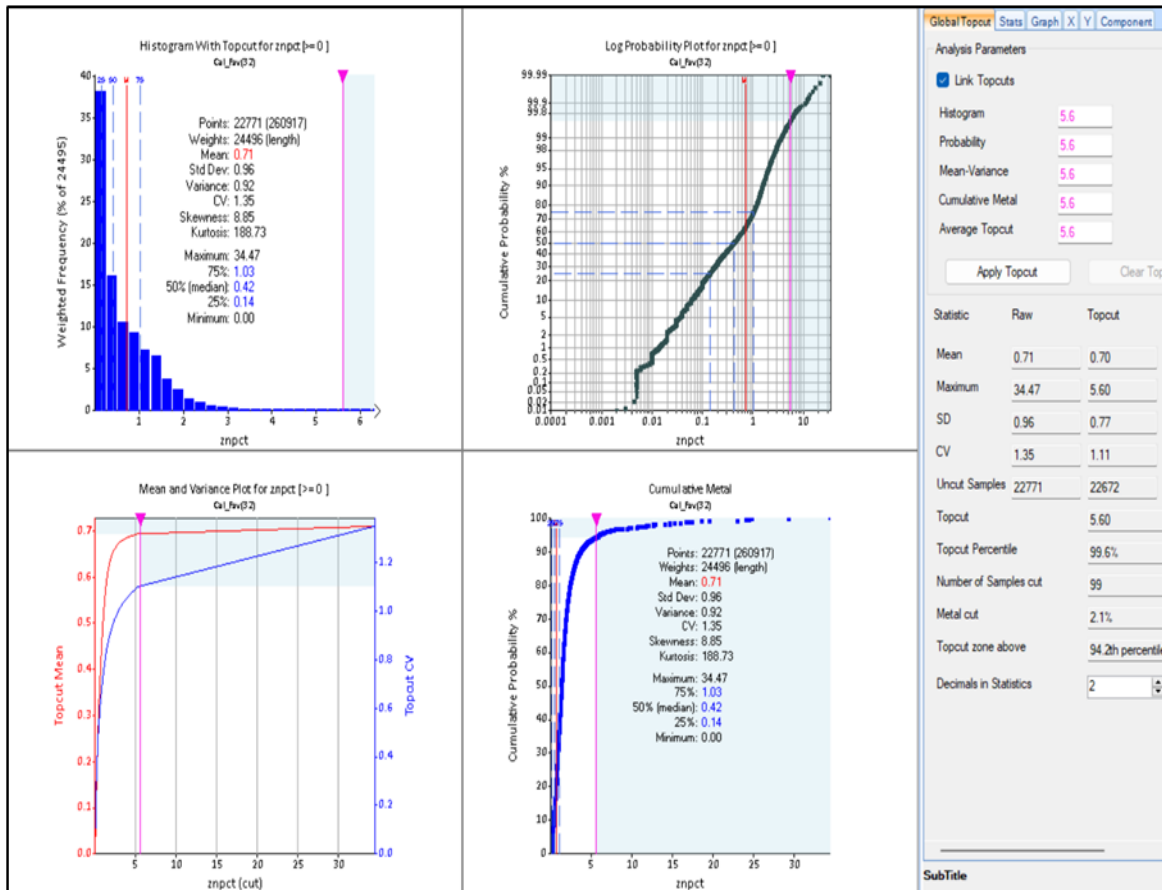
Nota: Elaboración propia.

Análisis del alto errático del Zinc.

Se realizó el análisis en cada domino, determinando el valor en base a la curva de probabilidad acumulada y al análisis de top cut.

Figura 66

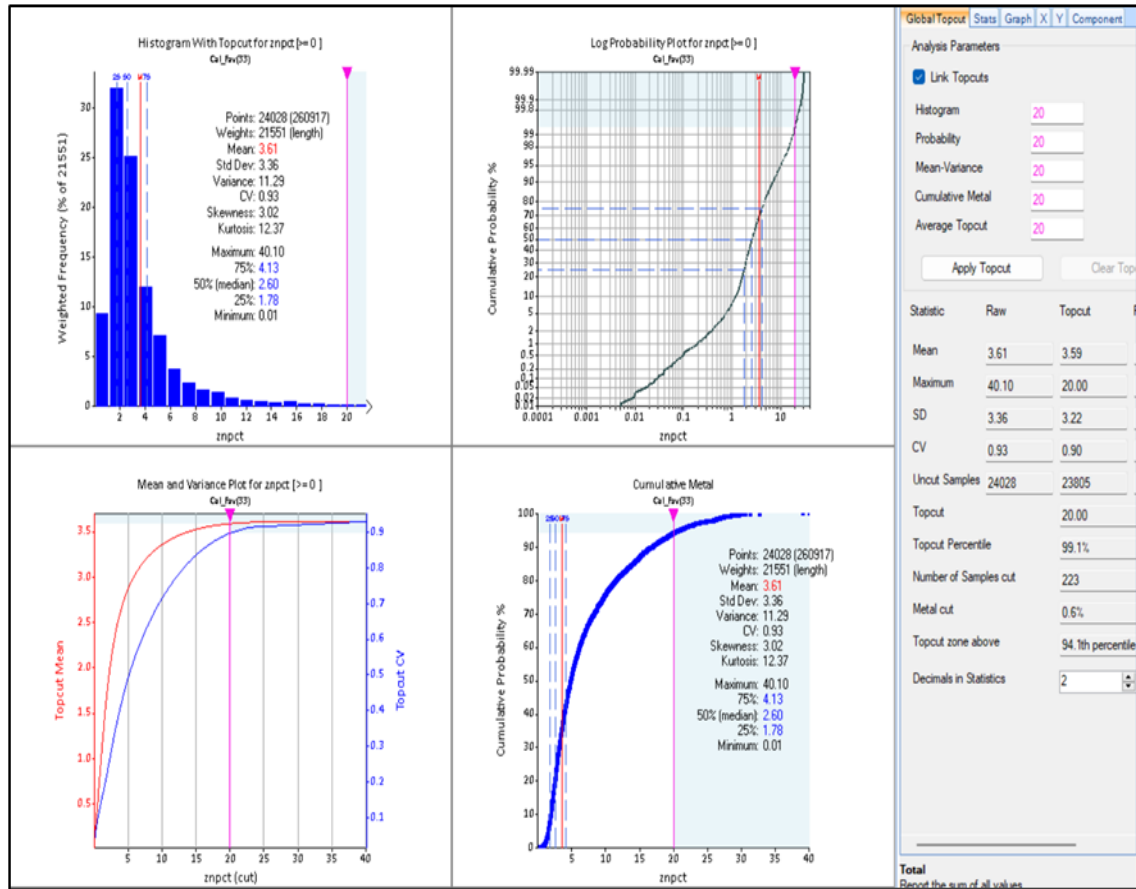
Muestra el análisis de capping para el domino de media ley de Zn en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 67

Muestra el análisis de capping para el domino de alta ley de Zn en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Tabla 12*Muestra los valores de capping por cada dominio de estimación*

Litología Código	Envolvente Código	Dominio	Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Ag(g/t)	Au(g/t)
			CAPPING	CAPPING	CAPPING	CAPPING	CAPPING
2	1	21	3.15	4.37	2.42	3.50	0.28
	2	22	6.39	3.60	3.15	3.44	1.87
	3	23	11.95	7.12		2.54	6.00
3	1	31	6.71	3.42	1.55	12.00	1.00
	2	32	6.04	5.69	7.16	16.65	4.56
	3	33	19.00	20.44	20.00	86.00	7.00
4	1	41	3.22	2.23	1.00	4.50	0.70
	2	42	6.00	4.23	2.80	7.62	2.27
	3	43		10.86	8.00	4.50	
5	1	51	0.10	2.49	2.40	2.30	0.06
	2	52		6.00	4.75	6.69	
	3	53		14.56	8.82		
6	1	61	6.34	2.00	1.00	3.00	0.69
	2	62	14.28	4.83	2.97	12.28	2.31
	3	63	20.31	13.00		41.70	12.00
7	1	71	4.00	1.88	0.36	6.37	0.42
	2	72	10.22	4.32	1.21	12.79	2.33
	3	73	14.30	7.71		31.72	10.00
8	1	81	8.19	2.06	0.80	8.50	1.00
	2	82	9.42	4.17	3.26	11.00	3.39
	3	83	13.00			19.24	6.00
9	1	91	5.00	0.47	0.30	1.26	0.54
	2	92					1.24
	3	93					
10	1	101	5.09	1.61	0.68	5.34	0.70
	2	102	8.81	2.69	1.69	6.04	2.60
	3	103	9.28			17.28	

Nota: Elaboración propia.

Tabla 13

Muestra la estadística después de aplicar el capping

Litología Código	Envolvente Código	Dominio	Cu (%)			Zn (%)			Pb (%)			Ag (g/t)			Au (g/t)		
			Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean	CV
2	1	21	10,476	0.07	3.55	10,957	0.04	4.61	8,370	0.02	4.11	11,945	0.12	1.94	6,571	0.01	2.21
	2	22	1,774	0.92	1.11	1,271	0.64	1.09	4,174	0.17	1.8	774	0.68	0.91	3,995	0.28	0.9
	3	23	283	3.53	0.76	343	2.52	0.52				14	1.57	0.32	130	2.15	0.73
3	1	31	43,795	0.04	4.94	27,835	0.04	4.3	17,002	0.02	2.69	47,279	0.16	2.65	19,420	0.01	4.7
	2	32	11,251	0.9	1.09	22,771	0.69	1.12	47,643	0.32	1.6	13,517	0.77	1.47	9,035	0.35	1.05
	3	33	3,827	3.93	0.87	24,028	3.59	0.9	9,640	2.61	1.05	12,658	4.23	1.88	2,070	1.56	0.77
4	1	41	13,745	0.01	7.83	10,710	0.03	4.39	11,141	0.01	4.25	14,123	0.07	2.55	7,168	0.01	4.69
	2	42	50	0.83	1.07	2,214	0.64	1.24	3,007	0.35	1.18	358	0.73	1.26	98	0.6	1.05
	3	43				1,604	3	0.68	352	1.85	0.79	32	2.07	0.54			
5	1	51	9,956	0.004	1.68	6,729	0.04	4.74	7,554	0.02	5.37	10,103	0.08	2.36	6,097	0.01	1.51
	2	52				1,869	0.83	1.28	2,476	0.54	1.14	256	1.06	1.17			
	3	53				1,776	3.27	0.78	325	2.01	0.85						
6	1	61	30,010	0.13	2.11	71,093	0.01	4.88	32,901	0.02	1.51	35,889	0.18	1.17	12,501	0.03	1.63
	2	62	42,794	0.86	1.16	2,859	0.51	1.43	41,372	0.15	1.28	36,541	0.66	1.29	49,063	0.36	0.76
	3	63	7,525	3.93	0.9	321	4.11	0.88				7,513	2.75	1.38	16,554	1.59	0.85
7	1	71	18,610	0.1	2.12	35,111	0.01	4.85	16,433	0.02	0.94	27,911	0.18	1.67	8,693	0.03	1.4
	2	72	18,628	0.93	1.33	1,611	0.7	1.29	20,401	0.13	1.13	9,127	0.79	1.56	25,910	0.33	0.82
	3	73	1,228	3.92	0.83	118	2.47	0.71				1,176	3.47	1.33	2,889	1.54	1.01
8	1	81	31,444	0.07	4.86	24,818	0.01	6.26	14,436	0.01	2.62	23,856	0.18	2.44	27,648	0.04	1.99
	2	82	8,797	0.97	1.31	359	0.43	1.47	10,741	0.09	2.17	18,251	0.56	1.43	17,175	0.3	1.22
	3	83	918	3.61	0.75							1,838	2.87	1.05	434	1.5	0.82
9	1	91	1,648	0.1	4.47	1,561	0.02	2.24	1,561	0.02	1.68	1,561	0.07	1.72	1,262	0.02	2.05
	2	92													172	0.31	0.91
	3	93															
10	1	101	9,893	0.14	2.63	10,386	0.02	4.24	8,228	0.02	1.85	10,017	0.15	2.12	9,186	0.04	1.63
	2	102	3,605	0.89	1.23	353	0.38	1.27	2,510	0.09	1.78	3,551	0.52	1.15	4,331	0.25	1.08
	3	103	213	3.54	0.67							87	3.52	1.18			

Nota: Elaboración propia.

3.4.5 Composición.

Se realizó la composición de las muestras de perforación de diamantina dentro de cada dominio de estimación. El objetivo es uniformizar la longitud de las muestras para el análisis geoestadístico y la interpolación de leyes, ya que las muestras originales tienen longitudes variables (mínimo de 0.3 m y máximo de 2 m).

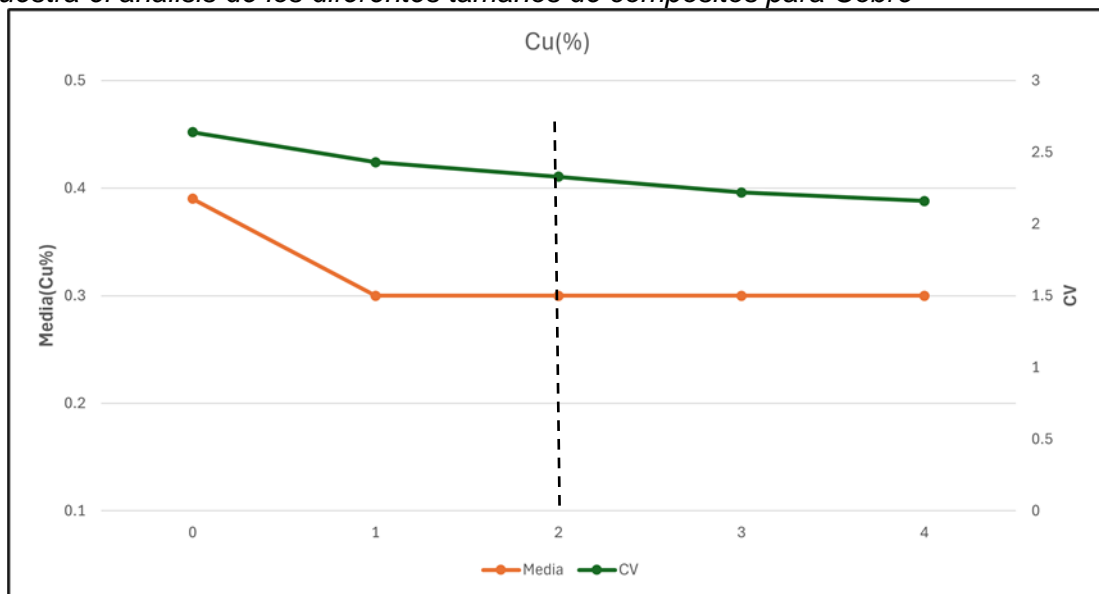
Se evaluó diferentes tamaños de compositos (1, 2, 3 y 4 metros) para determinar la longitud que mejor se ajusta al depósito.

Se determinó que la longitud óptima era de 2 metros. Este tamaño fue elegido porque demostró menor variabilidad y mantuvo el valor de la media casi constante en comparación con otras longitudes.

Esta longitud de 2 m se consideró proporcional al tamaño de bloque de 4 m x 4 m x 6m.

Figura 68

Muestra el análisis de los diferentes tamaños de compósitos para Cobre



Nota: Elaboración propia.

Tabla 14

Muestra la estadística después de compositar

Litología Código	Envoltante Código	Dominio	Cu (%)			Zn (%)			Pb (%)			Ag (g/t)			Au (g/t)		
			Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean	CV	Muestras	Mean	CV
2	1	21	11,141	0.04	3.98	11,575	0.026	5.207	9,598	0.01	4.96	12,089	0.076	2.293	9,465	0.01	3.07
	2	22	1,350	0.92	0.91	888	0.598	1.05	3,088	0.16	1.65	560	0.681	0.771	3,094	0.28	0.81
	3	23	222	3.52	0.64	207	2.465	0.474				10	1.567	0.247	99	2.12	0.64
3	1	31	42,091	0.03	4.61	27,520	0.033	4.565	19,626	0.01	3.05	38,523	0.127	2.584	43,677	0.01	4.62
	2	32	7,884	0.89	0.91	13,869	0.641	1.079	28,749	0.31	1.43	8,020	0.743	1.171	6,973	0.35	0.92
	3	33	2,697	3.86	0.73	11,386	3.431	0.807	4,292	2.51	0.88	6,330	4.064	1.506	1,709	1.55	0.7
4	1	41	22,024	0.01	9.95	19,828	0.014	6.558	20,152	0.01	5.82	21,862	0.033	3.508	21,992	0.01	5.78
	2	42	38	0.81	0.94	1,446	0.587	1.201	1,780	0.33	1.12	196	0.733	0.941	76	0.58	1.02
	3	43				823	2.853	0.657	169	1.81	0.71	8	2.025	0.483			
5	1	51	26,747	0.002	1.63	24,072	0.009	9.078	24,738	0.01	9.15	26,562	0.02	4.268	26,747	0.02	1.53
	2	52				1,435	0.713	1.287	1,782	0.49	1.11	187	1.056	0.946			
	3	53				1,279	3.066	0.762	248	1.96	0.78						
6	1	61	21,977	0.13	1.78	56,289	0.013	4.349	27,094	0.02	1.32	26,106	0.171	1.001	9,751	0.03	1.61
	2	62	31,504	0.86	0.93	1,962	0.497	1.288	31,584	0.15	1.19	27,342	0.66	1.071	36,586	0.36	0.69
	3	63	5,738	3.89	0.77	224	3.941	0.85				5,656	2.737	1.229	12,385	1.58	0.8
7	1	71	15,490	0.09	1.92	28,362	0.014	4.556	14,310	0.02	1.03	22,126	0.162	1.502	8,631	0.02	1.64
	2	72	13,409	0.93	1.08	1,091	0.681	1.196	15,394	0.13	1.06	6,668	0.788	1.317	18,958	0.32	0.73
	3	73	904	3.85	0.72	91	2.403	0.644				906	3.422	1.171	2,015	1.53	0.94
8	1	81	50,219	0.04	5.36	56,639	0.006	6.812	45,468	0.01	3.23	39,977	0.081	3.396	43,822	0.02	2.71
	2	82	6,149	0.97	1.07	257	0.423	1.343	11,503	0.09	2.02	15,564	0.555	1.24	12,856	0.29	1.11
	3	83	626	3.59	0.64							1,449	2.85	0.975	297	1.48	0.74
9	1	91	3,039	0.04	5.81	3,039	0.009	3.24	3,039	0.01	2.56	3,039	0.03	2.671	2,894	0.01	3.08
	2	92													149	0.29	0.88
	3	93															
10	1	101	8,095	0.12	2.55	10,584	0.016	4.123	8,508	0.02	1.85	8,310	0.123	1.994	7,658	0.03	1.72
	2	102	2,568	0.89	1.03	216	0.372	1.129	2,322	0.09	1.62	2,453	0.518	0.987	3,152	0.25	0.98
	3	103	165	3.51	0.56							56	3.394	1.024			

Nota: Elaboración propia.

3.4.6 Análisis de continuidad espacial (variografía).

Se realizó la unión de los dominios de alta y media ley para generar modelos de variograma. Los variogramas experimentales se obtuvieron transformando la distribución combinada de leyes en el espacio gaussiano y finalmente retrocediendo el modelo a la distribución original en el software Supervisor. Los modelos de variograma fueron definidos mediante la interpretación visual de la continuidad de la ley en los mapas de variográficos y los variogramas experimentales para determinar los efectos de nugget, anisotropía y rangos.

En general, observó lo siguiente:

Los efectos de nugget son moderados en Cu y Ag.

La primera estructura de variograma a lo largo de las direcciones principales varía de 4 m a 35 m para cobre, de 11 m a 80 m para zinc, y de 2 m a 94 m para plata.

La primera estructura explicó aproximadamente entre el 60% y el 90% de la varianza total para cobre y plata, y entre el 50% y el 90% de la varianza total para zinc.

Los rangos máximos alcanzados fueron de 165 m, 470 m y 320 m para cobre, zinc y plata, respectivamente.

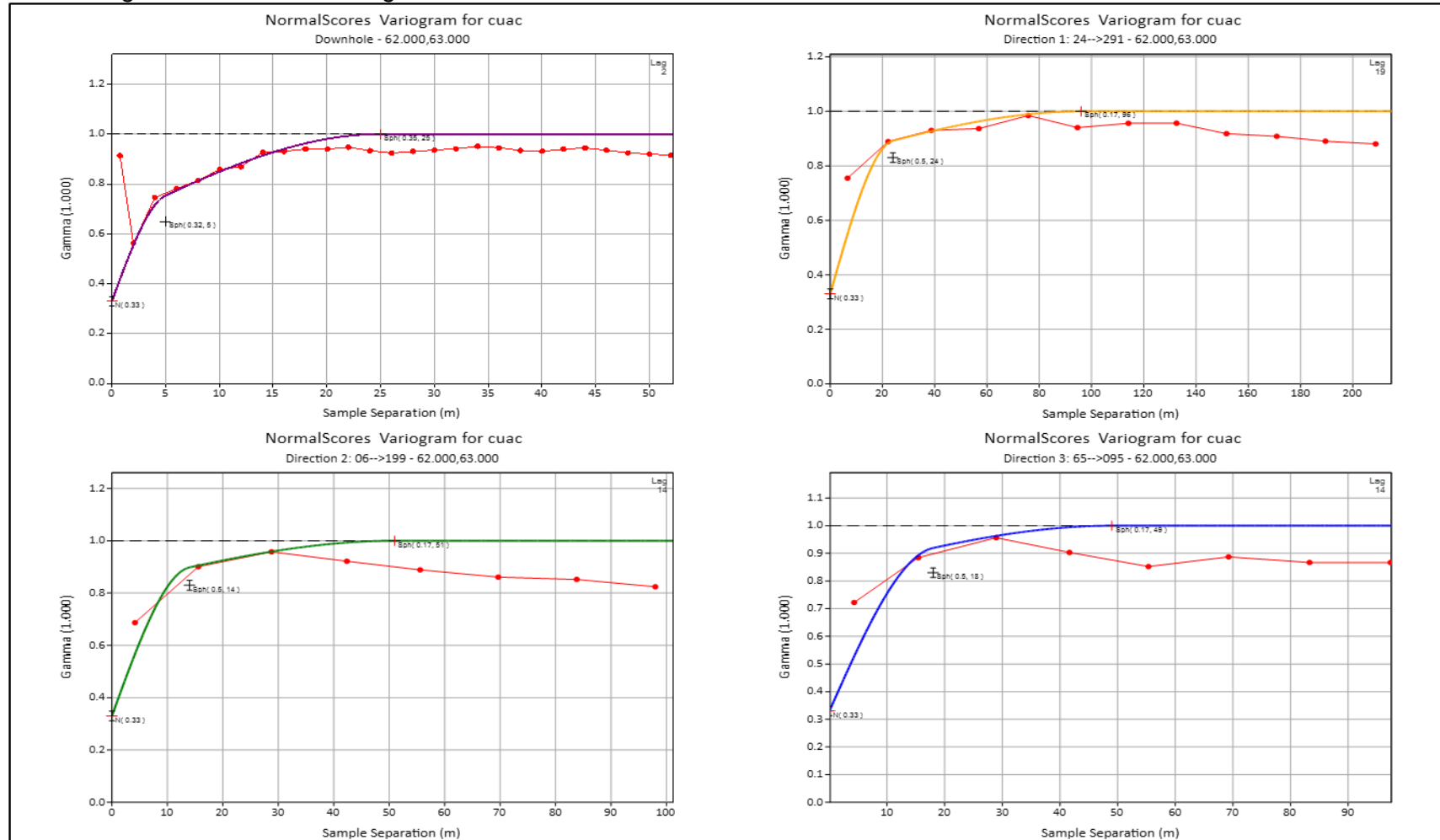
La tabla 15 resume los modelos de variograma utilizados para la estimación de leyes.

Para el cálculo de los variogramas experimentales se empleó un ancho de banda (bandwidths) horizontal y vertical de 30 metros, con 15° de tolerancia angular (tolerance angle) y espaciamiento (lag) de 10 a 25 metros.

Los modelos de variogramas han sido normalizados o estandarizados divididos por la varianza de los datos. Así, la meseta del modelo se ajusta a una altura de 1.

Figura 69

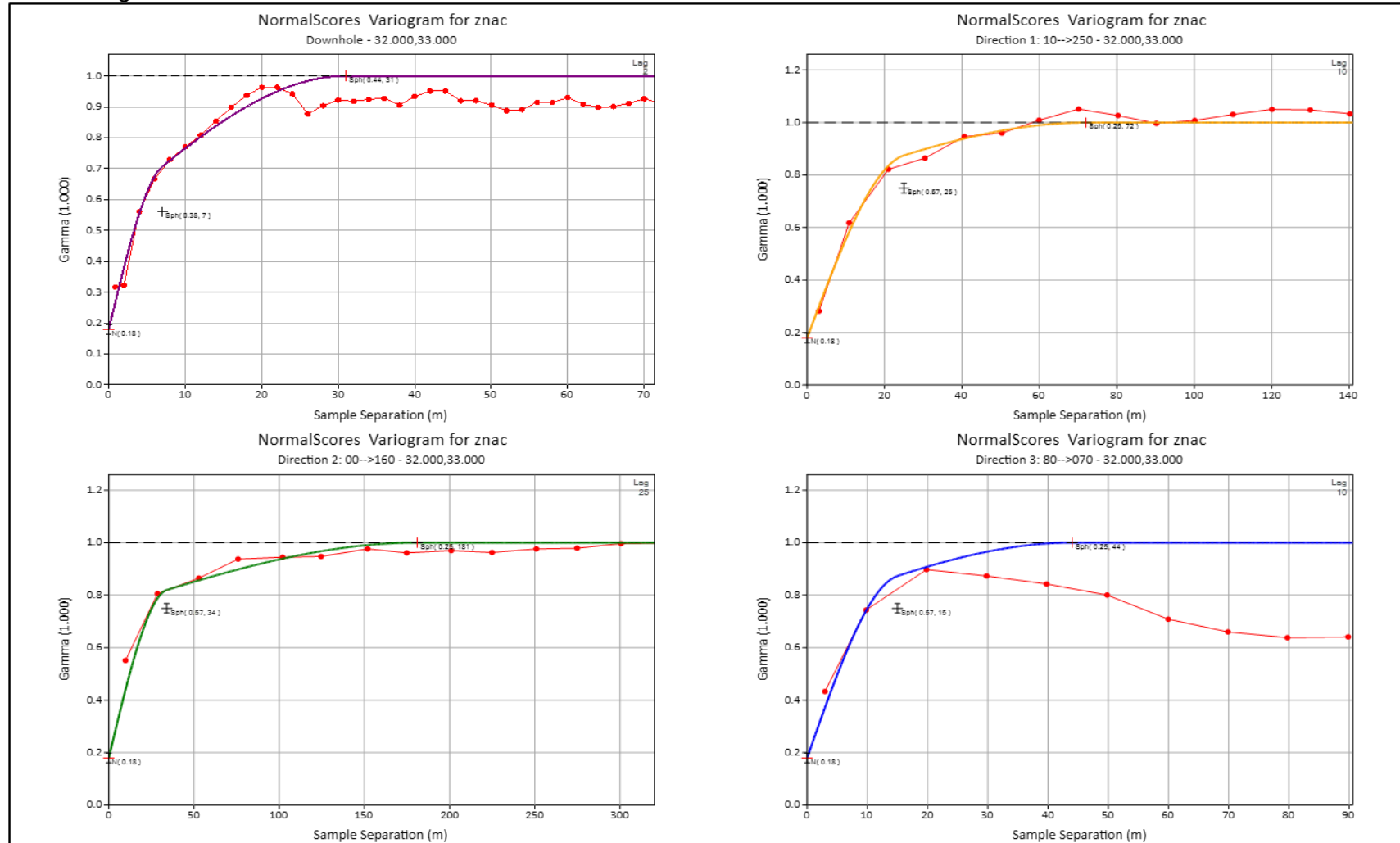
Muestra el variograma del Cu en el Conglomerado Shuuco



Nota: Elaboración propia.

Figura 70

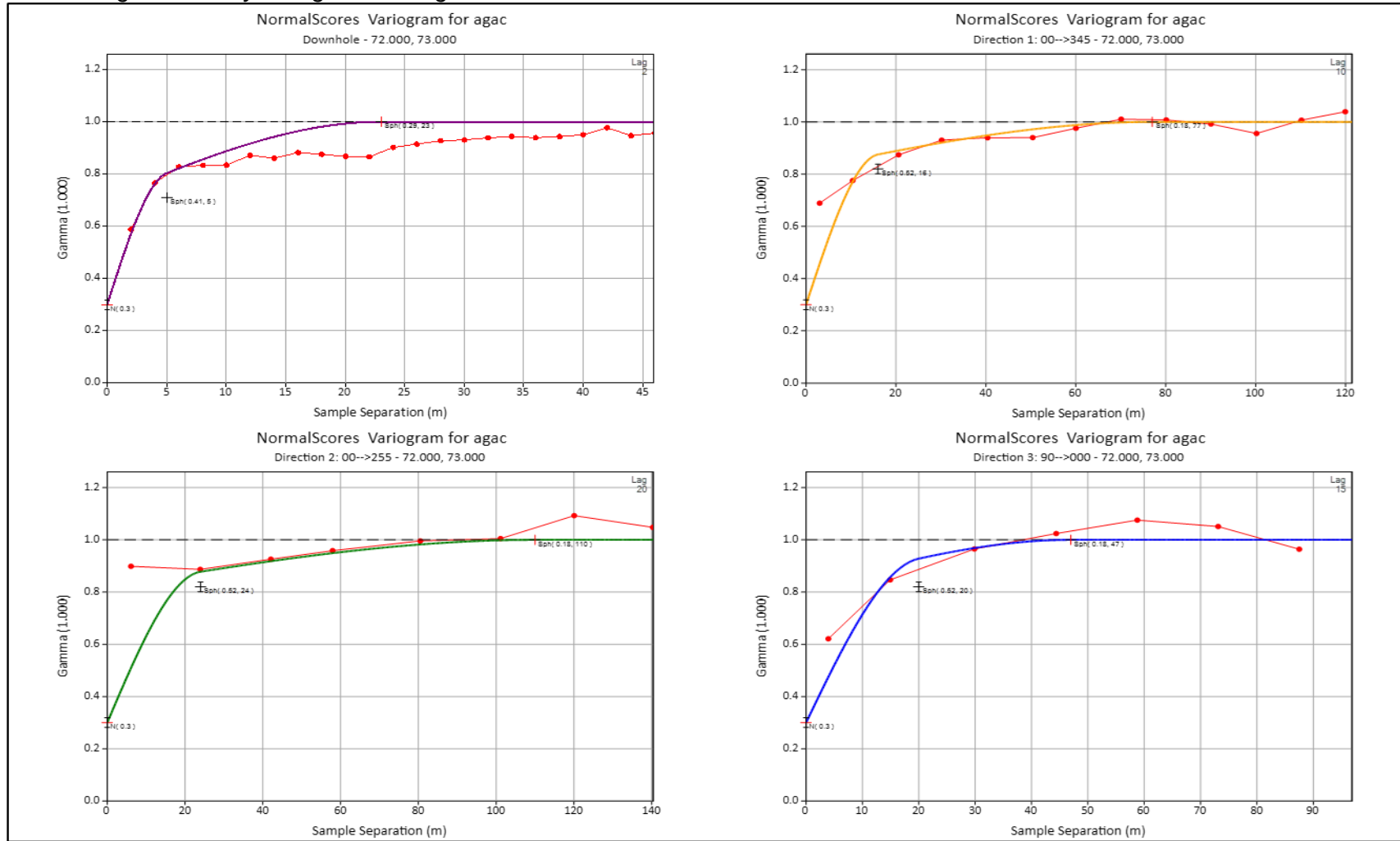
Muestra el variograma del Zn en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 71

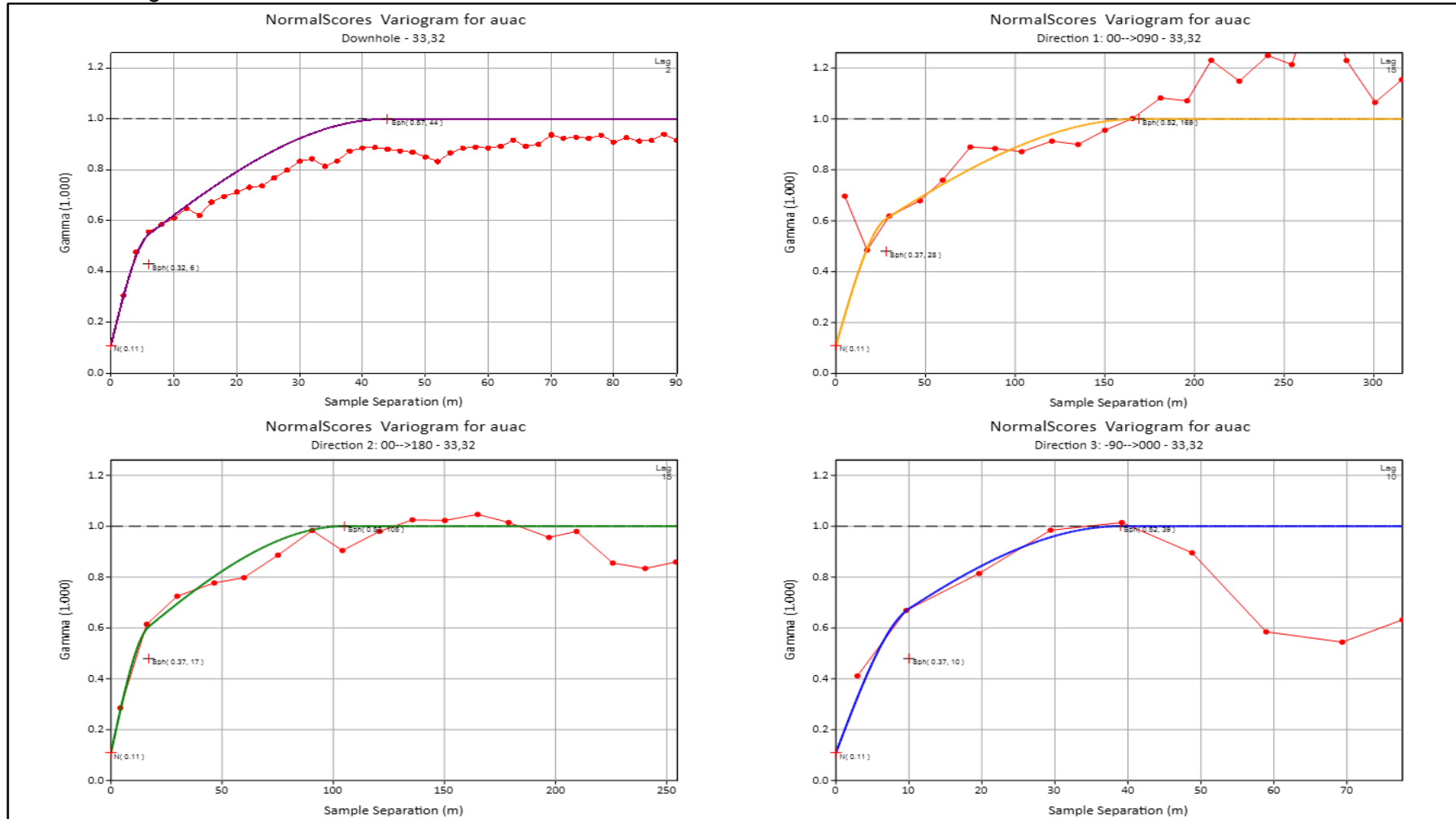
Muestra el variograma de ley de Ag en el Conglomerado Transicional Shuco



Nota: Elaboración propia.

Figura 72

Muestra el variograma de Au en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Tabla 15

Muestra el resumen de los parámetros del variograma por dominio

Elemento	Domain	Nugget	Orientación			Estructura 1			Estructura 2				
			Bearing	Plunge	Dip	Sill	Major	Semi	Minor	Sill	Major	Semi	Minor
Cu	cu21-22-23	0.49	28	-39	8	0.22	25	7	4	0.29	52	41	26
	cu31-32-33	0.41	291	24	-7	0.43	8	48	3	0.16	45	73	14
	cu41-42-13	0.23	0	0	0	0.43	4	6	38	0.34	16	67	44
	cu51-52-53	0.19	0	0	0	0.42	4	6	38	0.39	16	67	44
	cu61-62-63	0.44	291	24	-7	0.45	24	14	18	0.10	96	51	49
	cu71-72-73	0.44	58	-34	-23	0.46	35	6	12	0.10	165	34	34
	cu81-82-83	0.31	68	-10	-75	0.56	16	8	21	0.14	67	36	45
	cu91-92-93	0.31	95	5	-1	0.49	28	32	5	0.20	125	72	33
	cu101-102-103	0.31	95	5	-1	0.49	28	32	5	0.20	125	72	33
Zn	zn21-22-23	0.13	0	50	3	0.40	81	47	8	0.47	130	94	21
	zn31-32-33	0.23	0	250	10	0.58	25	34	15	0.19	72	181	44
	zn41-42-43	0.17	0	272	55	0.40	33	28	48	0.43	469	49	49
	zn51-52-53	0.08	1	171	3	0.60	36	24	11	0.32	99	43	43
	zn61-62-63	0.31	1	161	7	0.51	29	20	12	0.18	234	49	49
	zn71-72-73	0.53	0	162	36	0.09	22	30	43	0.39	47	51	79
	zn81-82-83	0.76	0	0	90	0.14	11	11	11	0.10	51	51	51
	zn91-92-93	0.47	0	0	90	0.37	24	24	24	0.16	53	53	53
	zn101-102-103	0.72	0	0	90	0.14	33	33	33	0.15	51	51	51
Ag	ag21-22-23	0.56	75	-2	-10	0.15	34	15	6	0.30	39	300	21
	ag31-32-33	0.47	102	-21	13	0.44	41	48	7	0.10	239	25	25
	ag41-42-43	0.46	320	3	-4	0.27	94	16	21	0.27	194	33	31
	ag51-52-53	0.10	345	1	-5	0.55	52	12	21	0.35	124	137	137
	ag61-62-63	0.66	110	-15	-3	0.22	25	7	12	0.13	215	51	79
	ag71-72-73	0.46	345	0	0	0.45	16	24	20	0.08	77	151	47
	ag81-82-83	0.42	0	90	10	0.36	54	109	7	0.23	319	161	161
	ag91-92-93	0.16	140	85	-180	0.47	70	60	39	0.37	141	249	48
	ag101-102-103	0.48	30	8	6	0.25	2	15	95	0.26	15	151	151

Nota: Elaboración propia.

3.4.7 Modelo de bloques

Se construyó un modelo de bloques para todo el proyecto en el software Vulcan. Estos modelos no fueron rotados, por ello, los ejes X, Y y Z siguen las direcciones Este – Oeste, Norte – Sur y Elevación. La Tabla16 detalla la orientación de los diferentes modelos de bloques y muestra que se usó un tamaño de bloques de 4.0 x 4.0 x 6.0 metros. Se

determinó el tamaño de los bloques principalmente según la geometría del yacimiento y el método de minado.

Tabla 16

Muestra los límites y tamaño de bloques del modelo

ROTACIÓN	DIRECCIÓN	MÍNIMO	MÁXIMO	TAMAÑO BLOQUE (M)	NÚMERO BLOQUES
0	X	360,196	362,308	4	528
	Y	8,807,196	8,812,612	4	1,354
	Z	3,646	4,516	6	290

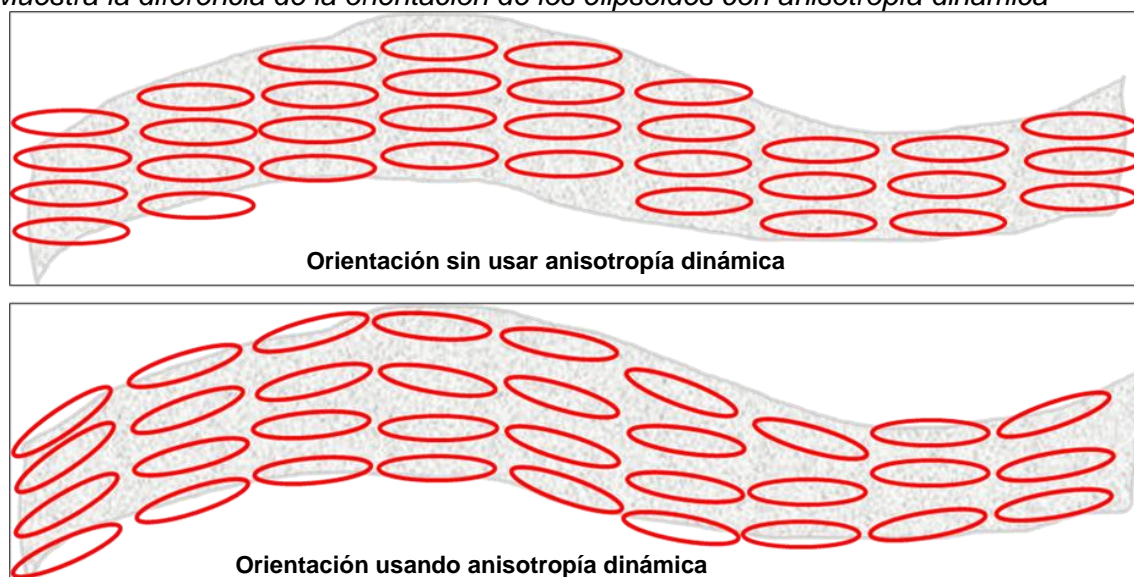
Nota: Elaboración propia.

3.4.8 Anisotropía dinámica.

La anisotropía dinámica es una técnica avanzada en la estimación de recursos minerales que permite una interpolación más precisa en depósitos con geometría compleja (mantos plegados). Esta metodología ajusta la orientación de los elipsoides de búsqueda y los modelos de variograma para cada celda del modelo de bloques, siguiendo las variaciones locales en la mineralización. Esto se logra mediante la interpolación de ángulos de inclinación y dirección a partir de los sólidos de los mantos en 3D. Para esto se usó la herramienta del software Vulcan llamada Anisotropía Local Variable (LVA).

Figura 73

Muestra la diferencia de la orientación de los elipsoides con anisotropía dinámica



Nota: Elaboración propia.

3.4.9 Estimación de las leyes.

Los parámetros de interpolación (distancias de búsqueda, número mínimo y máximo de compósitos) definidos en la Tabla 17, se asignaron considerando los rangos de influencia obtenidos del análisis variográfico por dominio (Tabla 15).

La configuración de múltiples pasadas, permitió minimizar el sesgo y la varianza de la estimación: la primera pasada prioriza la precisión local con distancias cortas, las pasadas sucesivas garantizan la asignación de ley en bloques con menor densidad de información.

La restricción de un máximo de 3 compósitos por taladro, evita el sobreponderamiento de clusters de perforación, asegurando así la representatividad espacial de la estimación.

Se empleó el método de estimación de kriging ordinario para interpolar las leyes y el método de vecino cercano con fines de validación. Todos los elementos fueron estimados usando el Kriging Ordinario (OK). Todos los dominios fueron estimados con límites duros y con anisotropía dinámica. La configuración de la muestra en la primera pasada de estimación consistió en un mínimo de tres compósitos de dos metros y un máximo de nueve a 22 compuestos.

Tabla 17

Muestra los parámetros de interpolación por dominio

Elemento	Domain	Distancias (m)			Compositos		Restricción por Distancia			N° máximo por DDH	
		Mayor	Semi	Minor	Mínimo	Máximo	Valor	Mayor	Semi		Minor
Cu	cu21	68.5	28	17.5	3	22	0.65	8	8	8	3
	cu22	68.5	28	17.5	3	22	4.37	8	8	8	3
	cu23	68.5	28	17.5	3	22	8	8	8	8	3
	cu31	40	66	14	3	18	0.5	8	8	8	3
	cu32	40	66	14	3	18	5	8	8	8	3
	cu33	40	66	14	3	18	15.4	8	8	8	3
	cu41	16	67	44	3	10	0.19	8	8	8	3
	cu42	16	67	44	3	10	3	8	8	8	3
	cu43	16	67	44	3	10	0	8	8	8	3
	cu51	16	67	44	3	10	0.04	8	8	8	3
	cu52	16	67	44	3	10	0.04	8	8	8	3
	cu53	16	67	44	3	10	0.04	8	8	8	3
	cu61	96	51	34	3	18	1.78	8	8	8	3
	cu62	96	51	34	3	18	6	8	8	8	3
	cu63	96	51	34	3	18	20	8	8	8	3
	cu71	74.5	30.5	17	3	18	1.67	8	8	8	2
	cu72	74.5	30.5	17	3	18	7.8	8	8	8	3
	cu73	74.5	30.5	17	3	18	10	8	8	8	3
cu81	84	38	57	3	12	1	8	8	8	3	

Elemento	Domain	Distancias (m)			Compositos		Restricción por Distancia			N° máximo por DDH		
		Mayor	Semi	Minor	Mínimo	Máximo	Valor	Mayor	Semi		Minor	
Cu	cu82	84	38	57	3	12	6	8	8	8	3	
	cu83	84	38	57	3	12	10	8	8	8	3	
	cu91	94	54	25	3	12	1	8	8	8	3	
	cu92	94	54	25	3	12	1	8	8	8	3	
	cu93	94	54	25	3	12	1	8	8	8	3	
	cu101	94	54	25	3	12	2.3	8	8	8	3	
	cu102	94	54	25	3	12	4	8	8	8	3	
	cu103	94	54	25	3	12	782	8	8	8	3	
Zn	zn21	35	20	15	3	9	1.39	8	8	8	3	
	zn22	35	20	15	3	9	3	8	8	8	3	
	zn23	35	20	15	3	9	4.2	8	8	8	3	
	zn31	25	40	10	3	9	2	8	8	8	3	
	zn32	25	40	10	3	9	4.7	8	8	8	3	
	zn33	25	40	10	3	9	19	8	8	8	3	
	zn41	25	20	5	3	9	1.3	8	8	8	3	
	zn42	25	20	5	3	9	3.22	8	8	8	3	
	zn43	25	20	5	3	9	8.2	8	8	8	3	
	zn51	30	15	10	3	9	1.4	8	8	8	3	
	zn52	30	15	10	3	9	45	8	8	8	3	
	zn53	30	15	10	3	9	10.6	8	8	8	3	
	zn61	35	15	10	3	9	1.41	8	8	8	3	
	zn62	35	15	10	3	9	3.2	8	8	8	3	
	zn63	35	15	10	3	9	11	8	8	8	3	
	zn71	20	20	30	3	9	1	8	8	8	3	
	zn72	20	20	30	3	9	3.2	8	8	8	3	
	zn73	20	20	30	3	9	45	8	8	8	3	
	zn81	25	25	25	3	9	0.76	8	8	8	3	
	zn82	25	25	25	3	9	1.3	8	8	8	3	
	zn83	25	25	25	3	9	0	0	0	0	3	
	zn91	20	20	20	3	9	0.12	8	8	8	3	
	zn92	20	20	20	3	9	0	0	0	0	3	
	zn93	20	20	20	3	9	0	0	0	0	3	
	zn101	25	25	25	3	9	0.45	8	8	8	3	
	zn 102	25	25	25	3	9	1.4	8	8	8	3	
	zn 103	25	25	25	3	9	0	0	0	0	3	
	Ag	ag21	45	65	10	3	9	265	8	8	8	3
		ag22	45	65	10	3	9	2	8	8	8	3
		ag23	45	65	10	3	9	2	8	8	8	3
ag31		30	35	5	3	9	7	8	8	8	3	
ag32		30	35	5	3	9	10	8	8	8	3	
ag33		30	35	5	3	9	25	8	8	8	3	
ag41		25	5	10	3	9	1.63	8	8	8	3	
ag42		25	5	10	3	9	2	8	8	8	3	
ag43		25	5	10	3	9	3	8	8	8	3	
ag51		30	22	33	3	9	1.5	8	8	8	3	
ag52		30	22	33	3	9	3.3	8	8	8	3	
ag53		30	22	33	3	9	0	0	0	0	3	
ag61		35	18	20	3	9	2	8	8	8	3	
ag62		35	18	20	3	9	9	8	8	8	3	
ag63		35	18	20	3	9	20	8	8	8	3	
ag71		20	25	10	3	9	4	8	8	8	3	
ag72		20	25	10	3	9	8.7	8	8	8	3	
ag73		20	25	10	3	9	16	8	8	8	3	
ag81		30	10	15	3	9	4.5	8	8	8	3	
ag82		30	10	15	3	9	8	8	8	8	3	
ag83		30	10	15	3	9	12	8	8	8	3	
ag91		20	30	10	3	9	0.55	8	8	8	3	
ag92		20	30	10	3	9	0	0	0	0	3	
ag93		20	30	10	3	9	0	0	0	0	3	
ag101		5	10	35	3	9	2	8	8	8	3	
ag102		5	10	35	3	9	3	8	8	8	3	
ag103	5	10	35	3	9	7.5	8	8	8	3		

Nota: Elaboración propia.

3.4.10 Validación de la estimación

Se realizó los siguientes métodos de validación: Validación Visual, Validación del sesgo Global y Validación del sesgo local a través de Swath Plots.

Validación visual

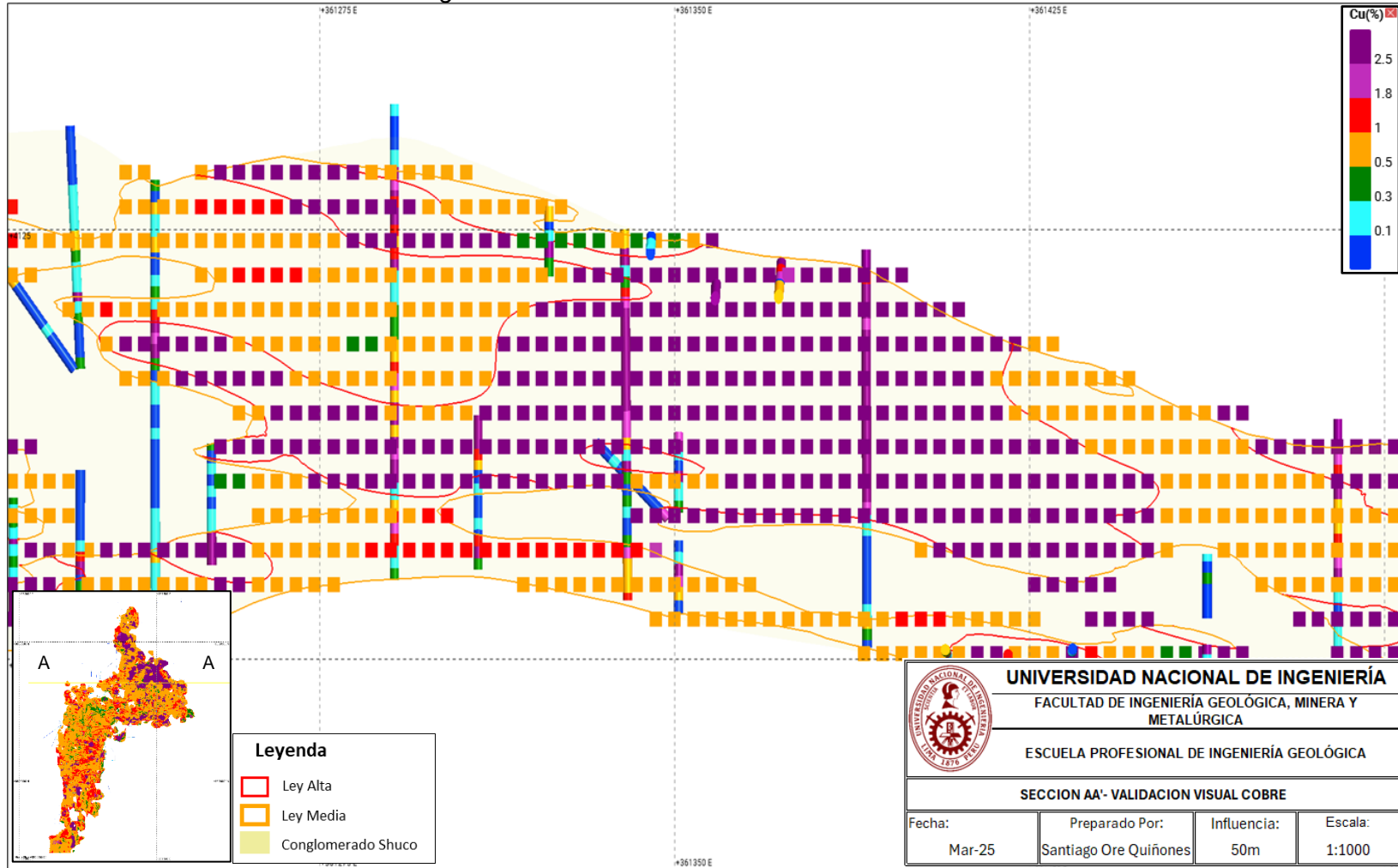
La primera validación que se realizó fue una evaluación visual de la vista en planta y secciones transversales para asegurar que la distribución de las leyes en los bloques sea consistente con la ley promedio de los compósitos. Esto asegura que la información usada para la estimación tenga una relación directa con la varianza local de las leyes estimadas.

La Figura 74 muestra la distribución de las leyes de Cu (%) en los sondajes y en el modelo de bloques.

En las siguientes figuras se puede apreciar la consistencia entre las leyes estimadas y las leyes de los compósitos. Los resultados observados en los bloques muestran una buena comparación con las leyes de los compósitos.

Figura 74

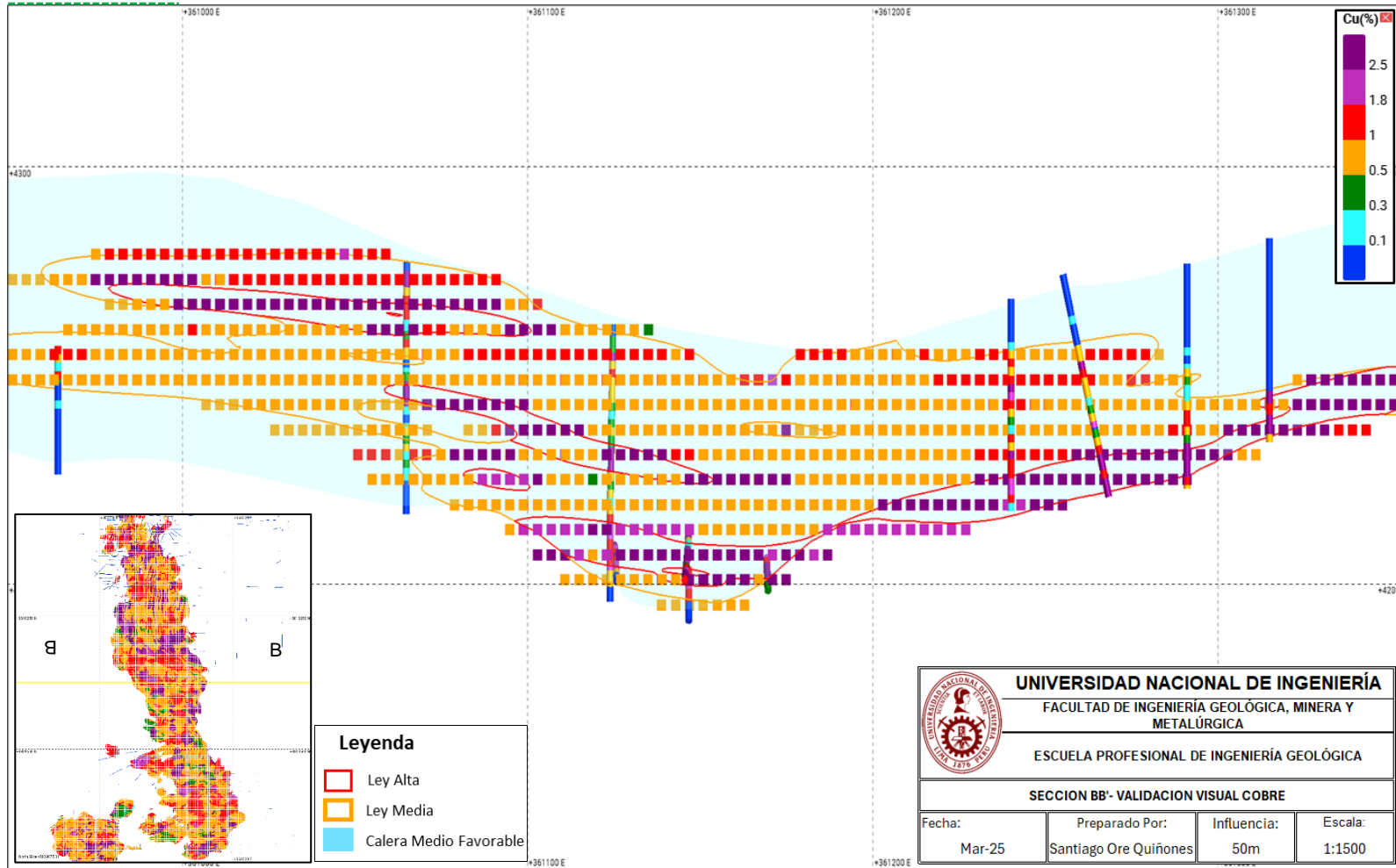
Muestra la validación visual de Cobre en el Conglomerado Shuco



Nota: Elaboración propia.

Figura 75

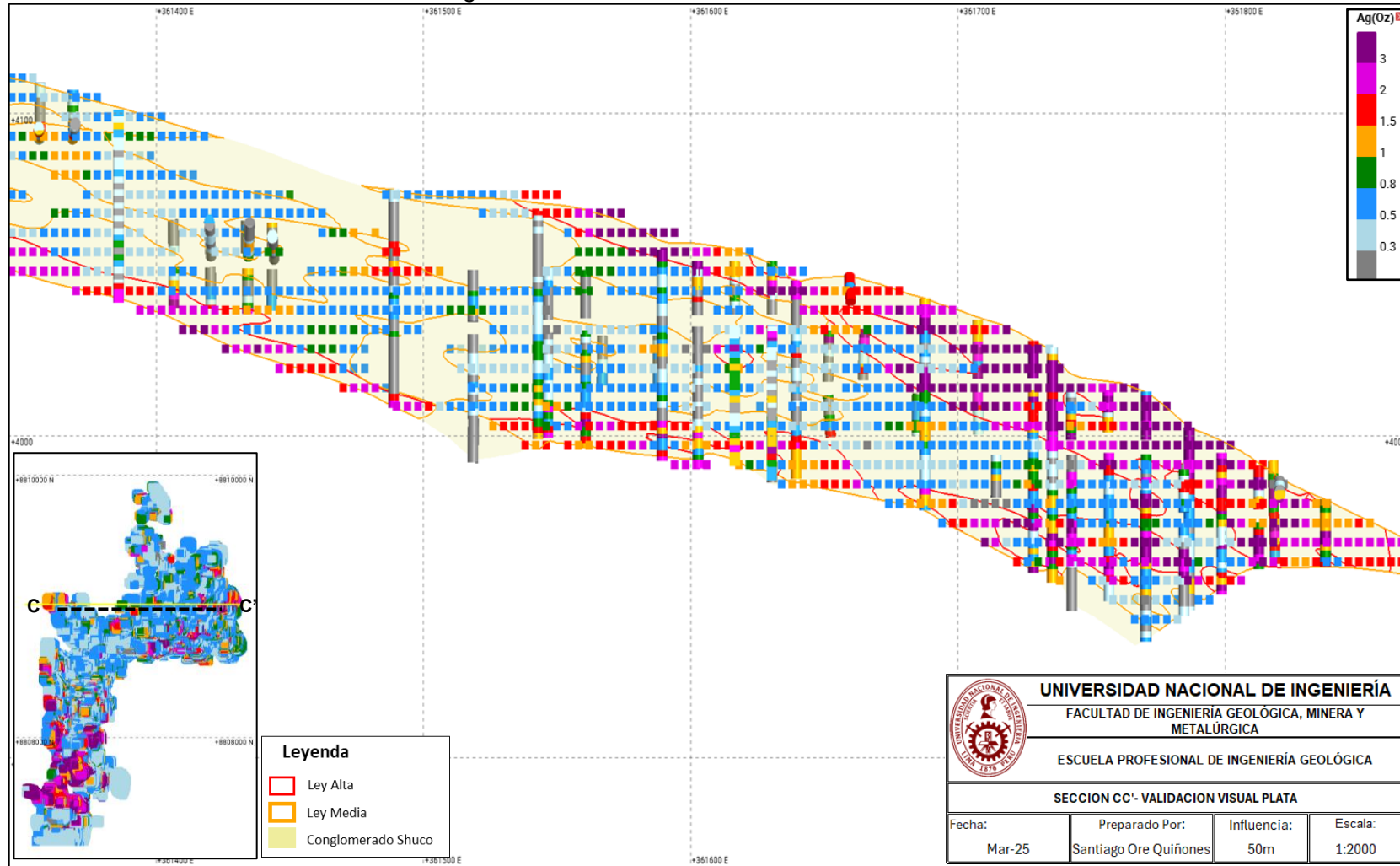
Muestra la validación visual de Cobre en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 76

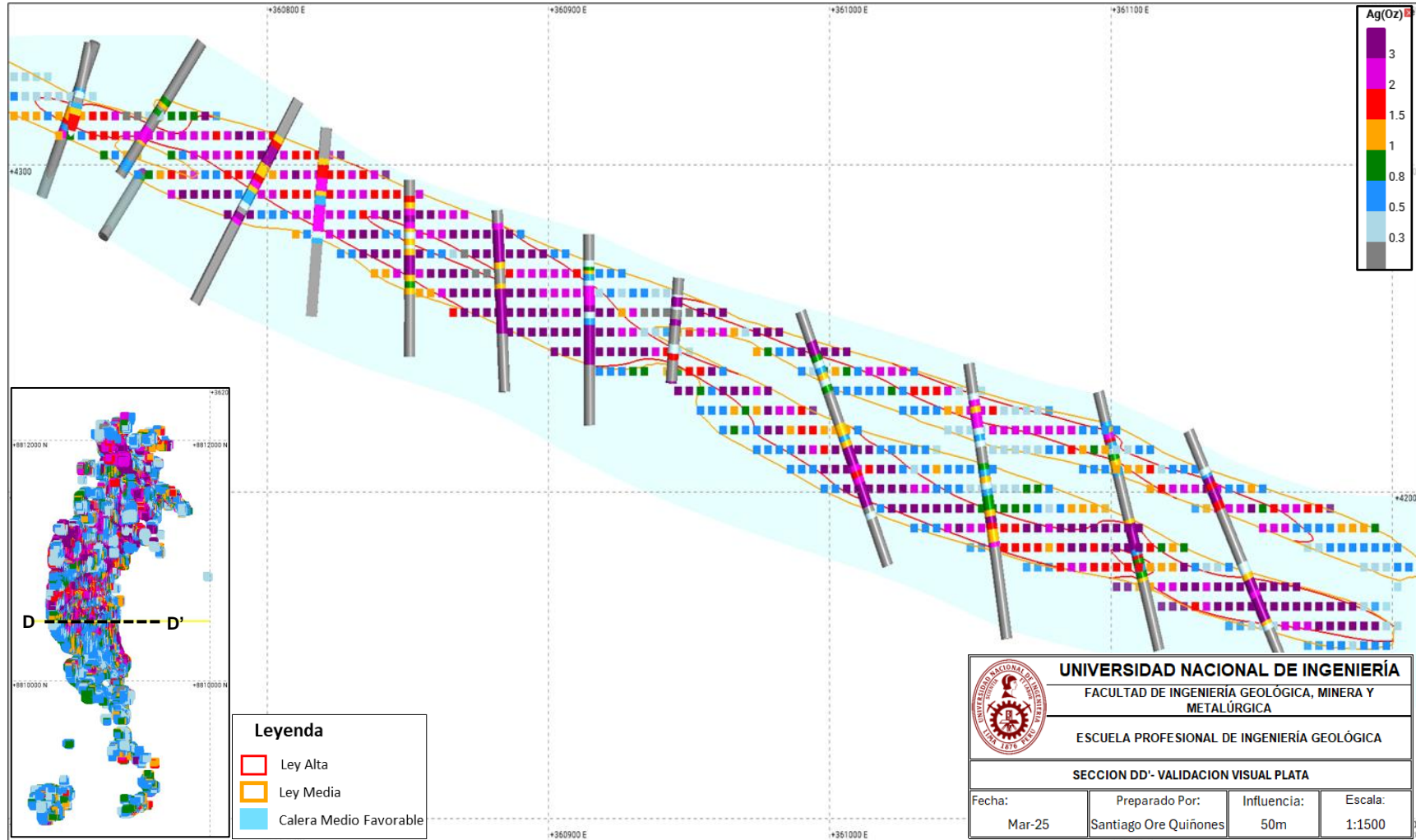
Muestra la validación visual de la Plata en el Conglomerado Shuco



Nota: Elaboración propia.

Figura 77

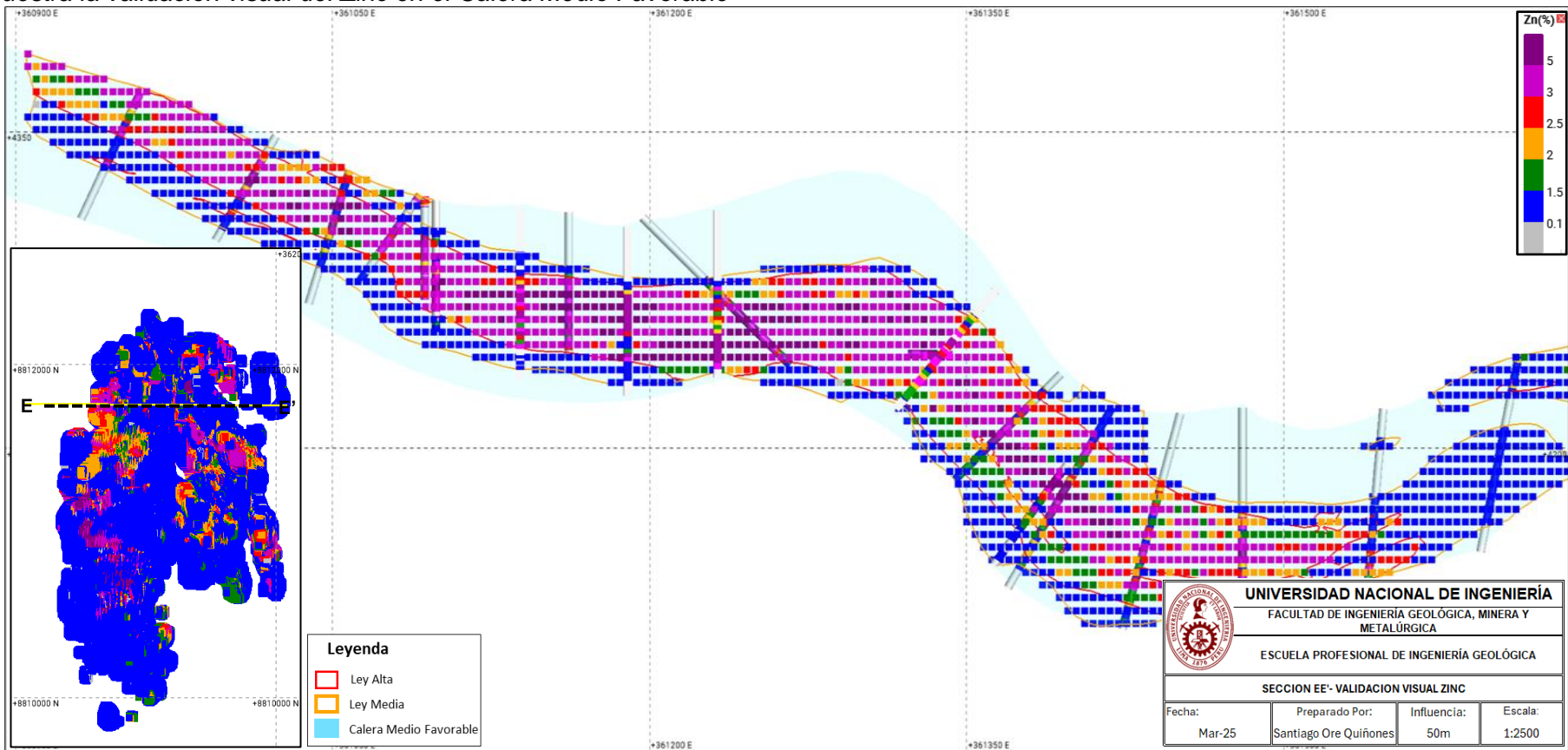
Muestra la validación visual de la Plata en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 78

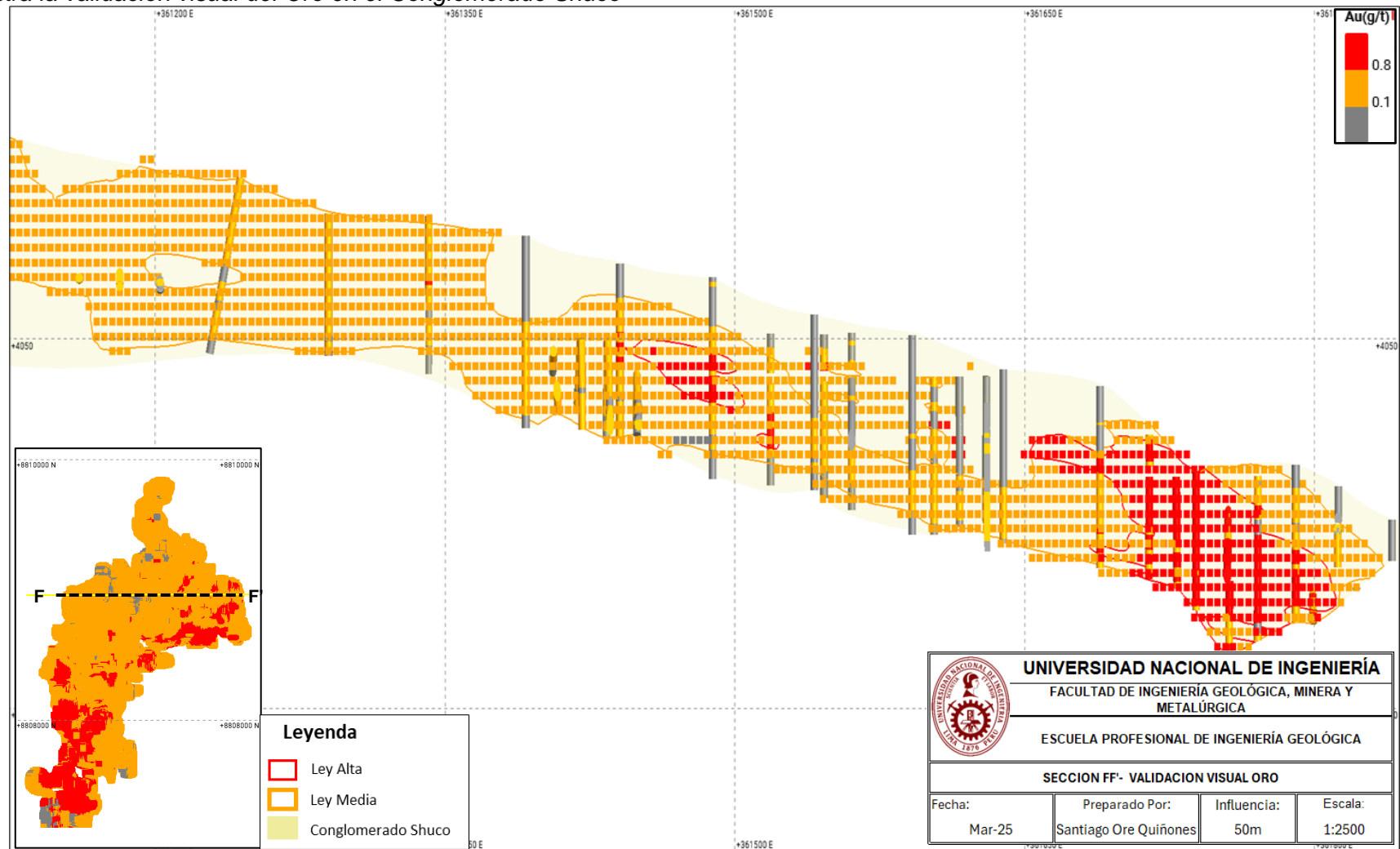
Muestra la validación visual del Zinc en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 79

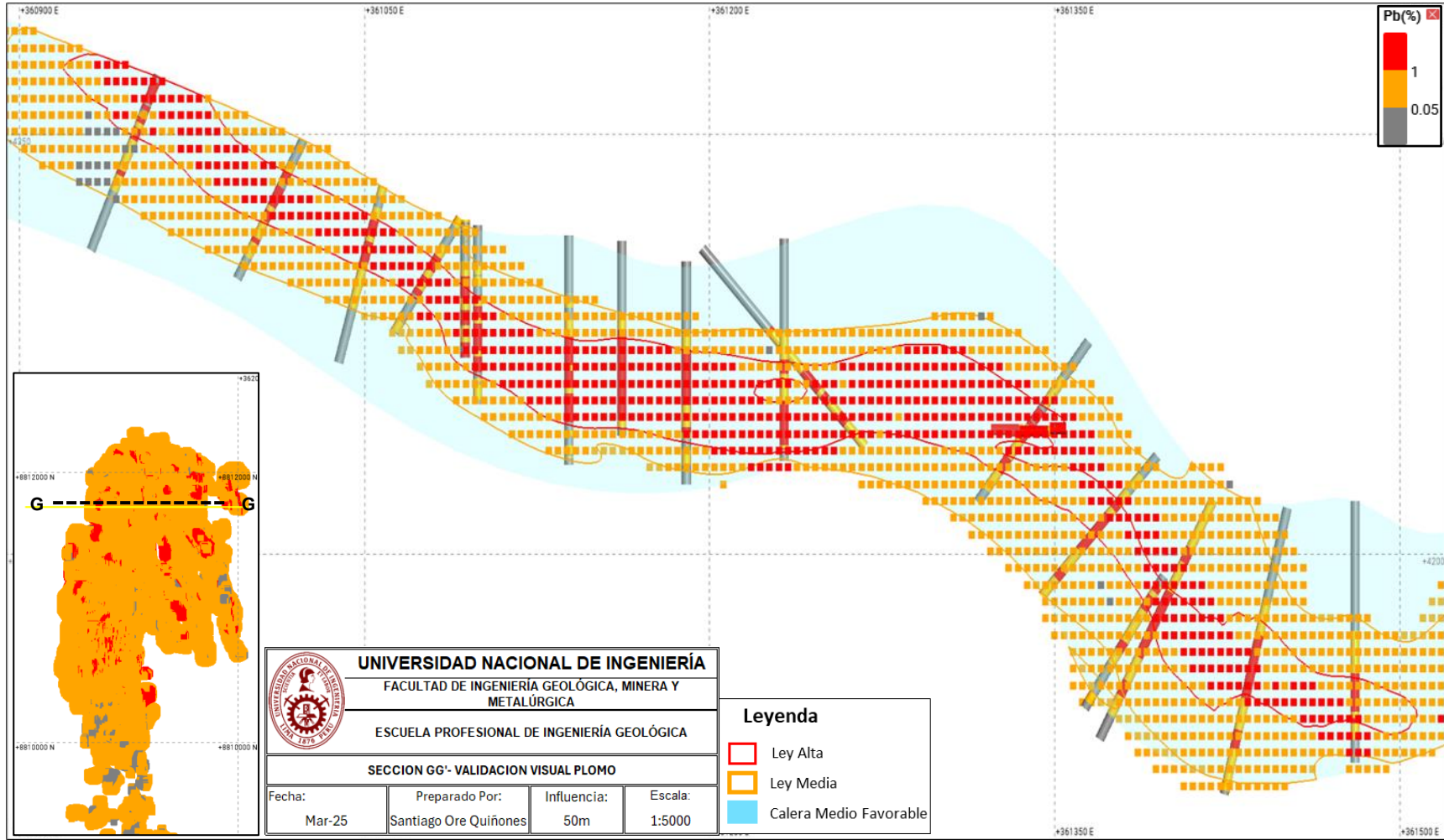
Muestra la validación visual del Oro en el Conglomerado Shuco



Nota: Elaboración propia.

Figura 80

Muestra la validación visual del Plomo en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Validación del Sesgo Global

Se realizó una evaluación del sesgo global en base a dominios al comparar las estimaciones de los bloques con Kriging Ordinario (OK) con las estimaciones del Vecino más Cercano (NN). Las diferencias son aceptables, como se muestra en la Tabla 18 no se excede en +-10%.

Tabla 18

Muestra los sesgos de la estimación por OK vs NN

Dominio	Validación Cu				Validación Zn				Validación Ag			
	Tonelaje	CU_OK	CU_NN	Diff (%)	Tonelaje	ZN_OK	ZN_NN	Diff (%)	Tonelaje	AG_OK	AG_NN	Diff (%)
21	294,836,42	0.013	0.013	-0.3	361,239,42	0.019	0.020	-7.0	462,323,58	0.040	0.039	3.6
22	6,132,812	0.887	0.920	-3.6	11,076,094	0.612	0.606	1.0	3,654,824	0.616	0.613	0.6
23	737,708	3.182	3.321	-4.2	2,826,922	2.132	2.119	0.6	23,643	1.557	1.490	4.5
31	494,648,25	0.018	0.018	4.3	358,813,70	0.027	0.028	-4.5	487,639,02	0.108	0.105	3.2
32	47,797,416	0.876	0.862	1.7	130,966,13	0.662	0.642	3.1	49,964,83	0.737	0.736	0.2
33	13,231,302	3.815	3.772	1.1	94,804,318	3.459	3.383	2.2	43,839,29	3.607	3.552	1.6
41	205,181,80	0.004	0.004	1.7	190,717,86	0.011	0.011	-1.6	118,779,55	0.030	0.031	-3.5
42	96,899	0.783	0.798	-1.9	12,503,009	0.554	0.568	-2.5	296,410	0.708	0.730	-3.0
43					5,527,265	2.603	2.505	3.9				
51	291,290,73	0.002	0.001	1.0	273,943,57	0.006	0.007	-5.9	384,144,37	0.018	0.018	-0.6
52					12,169,236	0.704	0.693	1.6	549,407	0.933	0.910	2.5
53					7,517,652	2.702	2.641	2.3				
61	371,880,36	0.094	0.092	2.9	415,015,16	0.014	0.014	-2.9	318,529,79	0.145	0.144	0.8
62	169,934,98	0.827	0.821	0.7	21,132,737	0.524	0.517	1.4	157,687,00	0.641	0.625	2.6
63	21,691,718	3.863	3.968	-2.6	3,038,310	3.264	3.208	1.8	24,549,29	2.781	2.836	-1.9
71	161,097,81	0.059	0.056	4.3	189,481,31	0.014	0.014	-1.8	177,980,14	0.127	0.125	1.8
72	54,756,955	0.890	0.880	1.2	10,695,842	0.628	0.665	-5.6	31,779,03	0.717	0.715	0.3
73	2,212,906	3.686	3.836	-3.9	975,030	2.087	2.042	2.2	5,516,923	2.889	2.717	6.3
81	1,223,515,11	0.033	0.032	2.0	1,082,323,38	0.006	0.006	10.6	595,417,47	0.066	0.063	4.5
82	47,300,050	0.906	0.868	4.4	4,168,382	0.361	0.415	-13.0	193,257,09	0.523	0.515	1.4
83	2,794,594	3.448	3.476	-0.8				0.0	13,215,77	2.637	2.683	-1.7
91	55,101,227	0.009	0.011	3.1	45,593,066	0.005	0.006	-11.6	46,094,02	0.020	0.021	-5.0
101	453,148,96	0.087	0.083	5.3	536,372,41	0.014	0.013	5.7	123,780,10	0.120	0.115	4.0
102	21,731,906	0.787	0.773	1.9	5,529,432	0.288	0.273	5.4	5,929,851	0.492	0.465	5.9
103	594,472	3.520	3.404	3.0				0.0	27,793	3.100	3.023	2.0

Nota: Elaboración propia.

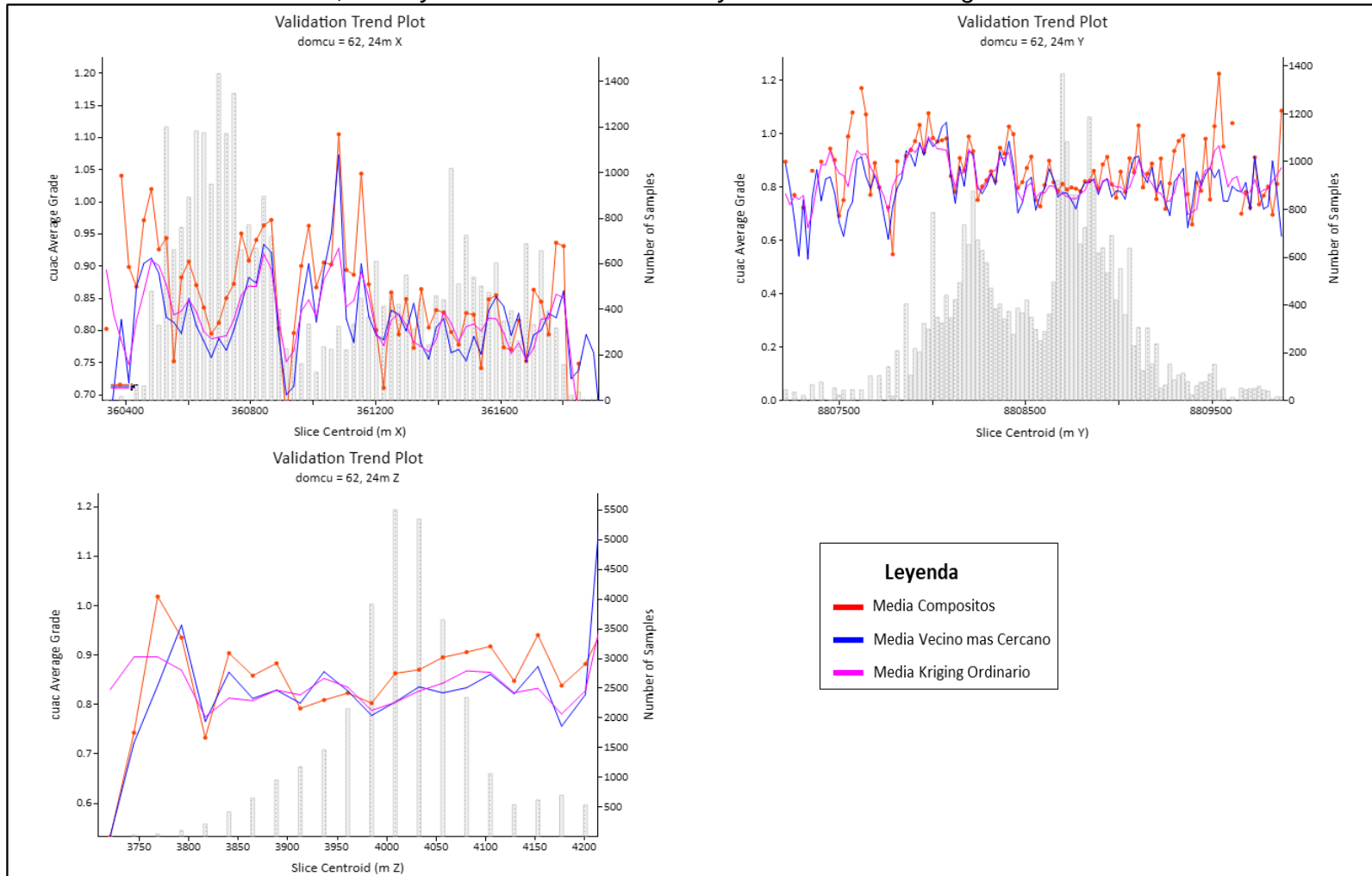
Validación local, gráficos de franjas (Swath Plots)

Se verificó los sesgos locales creando una serie de cortes o «swaths» en la dirección Este, Norte y Elevación, en estos gráficos se representa las leyes estimadas por Kriging Ordinario (OK), Inverso a la Distancia (IDW), el Vecino más Cercano (NN) y los Compósitos.

Se considera que estos resultados obtenidos muestran en general una buena correlación.

Figura 81

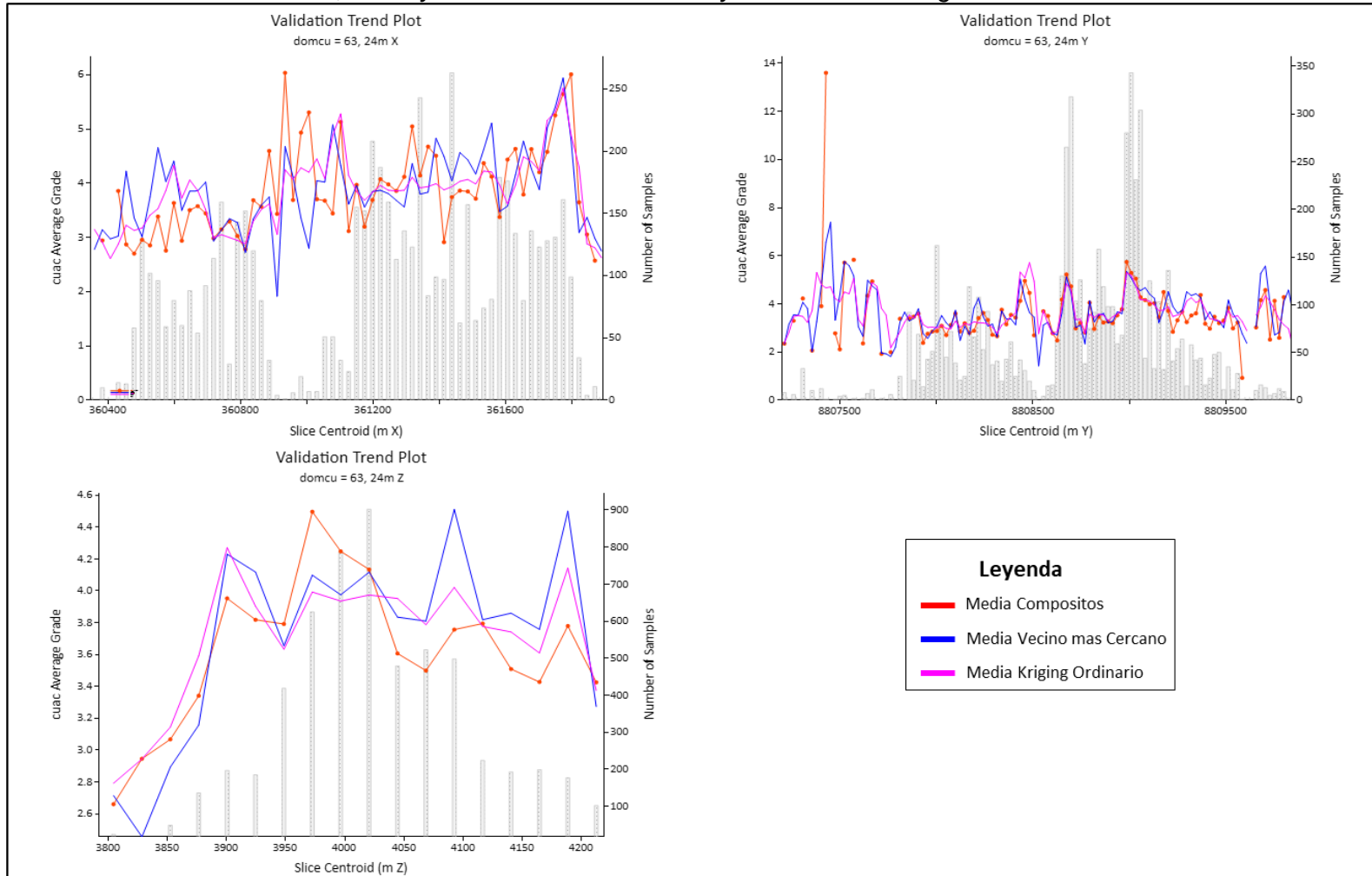
Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley media Cu en el Conglomerado Shuco



Nota: Elaboración propia.

Figura 82

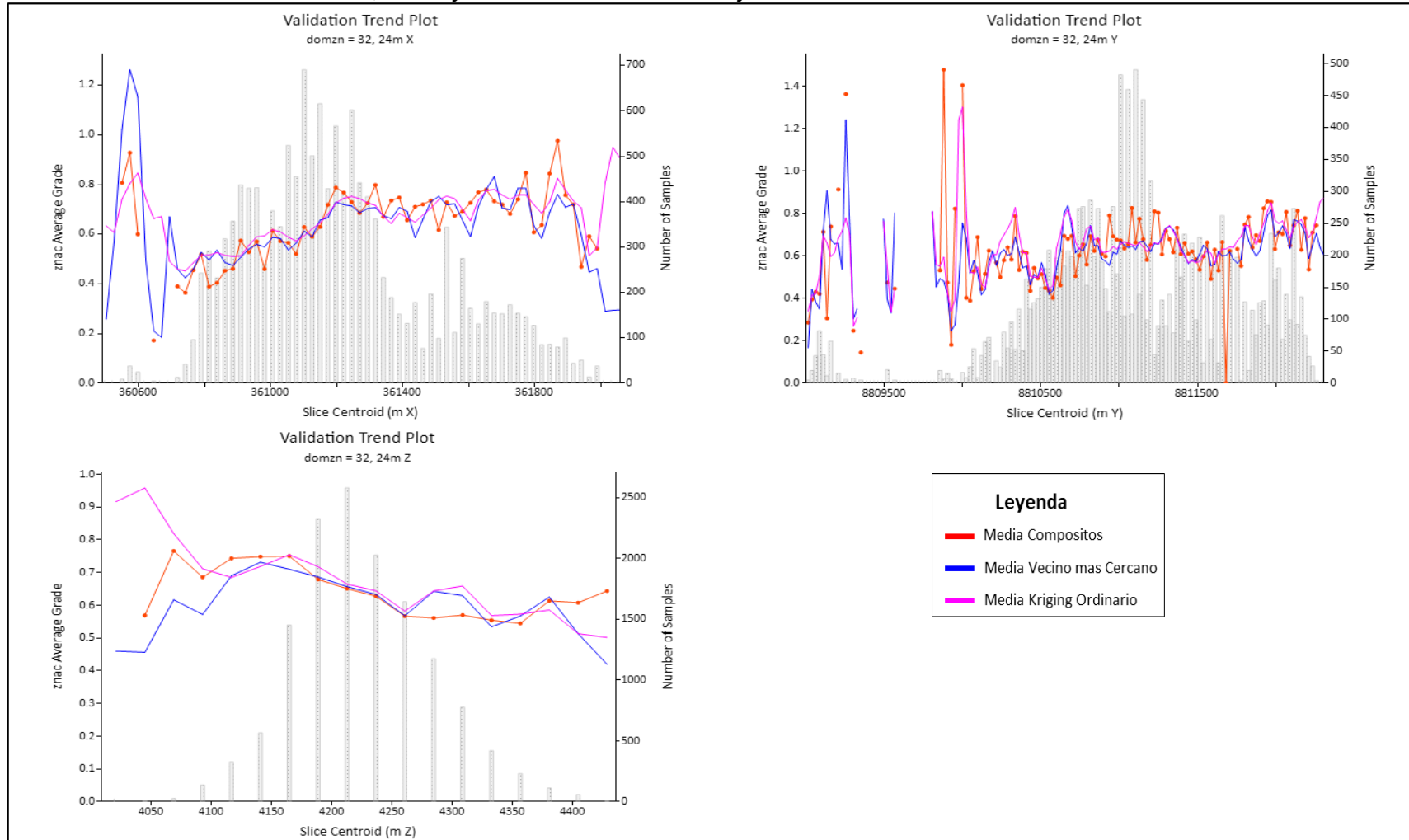
Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley alta Cu en el Conglomerado Shuco



Nota: Elaboración propia.

Figura 83

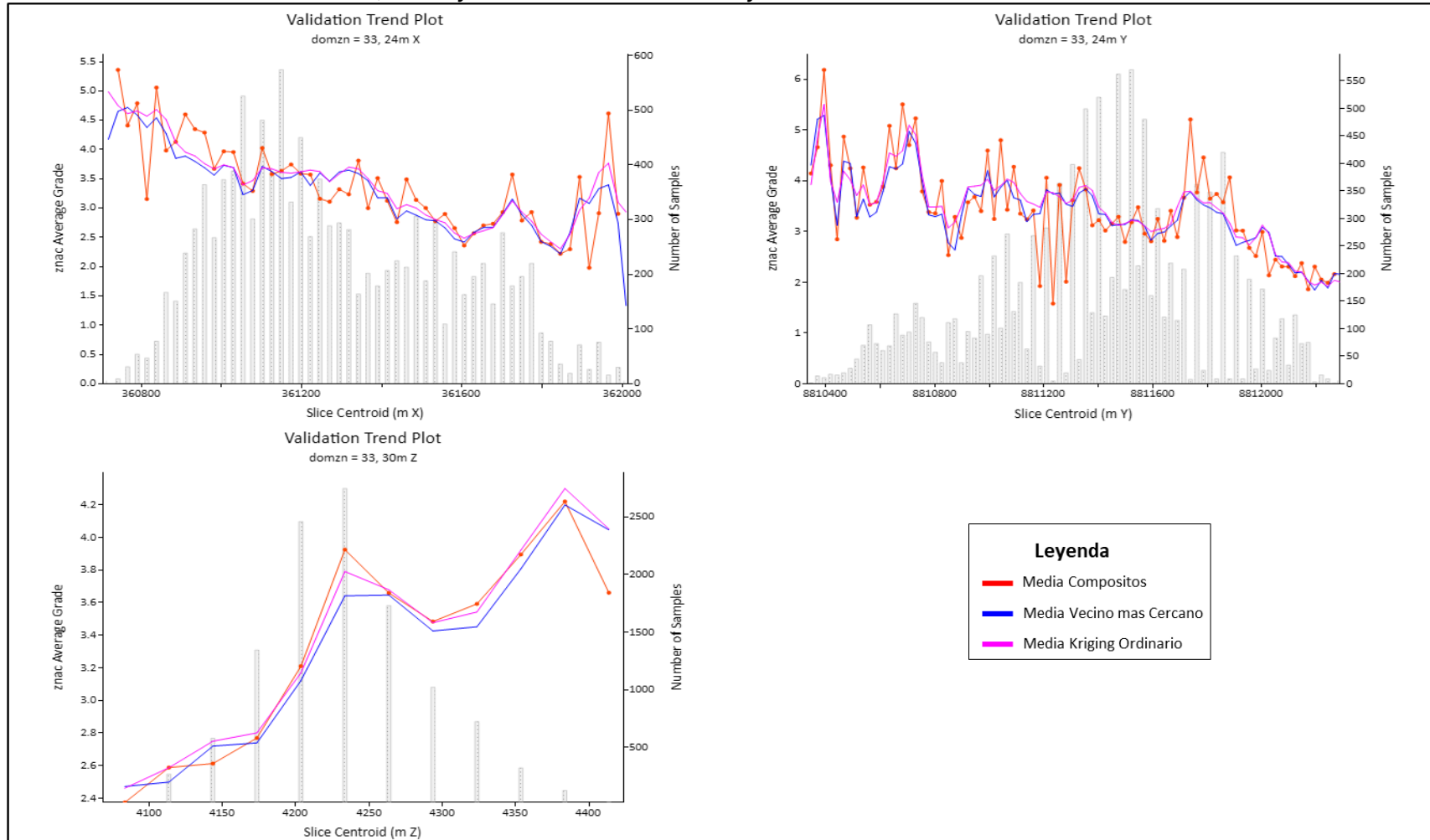
Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley media Cu en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 84

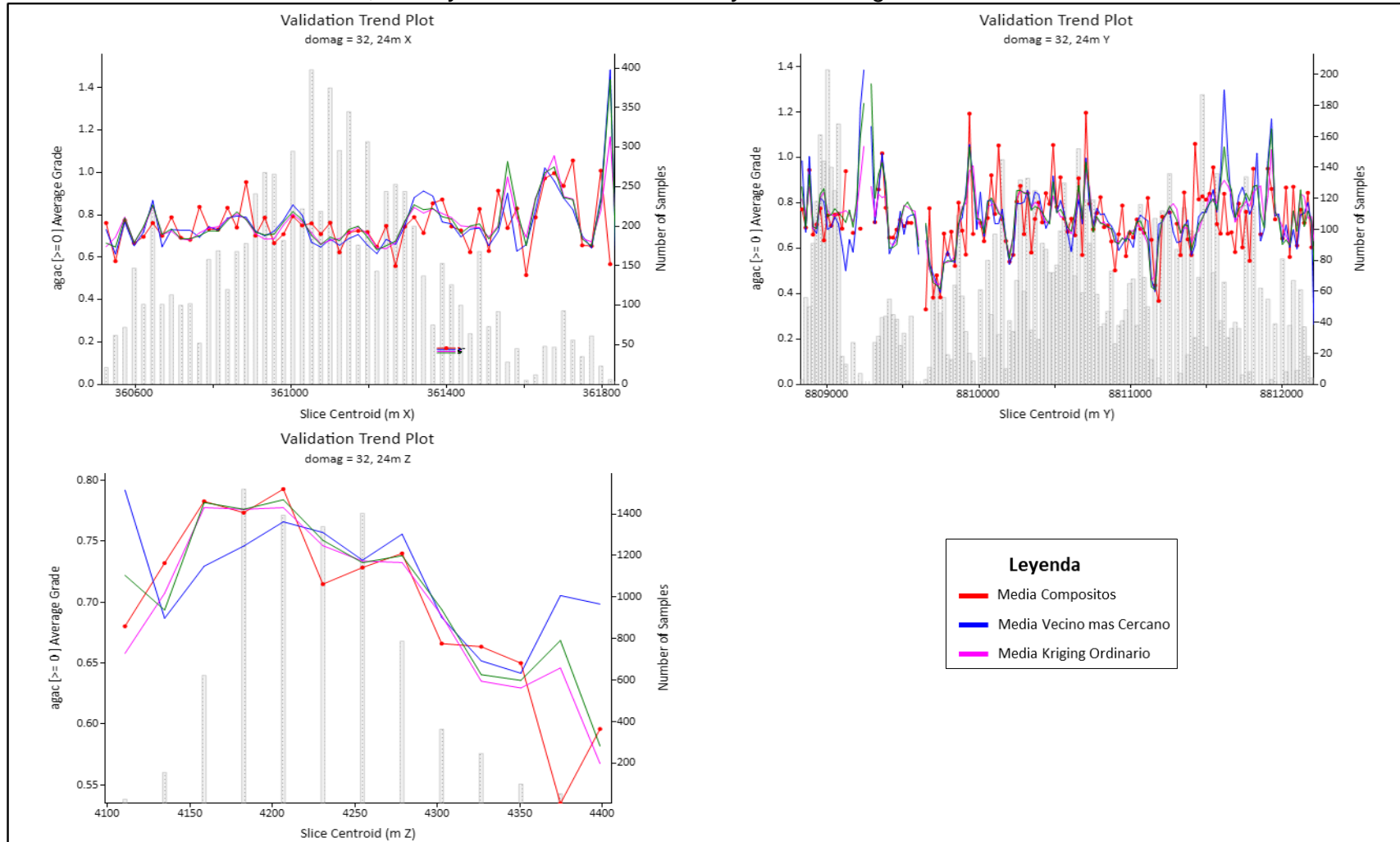
Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley alta Cu en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 85

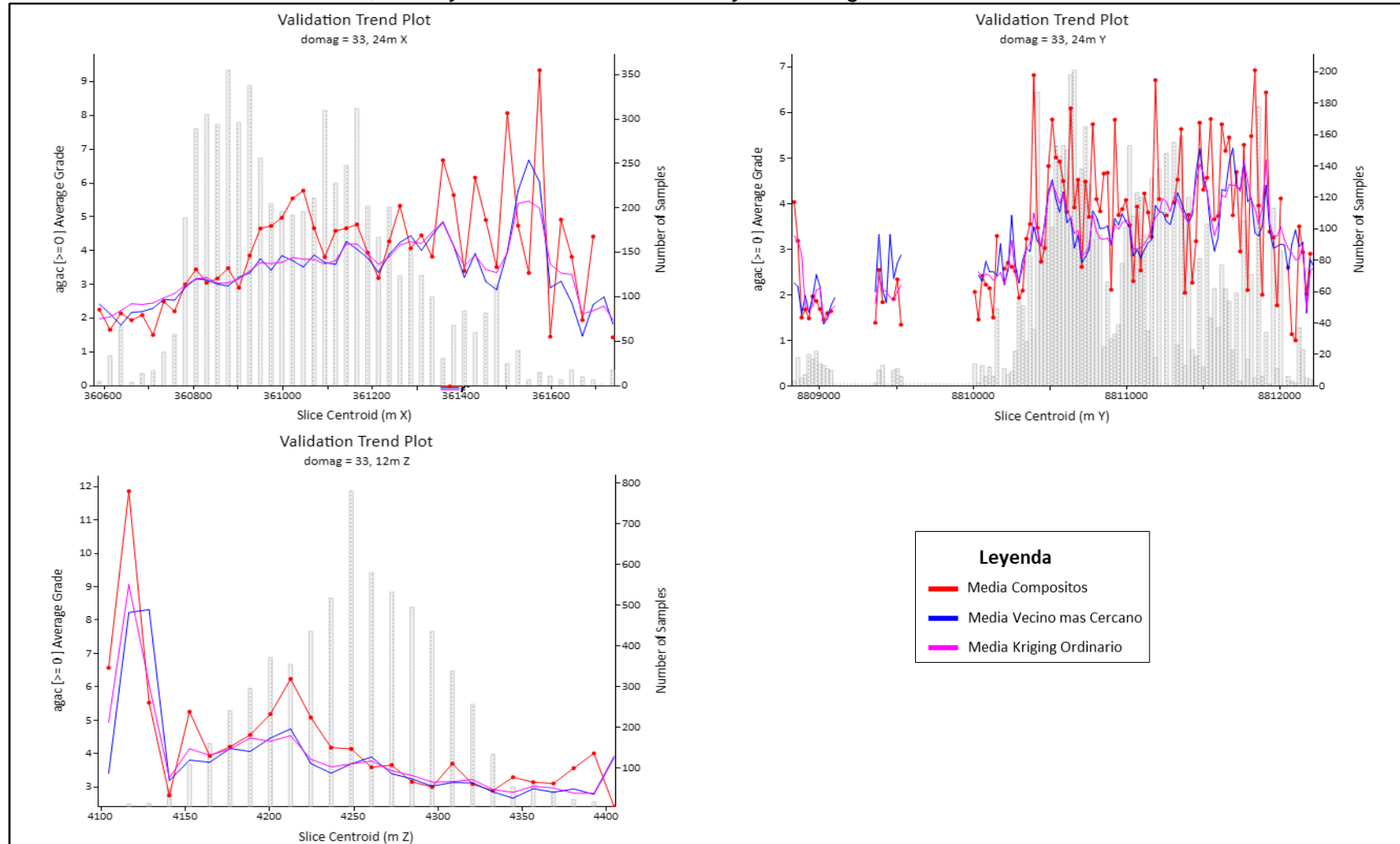
Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley media de Ag en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 86

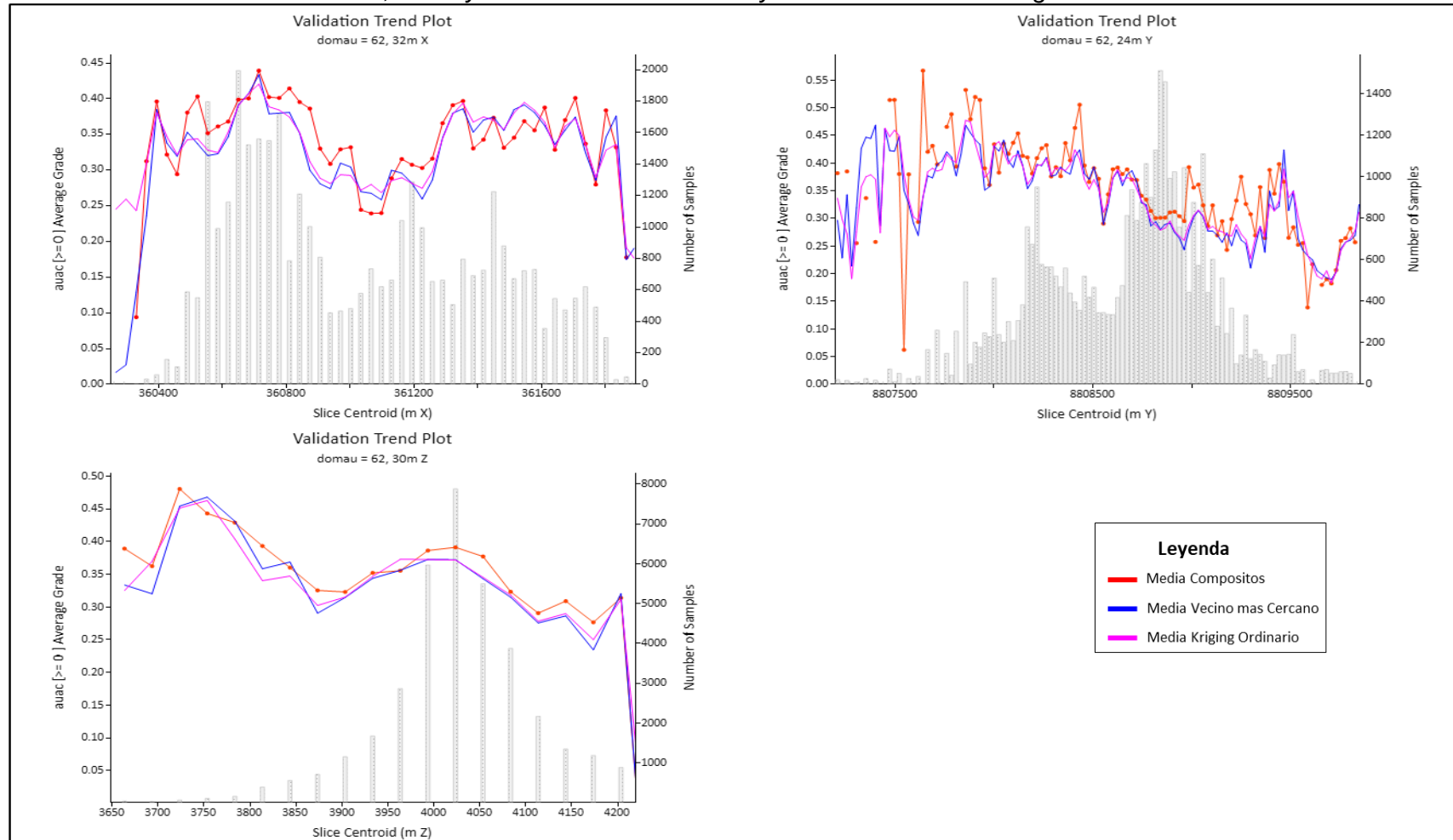
Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley alta de Ag en el Calera Medio Favorable



Nota: Elaboración propia.

Figura 87

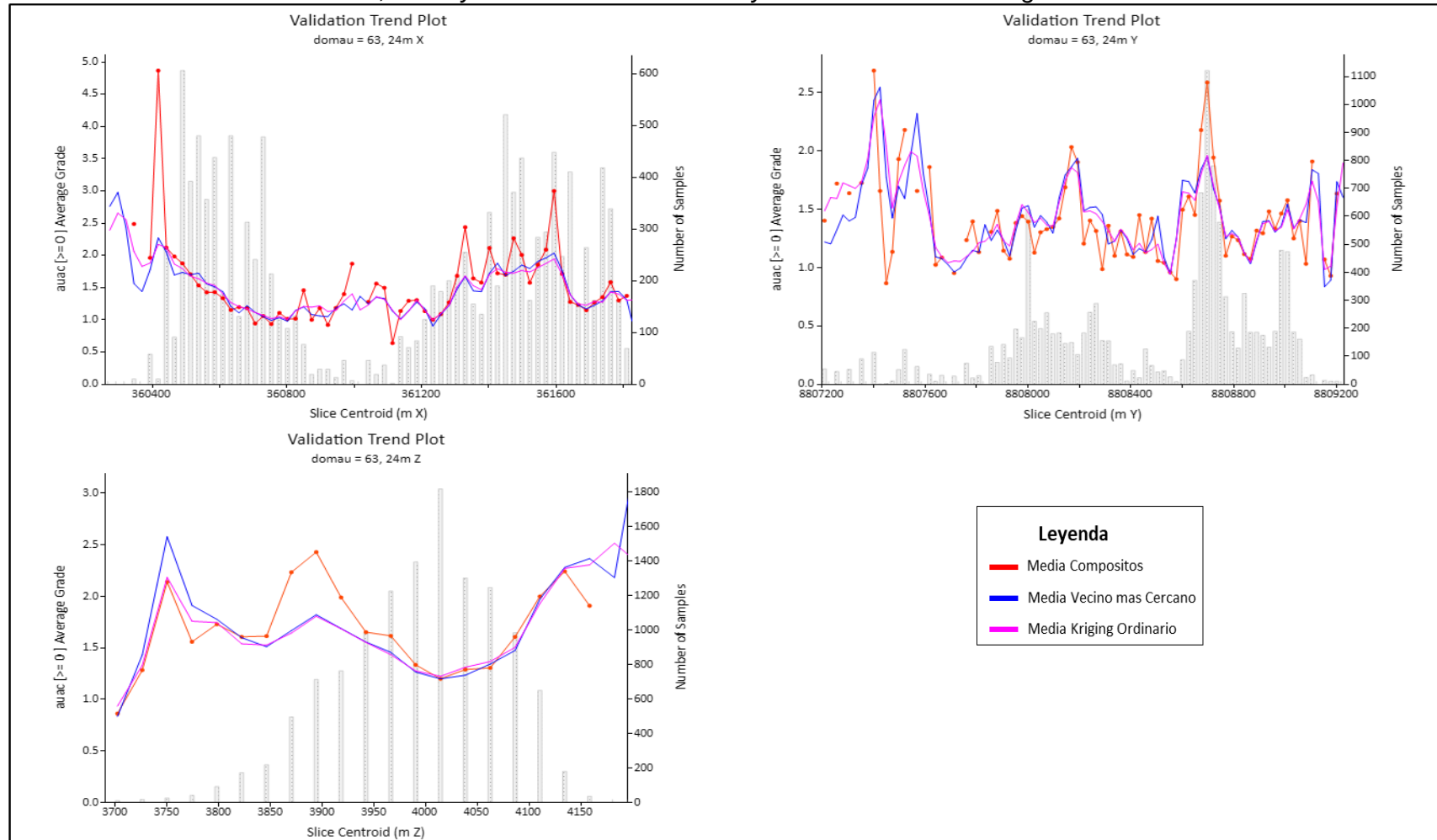
Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley media de Au en el Conglomerado Shuco



Nota: Elaboración propia.

Figura 88

Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación. Dominio de ley media de Au en el Conglomerado Shuco



Nota: Elaboración propia.

3.4.11 Asignación de la densidad.

Se asignó la densidad a los bloques según la litología, dividida adicionalmente por cuerpos mineralizados y área minera. El modelo de densidad incorporó tres áreas mineras: Tajo Norte, Marcopunta Smelter y Marcopunta Sur. Se utilizaron un total de 24,648 mediciones de densidad para calcular las densidades promedio. La densidad promedio por litología varía entre 2.42 g/cm³ y 3.26 g/cm³, con los cuerpos mineralizados promediando 2.65 g/cm³.

Tabla 19

Muestra los datos de densidad que se asigna al modelo de bloques

ZONA	MATERIAL	LITOLOGÍA	N° MUESTRAS	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	VAL. ASIGNADO AL MODELO
Tajo Norte	Desmonte	Cal_Inf	143	2.27	2.71	2.51	2.48
		Cal_Mid_Fav	262	2.21	2.72	2.52	
		Cal_Mid_Var	263	2.12	2.83	2.50	2.48
		Cal_Sup	574	2.11	2.73	2.50	2.47
		Cong_Shuco	37	2.38	2.79	2.61	2.59
		Cong_Trans	24	2.44	2.7	2.57	2.47
		Dac_Porf					2.55
		Dep_Piro					2.42
		Mitu					2.56
		Mineral	Cal_Inf	306	2.19	2.76	2.48
	Cal_Mid_Fav		1586	1.87	3.26	2.53	2.53
	Cal_Mid_Var		442	2.02	2.89	2.48	2.48
	Cal_Sup		434	1.87	3.18	2.47	2.47
	Cong_Shuco		75	2.14	2.94	2.59	2.59
Cong_Trans	112		2.28	2.66	2.47	2.47	
Dac_Porf						2.73	
Dep_Piro						2.57	
Mitu	70	2.42	2.69	2.56	2.56		

		Cal_Inf	45	2.04	3.01	2.55	2.55
		Cal_Mid_Fav	68	2.13	2.79	2.51	2.51
		Cal_Mid_Var	78	2.09	2.81	2.49	2.49
		Cal_Sup	117	2.09	2.7	2.45	2.45
	Desmonte	Cong_Shuco	41	2.38	2.88	2.67	2.67
		Cong_Trans	132	2.04	2.93	2.52	2.52
		Dac_Porf	299	2.35	2.75	2.55	2.55
		Dep_Piro	2	2.41	2.43	2.42	2.42
	Marcapunta	Mitu	68	2.26	3.03	2.65	2.65
	Smelter	Cal_Inf	521	1.79	3.6	2.62	2.62
		Cal_Mid_Fav	1568	1.76	3.76	2.69	2.69
		Cal_Mid_Var	308	2.07	2.95	2.48	2.48
		Cal_Sup	63	2.13	2.69	2.44	2.44
	Mineral	Cong_Shuco	7261	2.28	4.32	3.26	3.26
		Cong_Trans	3906	2.05	4.05	3.03	3.03
		Dac_Porf	1778	2.15	3.39	2.73	2.73
		Dep_Piro	23	2.19	3.25	2.57	2.57
		Mitu	750	2.19	3.61	2.83	2.83
		Cal_Inf					2.55
		Cal_Mid_Fav					2.51
		Cal_Mid_Var					2.49
		Cal_Sup					2.45
	Desmonte	Cong_Shuco	8	2.28	2.79	2.65	2.65
		Cong_Trans	3	2.48	2.61	2.54	2.54
		Dac_Porf	188	2.08	2.61	2.42	2.42
		Dep_Piro					2.42
	Marcapunta	Mitu	20	2.11	2.8	2.54	2.54
	Sur	Cal_Inf					2.62
		Cal_Mid_Fav					2.69
		Cal_Mid_Var					2.48
		Cal_Sup					2.44
	Mineral	Cong_Shuco	1597	2.23	4.26	3.22	3.22
		Cong_Trans	263	1.83	3.98	2.89	2.89
		Dac_Porf	850	1.69	3.43	2.51	2.51
		Dep_Piro					2.57
		Mitu	363	1.83	3.51	2.61	2.61

Nota: Elaboración propia.

3.4.12 Clasificación de recursos minerales

Para la clasificación de recursos minerales se consideró una estrategia basada en los siguientes criterios:

- Representatividad de los datos utilizados en la estimación (muestras y perforaciones)
- Metodología del límite de confianza
- Resultados del control de calidad (QAQC)

Los criterios de clasificación de los recursos minerales se basan principalmente en la distancia promedio a los tres pozos más cercanos, con un pequeño número de ajustes de degradación realizados según los resultados del control de calidad (QC).

Datos utilizados en la estimación

Se crea una variable de clasificación para considerar las muestras y perforaciones que forman parte de los criterios de clasificación. Esta variable fue calculada como la distancia anisotrópica promedio de las tres perforaciones más cercanas. Con base en esta variable y en el número de perforaciones que participaron en la estimación del bloque, la clasificación se realizó de la siguiente manera:

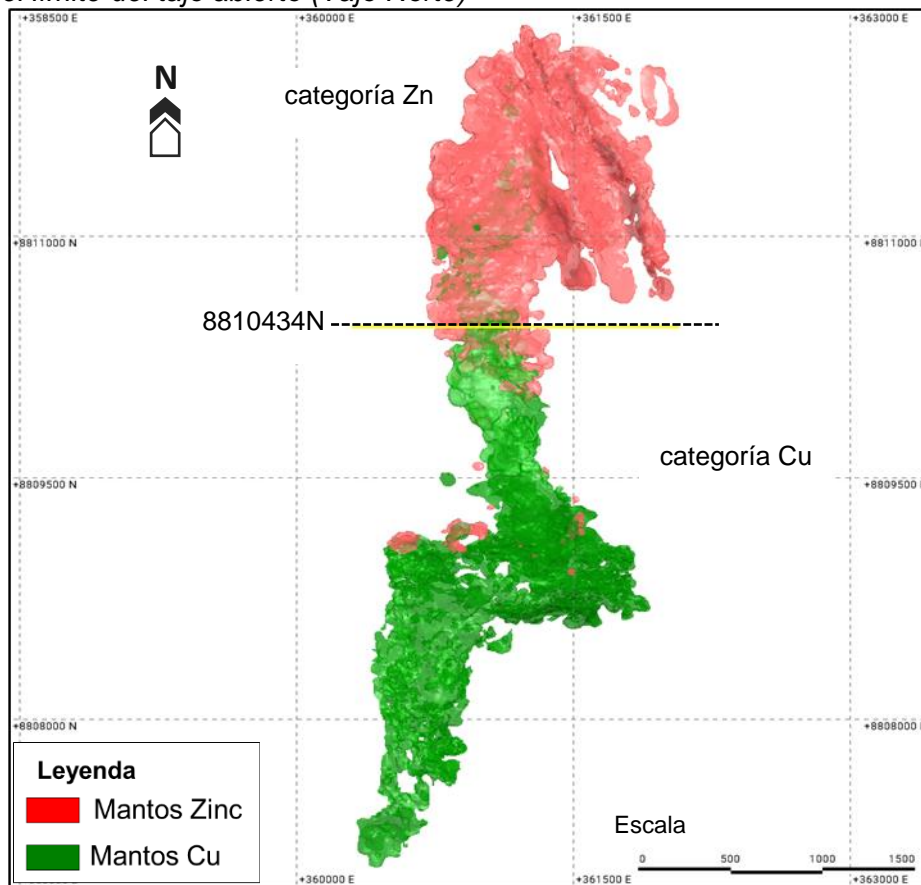
- Medido cuando hay 3 o más taladros
- Indicado cuando hay 2 o más taladros.
- Inferido cuando hay 1 o más taladros.

Límite de Confianza

El método del límite de confianza fue utilizado como otro criterio para clasificar los recursos. Este análisis se aplicó a dos zonas: la zona de zinc, correspondiente a la parte norte del depósito (tajo abierto: "Tajo Norte") y la zona de cobre, correspondiente a la parte media y sur (tajo abierto y subterráneo), "Tajo Sur" y "Marcapunta", respectivamente. La Figura 89 muestra este límite. Los parámetros para evaluar de acuerdo con el volumen de producción de un mes se determinaron de la siguiente manera Tabla 20.

Figura 89

Muestra el límite del tajo abierto (Tajo Norte)



Nota: Elaboración propia.

Tabla 20

Muestra los valores de producción del tajo abierto y la subterránea

	ZONA DE ZINC		ZONA DE COBRE	
Mining method	Open Pit	Mining Method	Subt	
Tonnes per day (t)	6,333	Tonnes per day (t)	5,000	
Tonnes per month (t)	190,000	Tonnes per month (t)	150,000	
Tonnes per quarter (t)	570,000	Tonnes per quarter (t)	450,000	
Volume per quarter (SG:2.58)	220,930	Volume per quarter (SG:3)	150,000	
Volume 50x50x10m block	216,000	Volume 50x50x10m block	160,000	

Nota: Elaboración propia.

Se definieron diferentes escenarios de malla de perforación cada 10 metros. Apoyados en el Análisis Exploratorio de Datos (EDA) y el variograma, se determinaron la varianza de Kriging (KV) y el coeficiente de variación del compuesto (CV). Luego, se calcularon el error estándar relativo y el límite de confianza al 90% para un volumen de

producción anual (A90%), y el límite de confianza al 90% para un volumen de producción trimestral (Q90%). Los resultados se resumen en la Tabla 21 y la Tabla 22.

Tabla 21

Muestra el resumen de las estadísticas a diferente malla de perforación zona de Zinc

Spacing	CV Comp	OKV	RSE	A90%	Q90%	Slope	BDV	KV/BDV
100x100	1.150	0.0950	0.35	17%	34%	0.9512	0.1902	0.50
80x80	1.150	0.0837	0.33	16%	32%	0.9385	0.1902	0.44
60x60	1.150	0.0651	0.29	14%	28%	0.9754	0.1902	0.34
50x50	1.150	0.0497	0.26	13%	25%	0.9934	0.1902	0.26
40x40	1.150	0.0331	0.21	10%	20%	0.9962	0.1902	0.17
30x30	1.150	0.0165	0.15	8%	15%	1.0036	0.1902	0.09
20x20	1.150	0.0091	0.11	6%	11%	1.0009	0.1902	0.05
10x10	1.150	0.0023	0.06	3%	6%	1.0011	0.1902	0.01

Nota: Elaboración propia.

Tabla 22

Muestra el resumen de las estadísticas a diferente malla de perforación zona de Cu

Spacing	CV Comp	OKV	RSE	A90%	Q90%	Slope	BDV	KV/BDV
100x100	1.190	0.0453	0.25	20%	25%	0.6085	0.0489	0.93
80x80	1.190	0.0482	0.26	20%	25%	0.5143	0.0489	0.99
60x60	1.190	0.0423	0.24	18%	24%	0.6130	0.0489	0.87
50x50	1.190	0.0374	0.23	17%	22%	0.6750	0.0489	0.76
40x40	1.190	0.0323	0.21	15%	21%	0.7745	0.0489	0.66
30x30	1.190	0.0209	0.17	14%	17%	0.8855	0.0489	0.43
20x20	1.190	0.0130	0.14	11%	15%	0.9344	0.0489	0.27
10x10	1.190	0.0045	0.08	6%	8%	0.9957	0.0489	0.09

Nota: Elaboración propia.

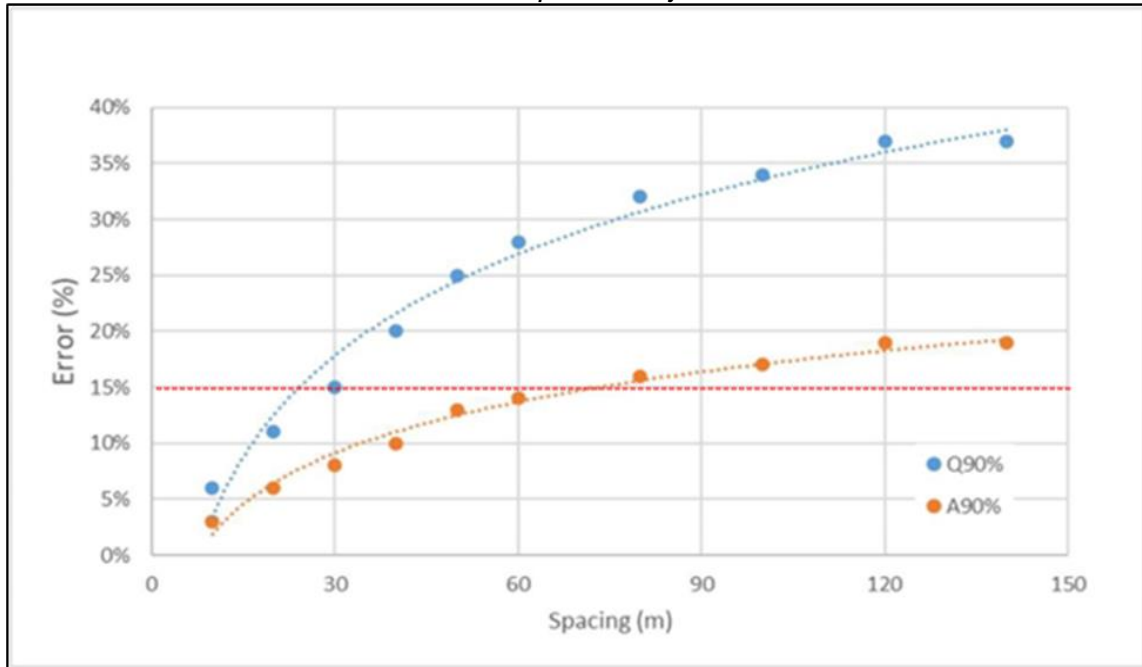
Finalmente, se determinó que en la zona de zinc la malla de 30x30m cumple con el error menor o igual al 15% en Q90%, por lo tanto, se adoptó la distancia de 30m para la categoría Medido y la malla 60x60m cumple con un error menor o igual al 15% en A90%, por lo tanto, se adoptó la distancia de 60m para la categoría Indicado.

En la zona de cobre. se determinó que la malla de 20x20m cumple con el error menor o igual al 15% en Q90%, por lo tanto, se adoptó la distancia de 20m para la categoría Medido y la malla 40x40m cumple con un error menor o igual al 15% en A90%, por lo tanto,

se adoptó la distancia de 40m para la categoría Indicado. Estos valores se muestran en la Figura 90 y la Figura 91, para la zona de zinc y la zona de cobre, respectivamente.

Figura 90

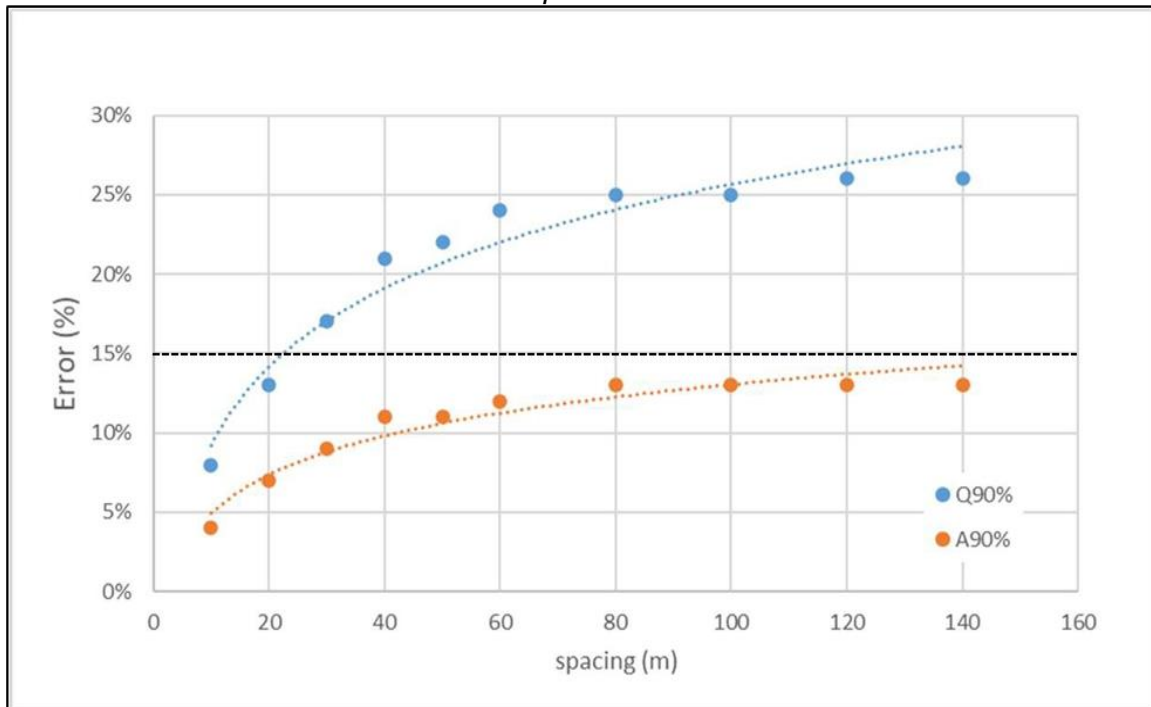
Muestra el análisis de límite de confianza para el Tajo Abierto Zn



Nota: Elaboración propia

Figura 91

Muestra el análisis de límite de confianza para la Subterránea Cu



Nota: Elaboración propia

Evaluación del Riesgo por QAQC

La estimación de recursos minerales se basa en los datos obtenidos de los taladros diamantinos. La presencia de errores o datos de baja calidad puede afectar gravemente las decisiones sobre la explotación, llevando a estimaciones erróneas de los recursos minerales. La evaluación de riesgos relacionados con la calidad de los datos de sondaje se convierte en una herramienta clave para identificar zonas de alta incertidumbre y aplicar estrategias de mitigación adecuadas. Para mitigar este riesgo, es esencial implementar un proceso de control de calidad, conocido como QAQC, que valide la exactitud y precisión de los datos obtenidos. En El Brocal, la gestión de calidad de los datos es vital para asegurar que la estimación de recursos minerales sea más confiables posibles. se asignó un nivel de riesgo a cada perforación o zona dentro del depósito.

▪ Criterios de clasificación de riesgo

Se definieron tres niveles de riesgo para clasificar cada sondaje, basándose en la existencia de controles QAQC, el desempeño de dichos controles y la aplicación de trabajos de mitigación. Se realizó en análisis de los resultados de QAQC según zona y elemento de interés:

- En la zona de Tajo Norte se consideró los resultados de QAQC de Pb y Zn.
- En la zona Marcapunta se consideró los resultados de Cu.

Tabla 23

Muestra los criterios para la clasificación de riesgo por QAQC

RIESGO	CÓDIGO RIESGO	CRITERIO
Alto	1	Sondaje sin QAQC
		Sondaje con QAQC - Resultados malos
Medio	2	Sondaje sin QAQC con Mitigación
		Sondaje con QAQC - Resultados intermedios
Bajo	3	Sondaje con QAQC - Resultados aceptables

Nota: Elaboración propia

- **Metodología de clasificación del riesgo QAQC.**

- **Evaluación de los resultados de QAQC en cada sondaje**

La clasificación del riesgo QAQC en los datos de sondajes es realizada con base en tres tipos de controles fundamentales: blancos, duplicados y estándares. Cada uno de estos controles tiene un umbral de aceptación basado en criterios de precisión y exactitud.

Tabla 24

Muestra los rangos aceptables para los controles de QAQC

TIPO DE MUESTRA CONTROL		CRITERIO RESULTADOS QAQC ACEPTABLE
Blancos	Finos	BLK <= 5 x LLD
	Gruesos	BLK <= 10 x LLD
Duplicados	Finos	HARD DF < 10%
	Gruesos	HARD DG < 20%
	Gemela	HARD GM < 30%
Estándar		Best Value - 3SD <= STD <= Best Value + 3SD

Nota: Elaboración propia.

- **Generación de puntajes según la cantidad de muestras aprobadas**

Se analizó el QAQC de tal manera que, del total de muestras insertadas según el tipo de control, la cantidad de resultados aceptables obtenidos sean mayor a un 50% y se le asignó un puntaje: 0= QAQC No aceptable, 1= QAQC aceptable. Por ejemplo, si se insertó 4 muestras control y 3 presentaron buenos resultados (3/4 = 75%, que es mayor a al 50%), se le asignó puntaje 1.

Tabla 25

Generación de puntajes del desempeño de QAQC

TIPO DE MUESTRA CONTROL	% MUESTRAS CON PASS ACEPTABLE	PUNTAJE QAQC	DESCRIPCIÓN
Blancos	[0% - 50%>	0	QAQC no aceptable
	[50% - 100%]	1	QAQC aceptable
Duplicados	[0% - 50%>	0	QAQC no aceptable
	[50% - 100%]	1	QAQC aceptable
Estándar	[0% - 50%>	0	QAQC no aceptable
	[50% - 100%]	1	QAQC aceptable

Nota: Elaboración propia.

- **Generación de puntajes del desempeño de QAQC**

Se sumó los puntajes obtenidos, para ver cuántos tipos de muestras control presentan resultados aceptables y se le asignó un código de riesgo, según la siguiente tabla:

Tabla 26

Muestra el valor del riesgo de acuerdo con los puntajes de QAQC

SUMA DE PUNTAJE QAQC	RIESGO	RESULTADO QAQC	DESCRIPCIÓN
[0 - 2>	1	Resultados malos	Solo un tipo de muestra control con resultados aceptables
[2 - 3>	2	Resultados intermedios	Tiene dos tipos de muestras control con resultados aceptables
3	3	Resultados aceptables	Los 3 tipos de muestra control tienen resultados aceptables

Nota: Elaboración propia.

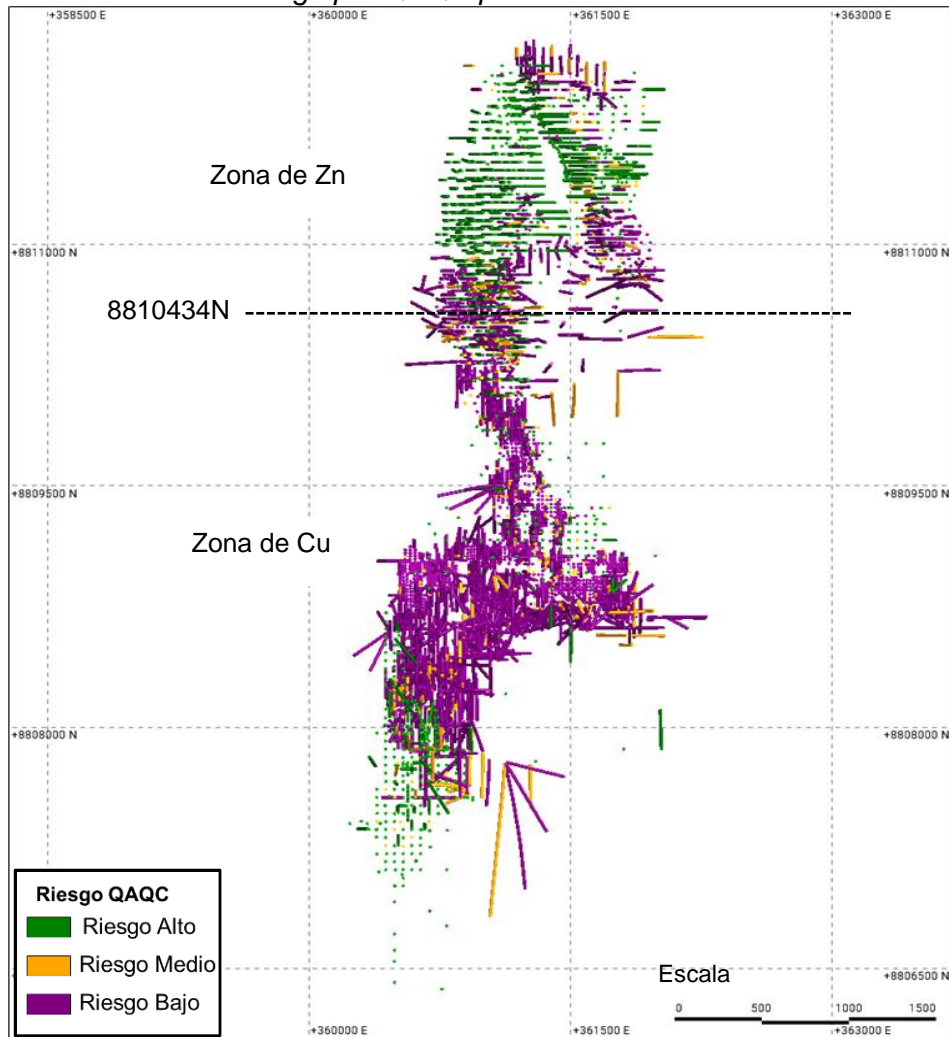
Por ejemplo, si un sondejaje presenta duplicados con resultados no aceptables, pero si tiene resultados aceptables de blancos y estándares, tendrá un código 2 (Riesgo Medio). Si un sondejaje presenta resultados aceptables en los 3 tipos de muestras control (buena precisión, exactitud, sin contaminación) tendrá un código 1 (Riesgo Bajo).

- **Resultados de evaluación del riesgo por QAQC según zona**

- Alto riesgo con código 1 para resultados de QAQC pobres o sin resultados de QAQC.
- Riesgo medio con código 2, donde QAQC y el trabajo de mitigación presentaron resultados razonables.
- Bajo riesgo con código 3, con resultados de QAQC aceptables y buenos.

Figura 92

Muestra la distribución del riesgo por QAQC por zonas



Nota: Elaboración propia.

Tabla 27

Muestra los critérios para categorizar los recursos minerales

	Medido	Indicado	Inferido	ZONA
Espaciamiento de sondajes	30	60	150	OPEN PIT
	20	40	80	SUBTERRANEA
N° sondajes	>=3	2	1	

Nota: Elaboración propia.

Tabla 28

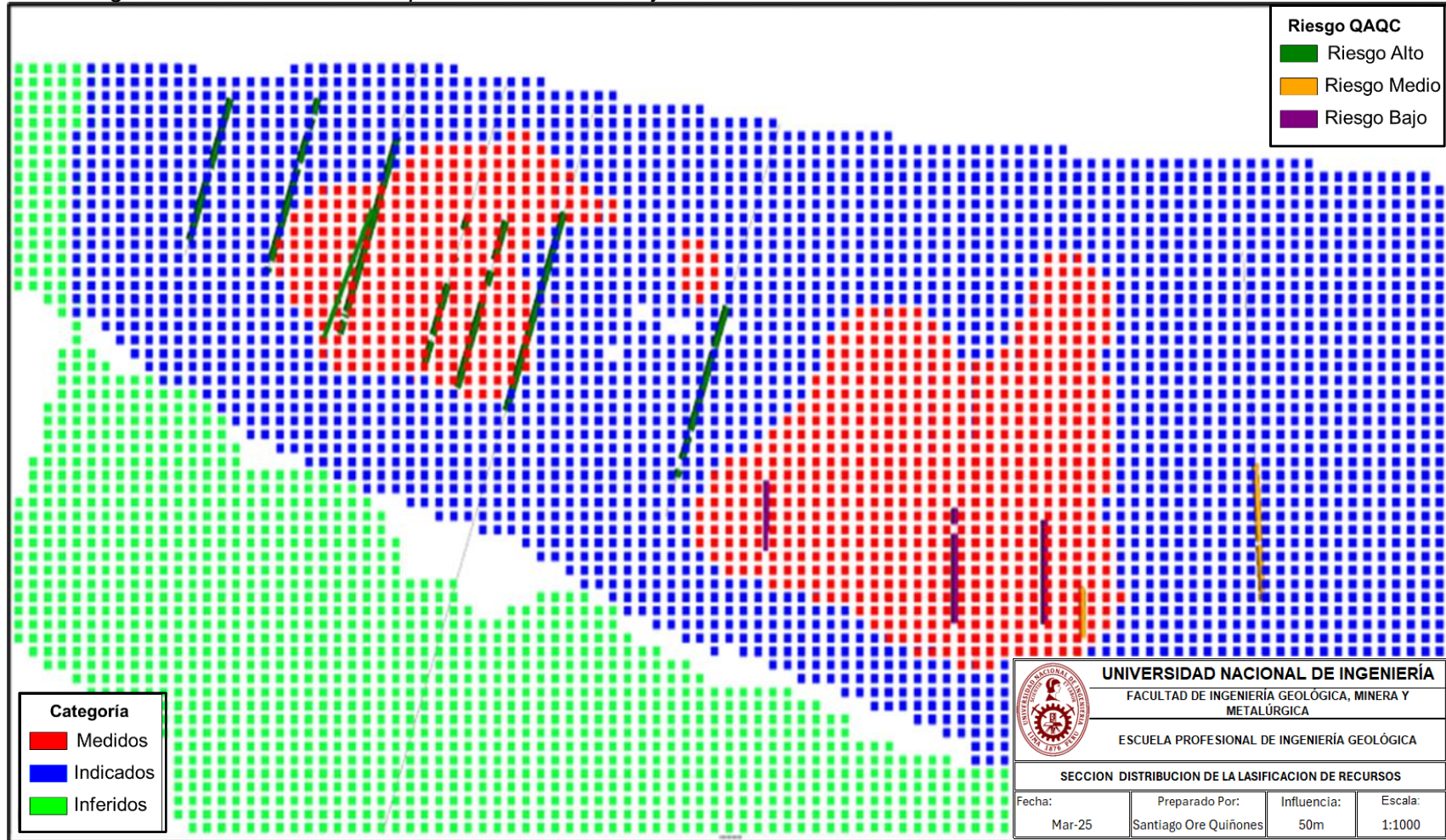
Muestra el critério de degradación de la categoría por riesgo de QAQC

RIESGO QAQC	CATEGORÍA
1	Recurso medido e indicado se degrada a indicado e inferido, respectivamente
2	Recurso medido se degrada a recurso indicado
3	Se mantiene la categoría

Nota: Elaboración propia.

Figura 93

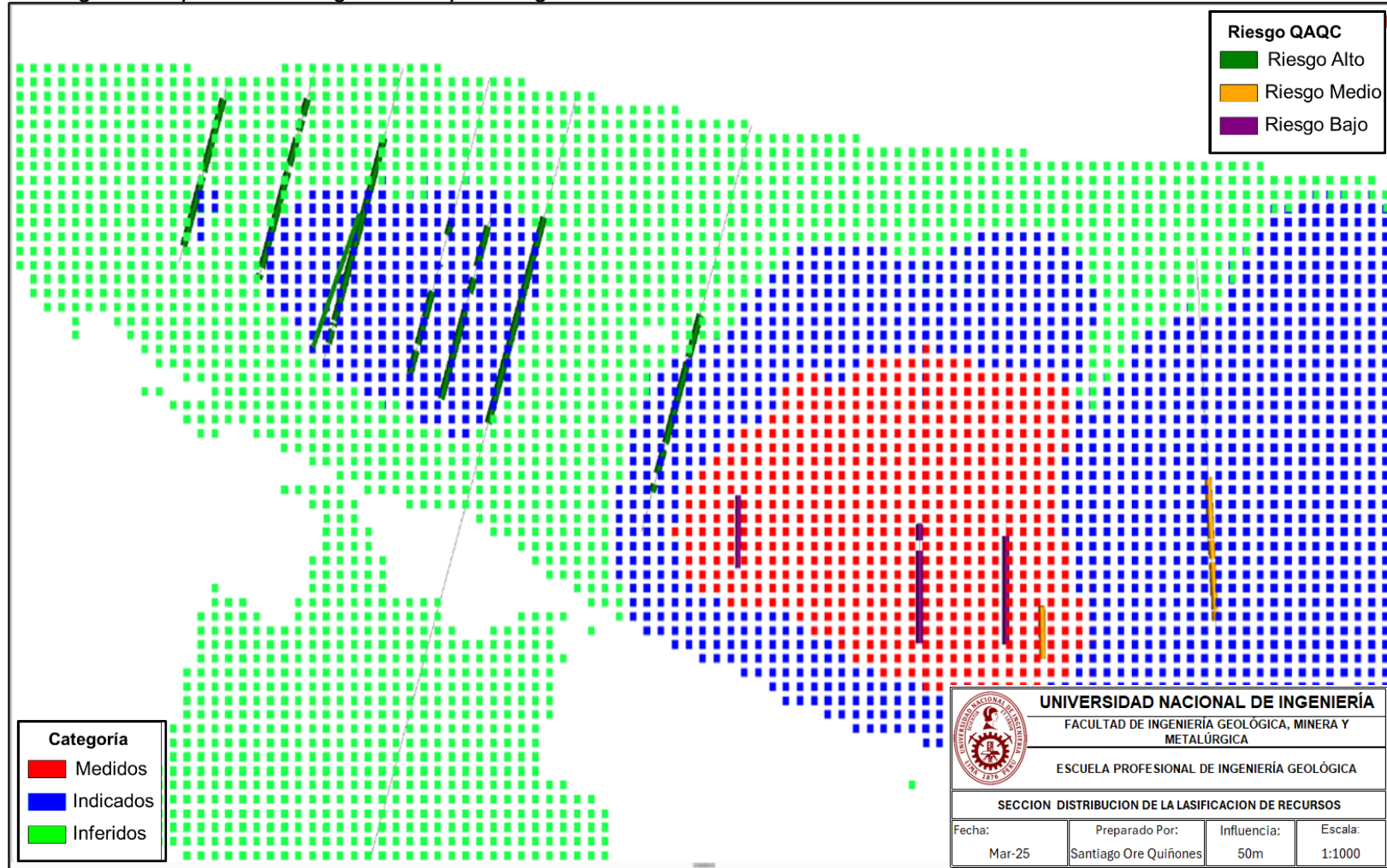
Muestra la categoría considerando solo espaciamiento de sondajes



Nota: Elaboración propia.

Figura 94

Muestra la categoría después de la degradación por riesgo de QAQC



Nota: Elaboración propia.

Potencial razonable para la extracción económica (RPEE)

Como parte del proceso de estimación de los Recursos Minerales, se desarrolló una evaluación para determinar la razonabilidad del material estimado en el modelo de bloques de El Brocal para la extracción económica. Esto cumple con los requisitos de divulgación de recursos.

- Definición del método de minado.
- Definición de costos establecidos para la definición de reservas minerales.
- Parámetros metalúrgicos.
- NSR calculado e incluido como parte del archivo del modelo de bloques
- Definición de la mina subterránea (UG) y a cielo abierto (OP), y la continuidad

La Tabla 29 y Tabla 30 muestran el resumen de los criterios y parámetros utilizados en este proceso.

Tabla 29

Se muestra los parámetros usados para la evaluación del RPEE

PARAMETER	DESCRIPTION
Metal Prices	8,000 USD / t Cu 1,600 USD / Oz Au 25 USD / Oz Ag 2,286 USD / t Pb 2,385 USD / t Zn
NSR Calculation	OP: $(\text{GradeZn}(\%) * 11.12 * \text{Recovery Zn}(\%) + \text{GradeAg}(\text{Oz/t}) * 15.87 * \text{Recovery AgZn}(\text{Oz/t}) + \text{GradePb}(\%) * 12.93 * \text{Recovery Pb}(\%) + \text{GradeAg}(\text{Oz/t}) * 21.36 * \text{Recovery AgPb}(\text{Oz/t})) / 100$ UG: $(\text{GradeCu}(\%) * 48.58 * \text{Recovery Cu}(\%) + \text{GradeAu}(\text{g/t}) * 30.86 * \text{Recovery Au}(\text{g/t}) + \text{GradeAg}(\text{Oz/t}) * 19.18 * \text{Recovery Ag}(\text{Oz/t})) / 100$
Cut-off grade	OP: Zn: 27.14 USD / t ; Cu: 25.95 USD / t UG: North and Center: 38.94 USD / t; Southeast and Southwest: 37.49 USD / t and Southwest 2 and South: 41.12 USD / t

Nota: Elaboración propia.

Tabla 30

Muestra las recuperaciones metalúrgicas utilizadas para la evaluación del RPEEE

METAL	RANGO DE LEY	RECUPERACIÓN METALÚRGICA FORMULA/VALOR
	[0 - 0.2>	0
	[0.2 - 1.3>	$(LeyCu(\%)-0.2)*100/LeyCu(\%)$
cu(%)	[1.3 - 2.35>	$96.15-(21.92*LeyCu(\%))+13.37*(LeyCu(\%)^2)-(2.372*LeyCu(\%)^3)$
	≥ 2.35	90%
	<0 - 0.3]	0
Ag (Oz/t)	<0_3 - 0.5]	30%
	>0.5	55%
Au (g/t)	<0-0.14]	0
	>0.14	33%
	<0 - 0.23]	0
	<0_23 - 0.4>	$(LeyPb-0.23)*100/LeyPb$
Pb (%)	[0.4 _ 1.8>	$(50.687-45.632*LeyPb+62.73*LeyPb^2-18.453*LeyPb^3)$
	$\geq 1_8$	65
	<0-0.83]	0
	<0.83 - 1.4>	$(LeyZn-0.83)*100/LeyZn$
Zn (%)	[1.4 - 5>	$(14.154+36.133*LeyZn-11.001*LeyZn^2+1.1434*LeyZn^3)$
	≥ 5	63

Nota: Elaboración propia.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Reporte de recursos minerales

Los recursos minerales de la Mina EL Brocal son los siguientes:

Tabla 31

Muestra el reporte de Recursos Minerales para el Tajo Abierto de Zn-Pb.

RECURSOS TOTALES TAJO ABIERTO (Zn-Pb)							
Categoría	Tonelaje	Ag	Pb	Zn	Cu	As	NSR
	Miles t	Oz/t	%	%	%	%	US\$/t
Medido	6,006	2.07	1.33	3.05	0.24	0.04	75
Indicado	4,313	1.88	0.74	2.55	0.12	0.05	61
Medido & Indicado	10,319	1.99	1.08	2.84	0.19	0.04	69
Inferido	1,894	3.01	0.36	1.59	0.09	0.07	66

Nota: Elaboración propia.

Tabla 32

Muestra el reporte de Recursos Minerales para el Tajo Abierto de Cu

RECURSOS TOTALES TAJO ABIERTO (Cu)							
Categoría	Tonelaje	Ag	Pb	Zn	Cu	As	NSR
	Miles t	Oz/t	%	%	%	%	US\$/t
Medido	2,207	3.19	0.49	0.84	2.44	0.22	152
Indicado	26,154	0.52	0.09	0.07	1.68	0.44	83
Medido & Indicado	28,361	0.73	0.12	0.13	1.74	0.42	88
Inferido	13,369	0.5	0.08	0.07	1.56	0.4	75

Nota: Elaboración propia.

Tabla 33

Muestra el reporte de Recursos Minerales para el Subterránea (UG)

RECURSOS TOTALES MINA SUBTERRÁNEA (Ug)						
Categoría	Tonelaje	Cu	Ag	Au	As	NSR
	Miles t	%	Oz/t	g/t	%	US\$/t
Medido	1,013	2.49	1.29	1.02	0.81	149
Indicado	50,588	1.56	0.83	0.93	0.54	96
Medido & Indicado	51,601	1.58	0.84	0.93	0.54	97
Inferido	19,511	1.76	0.72	0.81	0.53	103

Nota: Elaboración propia.

4.2 Resultados de la reconciliación.

La reconciliación es una herramienta fundamental para validar la precisión y confiabilidad del modelo de estimación de recursos minerales.

El objetivo de la reconciliación es entender las razones de las desviaciones de tonelaje y ley encontradas en los modelos de Largo Plazo, Corto Plazo, Ore Control y planta, una vez que se adquiere este conocimiento, se pueden tomar las medidas correctivas.

La reconciliación se realiza mediante los sólidos ejecutados en determinado período de tiempo, mensual, trimestral y anual.

En la industria minera, se considera que una diferencia de $\pm 15\%$ es un rango aceptable para asegurar la confiabilidad del modelo y mantener la viabilidad técnica y económica de la operación minera.

Factores de conciliación:

F1:

Mide la desviación del modelo largo plazo vs el modelo corto plazo.

$$F1 = \frac{\textit{Modelo de Corto Plazo}}{\textit{Modelo de largo Plazo}}$$

F2:

Mide la desviación de la producción mina vs el reporte de planta.

$$F2 = \frac{\textit{Producción Mina}}{\textit{Reporte Planta}}$$

F3:

Mide la desviación del modelo largo plazo vs el reporte de planta.

$$F3 = \frac{\textit{Modelo Largo Plazo}}{\textit{Reporte Planta}}$$

4.2.1 Reconciliación Subterránea (UG).

Tabla 34

Muestra los resultados de la reconciliación por años. Factor F1

Año	MODELO LARGO PLAZO				MODELO CORTO PLAZO				Factores F1			
	Tonelaje	Cu	Ag	Au	Tonelaje	Cu	Ag	Au	F1Ton	F1Cu	F1Ag	F1Au
	t	%	Oz/t	g/t	t	%	Oz/t	g/t				
2020	1,657,263	2.23	0.71	0.61	1,682,448	2.35	0.71	0.61	1.02	1.05	1.01	1.00
2021	2,299,724	1.69	0.75	0.90	2,284,367	1.68	0.71	0.92	0.99	0.99	0.95	1.03
2022	1,561,342	1.52	0.70	0.73	1,571,056	1.53	0.64	0.75	1.01	1.01	0.91	1.02
2023	3,528,713	1.46	0.65	0.80	3,496,909	1.54	0.68	0.74	0.99	1.06	1.05	0.92
TOTAL	9,047,043	1.67	0.69	0.78	9,034,780	1.72	0.69	0.76	1.00	1.03	0.99	0.98

Nota: Elaboración propia.

Tabla 35

Muestra los resultados de la reconciliación por años. Factor F3

Año	MODELO LARGO PLAZO				REPORTE PLANTA				Factores F3			
	Tonelaje	Cu	Ag	Au	Tonelaje	Cu	Ag	Au	F3Ton	F3Cu	F3Ag	F3Au
	t	%	Oz/t	g/t	t	%	Oz/t	g/t				
2020	1,657,263	2.23	0.71	0.61	1,659,731	1.97	0.78	0.55	0.95	0.90	1.03	0.92
2021	2,299,724	1.69	0.75	0.90	2,517,474	1.70	0.96	0.78	1.10	1.01	1.27	0.87
2022	1,561,342	1.52	0.70	0.73	1,640,259	1.65	0.81	0.62	1.04	1.08	1.15	0.83
2023	3,528,713	1.46	0.65	0.80	3,456,535	1.68	0.90	0.70	0.99	1.06	1.05	0.92
TOTAL	9,047,043	1.67	0.69	0.78	9,273,999	1.73	0.88	0.68	1.03	1.04	1.27	0.87

Nota: Elaboración propia.

Tabla 36*Muestra los resultados de la reconciliación por meses del año 2023. Factor F1.*

Año	MODELO LARGO PLAZO				MODELO CORTO PLAZO				Factores F1			
	Tonelaje	Cu	Ag	Au	Tonelaje	Cu	Ag	Au	F1Ton	F1Cu	F1Ag	F1Au
	t	%	Oz/t	g/t	t	%	Oz/t	g/t				
Ene-23	209,970	1.56	0.58	0.50	205,119	1.69	0.57	0.53	0.98	1.08	0.98	1.06
Feb-23	262,987	1.43	0.82	0.64	260,034	1.37	0.79	0.64	0.99	0.96	0.97	1.00
Mar-23	570,259	1.56	0.65	0.65	565,621	1.54	0.71	0.61	0.99	0.99	1.10	0.94
Abr-23	280,894	1.43	0.61	0.53	281,637	1.47	0.62	0.53	1.00	1.03	1.02	0.99
May-23	292,598	1.46	0.62	0.54	293,372	1.50	0.63	0.54	1.00	1.03	1.02	0.99
Jun-23	321,669	1.47	0.69	0.77	321,687	1.59	0.68	0.67	1.00	1.08	0.99	0.86
Jul-23	324,385	1.45	0.57	0.80	319,737	1.52	0.60	0.71	0.99	1.04	1.06	0.88
Ago-23	280,248	1.59	0.55	1.11	276,812	1.54	0.58	0.94	0.99	0.97	1.04	0.85
Set-23	261,252	1.35	0.72	1.47	259,707	1.40	0.71	1.09	0.99	1.03	0.98	0.74
Oct-23	228,976	1.24	0.74	0.91	227,405	1.32	0.78	0.95	0.99	1.06	1.06	1.04
Nov-23	384,772	1.38	0.60	0.74	379,393	1.54	0.72	0.71	0.99	1.11	1.19	0.96
Dic-23	391,595	1.47	0.65	0.86	388,021	1.83	0.69	0.87	0.99	1.24	1.07	1.02
TOTAL	3,809,608	1.46	0.65	0.78	3,778,546	1.54	0.68	0.72	0.99	1.05	1.05	0.92

Nota: Elaboración propia.

Tabla 37*Muestra los resultados de la reconciliación por meses año 2023. Factor F3*

Año	MODELO LARGO PLAZO				REPORTE PLANTA				Factores F3			
	Tonelaje	Cu	Ag	Au	Tonelaje	Cu	Ag	Au	F3Ton	F3Cu	F3Ag	F3Au
	t	%	Oz/t	g/t	t	%	Oz/t	g/t				
Ene-23	209,970	1.56	0.58	0.50	277,490	1.78	0.61	0.53	1.32	1.14	1.06	1.07
Feb-23	262,987	1.43	0.82	0.64	255,614	1.63	0.94	0.58	0.97	1.14	1.15	0.90
Mar-23	570,259	1.56	0.65	0.65	598,628	1.49	0.70	0.47	1.05	0.96	1.08	0.72
Abr-23	280,894	1.43	0.61	0.53	257,568	1.71	0.68	0.48	0.92	1.19	1.12	0.91
May-23	292,598	1.46	0.62	0.54	268,300	1.75	0.71	0.49	0.92	1.19	1.15	0.91
Jun-23	321,669	1.47	0.69	0.77	288,977	1.60	0.80	0.65	0.90	1.09	1.16	0.84
Jul-23	324,385	1.45	0.57	0.80	283,170	1.68	0.68	0.72	0.87	1.16	1.19	0.90
Ago-23	280,248	1.59	0.55	1.11	219,400	1.92	0.81	1.05	0.78	1.21	1.46	0.95
Set-23	261,252	1.35	0.72	1.47	274,416	1.43	0.78	0.90	1.05	1.06	1.08	0.61
Oct-23	228,976	1.24	0.74	0.91	309,108	1.35	0.84	1.04	1.35	1.08	1.14	1.14
Nov-23	384,772	1.38	0.60	0.74	306,827	1.51	0.72	0.73	0.80	1.09	1.19	0.98
Dic-23	391,595	1.47	0.65	0.86	374,605	1.64	0.77	0.83	0.96	1.11	1.19	0.97
TOTAL	3,809,608	1.46	0.65	0.78	3,714,103	1.61	0.75	0.69	0.97	1.10	1.16	0.88

Nota: Elaboración propia.

4.2.2 Reconciliación Tajo Abierto (OP).

La reconciliación del Tajo Abierto se realiza solo la comparación del modelo de largo plazo vs el modelo de corto plazo.

Tabla 38

Muestra los resultados de la reconciliación de Tajo Abierto por años. Factor F1

	MODELO LARGO PLAZO				MODELO CORTO PLAZO				Factores F1			
	Tonelaje	Zn	Pb	Ag	Tonelaje	Zn	Pb	Ag	F1Ton	F1Zn	F1Pb	F1Ag
Año	t	%	%	Oz/t	t	%	%	Oz/t				
2020	2,193,108	3.36	1.08	1.34	1,995,920	3.24	1.19	1.28	0.91	0.97	1.10	0.96
2021	1,421,514	2.07	0.70	2.66	1,566,167	2.35	0.82	2.59	1.10	1.13	1.17	0.97
2022	1,164,694	1.98	0.68	2.11	1,325,241	2.25	1.07	2.31	1.14	1.14	1.58	1.09
TOTAL	4,779,315	2.64	0.87	1.92	4,887,328	2.69	1.04	1.98	1.02	1.02	1.20	1.03

Nota: Elaboración propia.

4.3 Análisis de sensibilidad por Cut-Off.

Para evaluar la sensibilidad de los recursos reportados ante cambios en los criterios económicos, se realizó un análisis de sensibilidad, variando la ley de corte (cut-off) para zinc y cobre en el Tajo Abierto y en la Mina Subterránea.

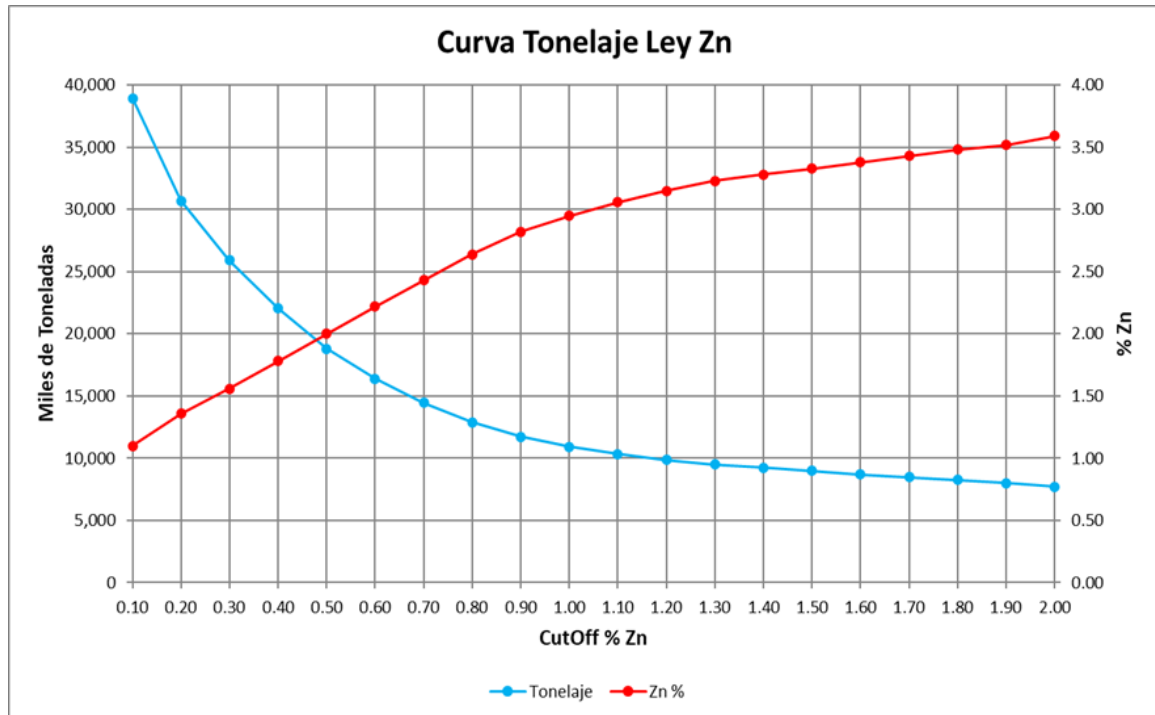
Para visualizar y cuantificar esta sensibilidad se elaboró la curva tonelaje-ley.

Por ejemplo, los resultados resumidos en la figura 95, muestran que un incremento del 20% en el cut-off (de 0.5% a 0.6% Zn), reduce los recursos en aproximadamente un 15%; mientras que una disminución del 20% (a 0.4% Zn) los incrementa en un 17%.

Este análisis demuestra la robustez del modelo de bloques y provee, además, información valiosa para la planificación minera bajo distintos escenarios de precio del metal.

Figura 95

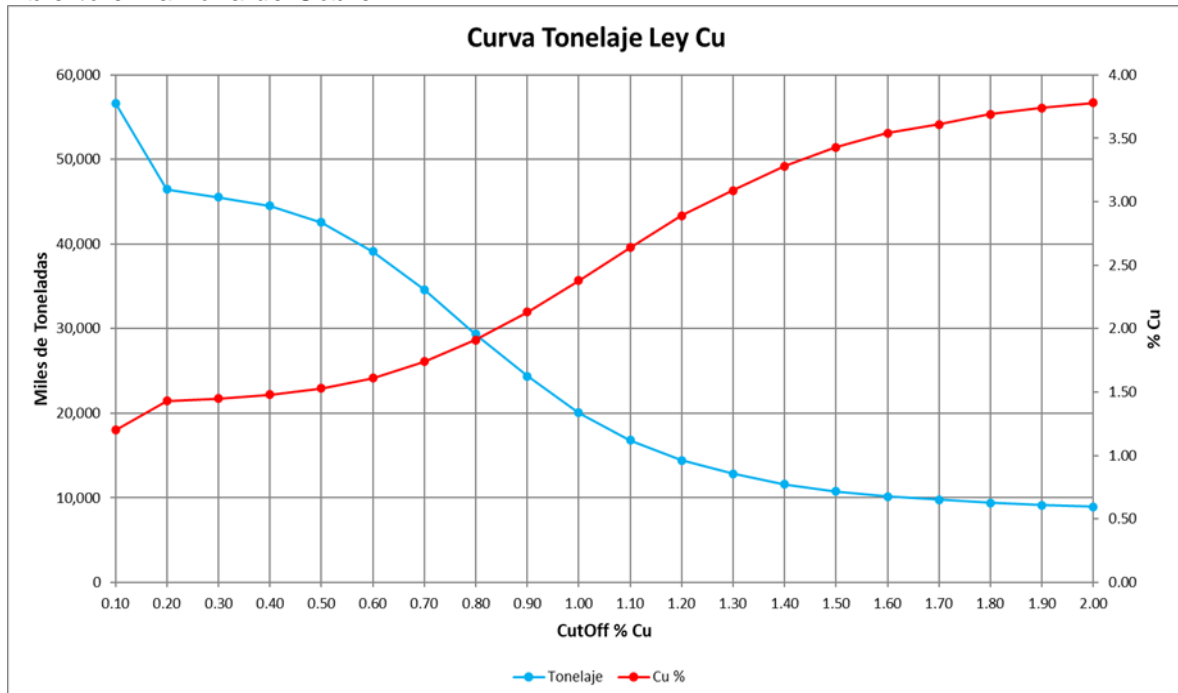
Muestra la Curva Tonelaje-Ley para los Recursos Medidos, Indicados e Inferidos del Tajo Abierto en la zona de Zinc



Nota: Elaboración propia.

Figura 96

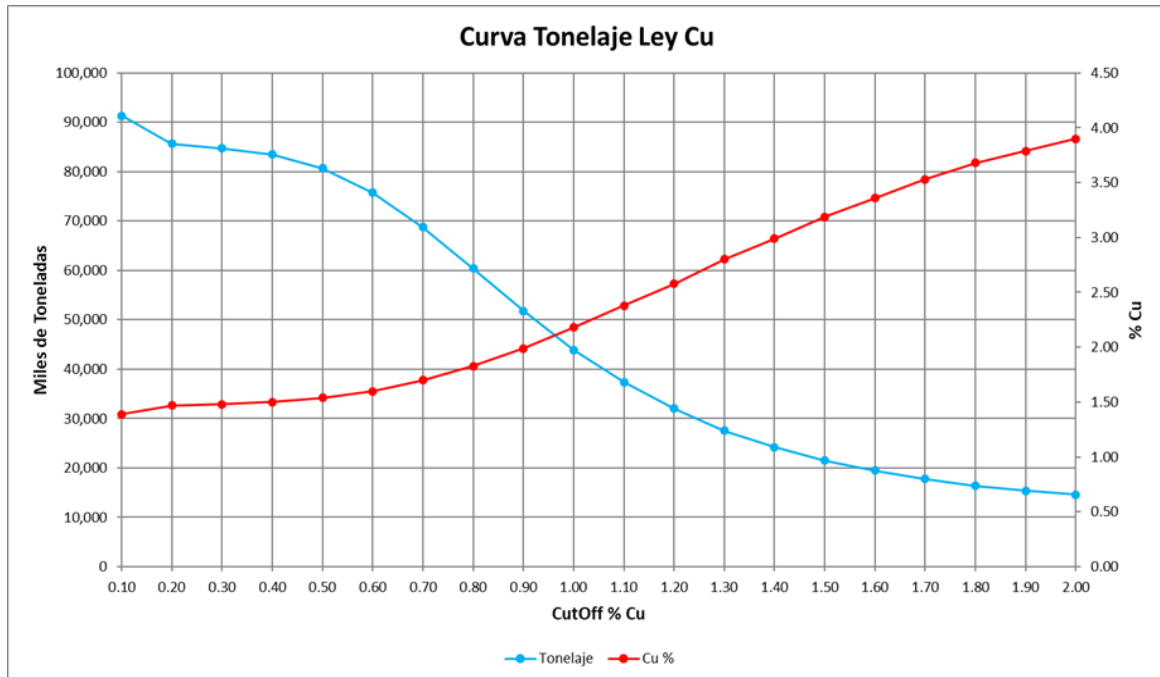
Muestra la Curva Tonelaje-Ley para los Recursos Medidos, Indicados e Inferidos del Tajo Abierto en la zona de Cobre



Nota: Elaboración propia.

Figura 97

Muestra la Curva Tonelaje-Ley para los Recursos Medidos, Indicados e Inferidos de Subterránea en la zona de Cobre



Nota: Elaboración propia.

Conclusiones

Se logró optimizar la estimación y categorización de recursos minerales mediante la implementación de anisotropía dinámica, la cual mejoró la precisión de la interpolación en los mantos plegados, reduciendo, además, los riesgos en los planes de minado.

Se elaboró un modelo geológico 3D confiable utilizando Leapfrog Geo, el cual fue validado cuantitativamente con una correspondencia superior al 95% entre la litología modelada y la logueada. Además, la validación visual del modelo demostró que los sólidos generados son consistentes con los datos de los taladros diamantinos y las interpretaciones 2D.

Se aplicaron técnicas geoestadísticas avanzadas, incluyendo variografía por dominio y kriging ordinario, con lo que se logró obtener una validación con sesgos globales menores al $\pm 10\%$ en la mayoría de los dominios.

La geoestadística ha jugado un papel crucial en la estimación de los recursos, especialmente en el uso de técnicas avanzadas como el Kriging para la interpolación de leyes.

La precisión del modelo geológico y la estimación de recursos minerales han mejorado significativamente la planificación minera a largo plazo. Se ha logrado optimizar la estrategia de minado al integrar mejor los datos geológicos y geoestadísticos, lo que permite identificar zonas de alta ley y definir claramente las áreas a explotar.

La geometría de los mantos mineralizados se interpreta mejor con el uso de tendencias controladas por la litología.

La clasificación de recursos bajo los estándares SK-1300, considerando espaciamientos de sondajes y criterios de QA/QC, asegura la confiabilidad del reporte final para la toma de decisiones estratégicas.

En el Tajo Abierto (Zn-Pb), los Recursos Medidos se estimaron en 6.0 Mt con leyes promedio de 3.05% de Zn, 1.33% de Pb, 2.07 oz/t de Ag y 0.24% de Cu. Los Recursos Indicados se estimaron en 4.3 Mt con leyes promedio de 2.55% de Zn, 0.74% de Pb, 1.88 oz/t de Ag y 0.12% de Cu. Los Recursos Inferidos se estimaron en 1.9 Mt con leyes promedio de 1.59% de Zn, 0.36% de Pb, 3.01 oz/t de Ag y 0.19% de Cu. El total de recursos se estimó en 12.2 Mt con leyes promedio de 2.65% de Zn, 0.97% de Pb, 2.15 oz/t de Ag y 0.17% de Cu.

En el Tajo Abierto (Cu), los Recursos Medidos se estimaron en 2.2 Mt con leyes promedio de 2.44% de Cu, 0.49% de Pb, 3.19 oz/t de Ag y 0.84% de Zn. Los Recursos Indicados se estimaron en 26.2 Mt con leyes promedio de 1.68% de Cu, 0.09% de Pb, 0.52 oz/t de Ag y 0.07% de Zn. Los Recursos Inferidos se estimaron en 13.4 Mt con leyes promedio de 1.56% de Cu, 0.08% de Pb, 0.50 oz/t de Ag y 0.07% de Zn. El total de recursos se estimó en 41.8 Mt con leyes promedio de 1.68% de Cu, 0.11% de Pb, 0.66 oz/t de Ag y 0.11% de Zn.

En la Mina Subterránea, los Recursos Medidos se estimaron en 1.0 Mt con leyes promedio de 2.49% de Cu, 1.29 oz/t de Ag y 1.02 g/t de Au. Los Recursos Indicados se estimaron en 50.6 Mt con leyes promedio de 1.56% de Cu, 0.83 oz/t de Ag y 0.93 g/t de Au. Los Recursos Inferidos se estimaron en 19.5 Mt con leyes promedio de 1.76% de Cu, 0.72 oz/t de Ag y 0.81 g/t de Au. El total de recursos se estimó en 71.1 Mt con leyes promedio de 1.63% de Cu, 0.81 oz/t de Ag y 0.90 g/t de Au.

Recomendaciones

Realizar más sondajes de confirmación para reducir posibles riesgos en el minado.

Usar la anisotropía dinámica como herramienta para interpolación de corto plazo.

Realizar sondajes gemelos en sectores donde se tenga sondajes antiguos que no tienen controles para evaluar el QAQC.

Se recomienda la actualización continua del modelo con nuevos datos de perforaciones, ya que el yacimiento sigue siendo dinámico y puede experimentar cambios con el tiempo.

Se recomienda considerar otros métodos geoestadísticos avanzados, como la simulación condicional gaussiana, para determinar la incertidumbre inherente a la estimación de recursos.

Según los resultados obtenidos de la reconciliación, se recomienda realizar un análisis de las muestras de sondajes diamantinos utilizando el método de digestión multiácida, ya que este procedimiento permite extraer de manera completa la plata, garantizando una medición más precisa de su concentración.

Referencias bibliográficas

- Alfaro, M. (2006). *Estimación de recursos mineros*. Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago.
- Alfaro, M. (2002). *Introducción al Muestreo Minero*. IIMCh, Santiago.
- Bendezú, R., & Fontboté, L. (2009). *Shallow polymetallic and precious metal mineralization associated with a Miocene diatreme-dome complex: the Colquijirca district in the Peruvian Andes*. [Tesis doctoral, Universidad de Ginebra].
- Bendezú, R. (1997). *Características geológicas, mineralógicas y geoquímicas de los yacimientos de Zn - Pb (\pm Ag) de San Gregorio y Colquijirca emplazadas en unidades sedimentarias en los bordes del sistema epitermal de alta sulfuración de Marcapunta*. [Tesis de Ingeniero, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Bendezú, R., & Fontboté, L. (2002). *Late timing for high sulfidation cordilleran base metal lode and replacement deposits in porphyry-related districts: The case of Colquijirca, Central Perú*. SGA News, 13.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Díaz-Martínez, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, T., Lu, S., & Cueva, E. (2009). *Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú*. INGEMMET. Boletín Sociedad Geológica del Perú, 103, 1-89.
- Carpio, M., Torre, J., & Fuentes, J. (2018). *Prospección de recursos de rocas y minerales industriales en la región Pasco*. Boletín Serie B: Geología Económica N° 52. Lima, Perú: INGEMMET.
- Cobbing, J., Quispesivana, L., & Paz, M. (1996). *Geología de los cuadrángulos de Ambo, Cerro de Pasco y Ondores* (Boletín No. 77, Serie A: Carta Geológica Nacional). Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima, Perú.
- CRIRSCO. (2019). *International Reporting Template for the Public Reporting of Exploration Targets, Mineral Resources and Mineral Reserves*. International Council on Mining & Metals (ICMM).

- Díaz, A. (2002). *Geoestadística aplicada*. Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA, Cuba.
- Guillermo, P. (2008). Ponencia: *Curso Introducción a la Geoestadística para la Estimación de Recursos Minerales*. Antamina y la empresa AMEC. Doctor Senior Geostatistician Mining & Metals.
- Marín, A. (2004). *Estimación de recursos de cobre, plomo, zinc y plata del Proyecto Toromocho*. Biblioteca de Dataroom de Centromin Perú.
- Naranjo, Ó. (2017). *Modelamiento geológico y estimación de recursos, Yacimiento La Niña, Tongoy, Cementos Melón S.A.* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio de la Universidad de Chile:
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148670>
- Rodríguez, R., & Cueva, E. (2011). *Geología del Cuadrángulo de Cerro de Pasco – hoja 22k - 1:100 000 INGEMMET*.
- Rosas, S., Fontboté, L., & Tankard, A. (2007). *Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Perú*. *Journal of South American Earth Sciences*, 24.
- Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2017). *Mineral resource estimation*. Springer
- Tumialan, P. (2003). *Compendio de Yacimientos de Minerales del Perú*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET.