



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**MODELAMIENTO GEOTECNICO DE IS50 (PLT), MEDIANTE ESTUDIO  
GEOESTADISTICO – NIVEL 1 DE PRODUCCIÓN, COTA 1823, CHUQUICAMATA  
SUBTERRÁNEA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE.**

**Yuadamir Ignacio Bordones Vega**

Copiapó, Chile 2024



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**MODELAMIENTO GEOTECNICO DE IS50 (PLT), MEDIANTE ESTUDIO  
GEOESTADISTICO – NIVEL 1 DE PRODUCCIÓN, COTA 1823, CHUQUICAMATA  
SUBTERRÁNEA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE.**

“Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título  
de GEÓLOGO”

Profesor Guía: Francisco Tapia Guerra

Tutor: Giuseppe Barindelli Pizarro

**Yuadamir Ignacio Bordones Vega**

Copiapó, Chile 2024

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mi profunda gratitud a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de titulación. Sus apoyos y ánimos han sido fundamentales en cada etapa de este proceso.

Primero y, ante todo, quiero agradecer a mis padres, Yuadamir Bordonos Carvajal y Veronica Vega Bordonez, por su constante apoyo, comprensión y sacrificio. Su amor incondicional y sus palabras de aliento han sido mi mayor motivación durante este trayecto. Gracias por creer en mí y por ser mi fuente inagotable de inspiración.

Agradezco profundamente a mi familia, y en especial a mi abuela Yolanda Hidalgo, por su apoyo incondicional y por transmitirme mis valores, que me han formado y guiado en mi vida. Su aliento y buenos deseos han sido un motor invaluable en mi camino.

Mi más sincero agradecimiento a mi tutor, Giuseppe Barindelli Pizarro, por su orientación experta, su paciencia y su dedicación incansable. Sus consejos y guía han sido fundamentales para dar forma a este trabajo y alcanzar el culmen de este proyecto de titulación.

Asimismo, deseo expresar mi profunda gratitud al equipo de la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo de Chuquicamata por su invaluable ayuda y apoyo brindado durante el transcurso del programa de memorista. Su colaboración ha sido fundamental para el desarrollo y éxito de este proyecto.

Agradezco profundamente a mis amigos, Camilo, Osiel y Fabián, por su apoyo incondicional y por estar a mi lado en los momentos difíciles. También quiero expresar mi gratitud a los amigos que conocí en la universidad, Valentina, Luis, Luis H., Melanie Mariela, e Ignacio. Su amistad ha sido un regalo preciado que valoro profundamente.

Para aquellos familiares que ya no están entre nosotros y no pudieron presenciar la culminación de este proyecto, quiero rendir un homenaje especial. Aunque físicamente no estén presentes, sé que su espíritu y su amor siguen acompañándome. Este logro también es en honor a su memoria y al impacto que tuvieron en mi vida. Un beso al cielo para Tío Luis Eduardo Carvajal, Benjamín Freddy Barrera, Tía Margarita Carvajal y Abuela Olga Campillay.

## **INDICE**

<b>RESUMEN.....</b>	<b>12</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>13</b>
<b>I CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
1.1. Problema de investigación.....	14
1.2. Hipótesis.....	15
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1. Objetivo general.....	15
1.3.2. Objetivos específicos .....	15
1.4. Ubicación y accesos.....	15
<b>II CAPITULO 2: MARCO GEOLÓGICO .....</b>	<b>17</b>
2.1. Geología del distrital Chuquicamata .....	17
2.1.1. Unidades estratificadas.....	20
2.1.2. Unidades intrusivas .....	22
2.2. Geología local de Chuquicamata.....	25
2.2.1. Complejo Porfídico Chuquicamata.....	25
2.2.2. Roca de caja del Pórfido Chuquicamata .....	26
2.2.3. Estructuras principales .....	27
2.3. Unidades Geotécnicas Básicas (U.G.T.B.).....	32
2.3.1. Unidad geotécnica Granodiorita Fortuna (GDF) .....	33
2.3.2. Unidad geotécnica Zona de Cizalle Moderado (ZCM).....	33
2.3.3. Unidad geotécnica Zona de Cizalle Intenso (ZCI).....	33
2.3.4. Unidad geotécnica Brecha de Falla (BEF).....	34
2.3.5. Unidad geotécnica Roca Cuarzo – Sericita (RQS).....	35
2.3.6. Unidad geotécnica Pórfido Este Sericitico (PES) .....	36

2.3.7.	Unidad geotécnica Pórfido Este Potásico (PEK) .....	37
2.3.8.	Unidad geotécnica Pórfido Este Clorítico (PEC).....	37
2.3.9.	Unidad geotécnica Metasedimentos (MET).....	38
2.3.10.	Unidad geotécnica Granodiorita Elena Sur (GES) .....	38
2.3.11.	Unidad geotécnica Lixiviados (LIX).....	39
<b>III</b>	<b>CAPITULO 3: MARCO TEORICO .....</b>	<b>40</b>
3.1.	Ensayo de carga puntual – Point Load Test (PLT) .....	40
3.2.	Análisis geoestadísticos.....	41
3.2.1.	Variograma experimental .....	42
3.2.2.	Variograma teórico o modelo.....	43
3.2.3.	Kriging .....	47
3.2.4.	Kriging ordinario.....	47
3.2.5.	Anamorfosis gaussiana.....	48
3.2.6.	Simulación secuencial gaussiana .....	49
<b>IV</b>	<b>CAPITULO 4: METODOLOGIA.....</b>	<b>51</b>
<b>V</b>	<b>CAPITULO 5: RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
4.1.	Análisis exploratorio de datos (E.D.A.) .....	60
4.1.1.	Comportamiento de los datos.....	60
4.1.2.	Estadística descriptiva.....	61
4.1.3.	Datos utilizados para el modelo de bloques .....	65
4.1.4.	Cambio de soporte: composición.....	67
4.2.	Análisis variográfico.....	69
4.2.1.	Mapa variografico .....	69
4.2.2.	Variograma experimental .....	70
4.2.3.	Modelado del variograma .....	71

4.3.	Estimación de kriging.....	73
4.4.	Simulación secuencial gaussiana.....	74
4.4.1.	Anamorfosis gaussiana.....	74
4.4.2.	Variograma de la variable normalizada.....	76
4.4.3.	Simulación.....	78
4.5.	Modelo de bloques.....	80
4.5.1.	Definición de límites del Pórfido Chuquicamata.....	82
4.5.2.	Validación de modelo.....	83
<b>VI</b>	<b>CAPITULO 6: DISCUSIÓN.....</b>	<b>86</b>
<b>VII</b>	<b>CAPITULO 7: CONCLUSIONES .....</b>	<b>91</b>
<b>VIII</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>93</b>

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Mapa de ubicación del distrito de Chuquicamata. Escala 1:100.000. ....	16
Figura 2: Ubicación de Chuquicamata en el cinturón metalogénico del Eoceno superior - Oligoceno inferior (~40–30 Ma). Además de presentar los cinturones del Mioceno, Paleoceno-Eoceno inferior y Cretácico inferior (Skarmeta, 2021). ....	18
Figura 3: Unidades principales presente en el distrito Chuquicamata (Skarmeta, 2021). ....	19
Figura 4: Estructuras principales en la mina Chuquicamata (Collado et al., 2005). ....	28
Figura 5: Consolidado modelo UGTB macrobloque N7 a S6, nivel de producción - Cota 1823 (Superintendencia de Estudios Geomecánicos, CODELCO, 2023). ....	32
Figura 6: Equipo utilizado para ensayo PLT. a) Prensa Hidráulica, b) Punzón cónico estandarizado por ASTM D 5731. ....	40
Figura 7: Región de tolerancia T(h) alrededor del vector h, caso bidimensional (Emery, 2013). ....	43
Figura 8: Características de un Variograma. ....	43
Figura 9: Variograma pepitico, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013). ....	44
Figura 10: Variograma esférico, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013). ....	44
Figura 11: Variograma exponencial, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013). ....	45
Figura 12: Variograma gaussiana, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013). ....	45
Figura 13: Variograma seno cardinal, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013). ....	46
Figura 14: Variograma potencial, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013). ....	46
Figura 15: Variograma anidados, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013). ....	47
Figura 16: Construcción gráfica de la anamorfosis Gaussiana (Emery, 2013). ....	49

Figura 17: Construcción de la anamorfosis con ayuda de las funciones de distribución F (variable original) y G (variable Gaussiana) (Emery,2013).....	49
Figura 18: Realizaciones de campos aleatorios continuos.....	50
Figura 19: Comparación entre realidad (a), kriging (b) y simulación condicional (c) donde los datos condicionantes están indicados por círculos (Emery, 2012). .....	50
Figura 20: Diagrama de flujo de la metodología a utilizar para la obtención de un modelo de bloques geotécnico mediante análisis geoestadístico para Chuquicamata subterránea. ....	52
Figura 21: Box-plot de datos atípicos clasificado por U.G.T.B. ....	53
Figura 22: Distribución espacial de la base de datos, vista de planta, clasificados por U.G.T.B. ....	55
Figura 23: Distribución espacial de la base de datos, vista Cota v/s Este, clasificados por U.G.T.B. ....	55
Figura 24: Distribución espacial de la base de datos, vista Cota v/s Norte, clasificados por U.G.T.B. ....	56
Figura 25: Análisis de deriva, Promedio Is50 v/s Este, Norte y Cota.....	60
Figura 26: Histograma de los datos general.....	62
Figura 27: Prueba de ajuste de distribución para el total de la base de datos: distribución normal, log-normal, exponencial y weibull. ....	62
Figura 28: Box-plot por campañas realizadas.....	63
Figura 29: Box-plot por U.G.T.B. ....	64
Figura 30: Histograma - Ruptura por Matriz.....	66
Figura 31: Prueba de ajuste de distribución para datos con Ruptura por Matriz: distribución normal, log-normal, exponencial y weibull. ....	67
Figura 32: Histograma - Compósito de 10 metros. Junto a sus medidas de posición: Media (Rojo), Mediana (Celeste) y Moda (Amarillo).....	68
Figura 33: Prueba de ajuste de distribución para datos Compositados: distribución normal, log-normal, exponencial y weibull.....	69
Figura 34: Mapa variografico de la variable regionalizada Is50.....	70
Figura 35: Variogramas direccional y omnidireccional. ....	71
Figura 36: Variograma direccional y modelo matemático. ....	72

Figura 37: Variograma omnidireccional y modelo matemático.....	73
Figura 38: Estimación resultante de la interpolación por kriging ordinario acotado a nivel 1 de producción (Cota 1823).....	73
Figura 39: Estimación resultante de la interpolación por kriging ordinario: a) Sección Cota v/s Este (Y4000) y b) Cota v/s Norte (X2800). Presentando cambios significativos de resistencia (Línea roja). ....	74
Figura 40: Histogramas de datos compositados (Distribución no definida) y datos normalizados (Distribución normal). ....	75
Figura 41: Prueba de normalidad de Anderson-Darling para datos transformados. ....	75
Figura 42: Variogramas direccional y omnidireccional - Variable normalizada.....	76
Figura 43: Variograma direccional y modelo matemático - Variable normalizada.....	77
Figura 44: Variograma omnidireccional y modelo matemático - Variable normalizada.	78
Figura 45: Tres de las doscientas simulaciones realizadas.....	79
Figura 46: Premediación de las doscientas simulaciones realizadas, obteniendo una simulación final promediada. ....	79
Figura 47: Simulación final promediada sometida a una anamorfosis inversa, para volver a la variable original.....	80
Figura 48: Modelo de bloque 3D, de las variables a) Is50, b) Varianza y c) Desviación estándar.....	81
Figura 49: Modelo de bloque de la varianza asociada: cota a) 1540, b) 1780, y c) 1920. ....	82
Figura 50: Proceso para acotar modelo solamente al Pórfido Este. a) Modelo de bloque junto la Falla Oeste y triangulación de Metasedimentos-Granodiorita Elena Sur, y b) modelo final. ....	82
Figura 51: Planos XY con sondajes compositados. Plano cota: a) 1620Z; b) 1760Z; y c) 1960Z. ....	83
Figura 52: Secciones del modelo de bloque a cota 1823, a) junto a la Falla Oeste, Falla Americana, y b) Trazas de la Falla Arsenico.....	84
Figura 53: Planos XZ del modelo de bloques, junto la Falla Americana. a)3000N; b) 3260N; y c) 3860N.....	84
Figura 54: Modelo de bloque de la a) varianza y b) desviación estándar. ....	85

Figura 55: Modelo de bloque acotado a la cota 1823. a) resistencia a la carga puntual corregida (Is50), b) Varianza y c) Desviación estándar.....	87
Figura 56: Modelo de bloque, Cota 1823 – Acotado a las coordenadas 3390N-4320N. a) Macrobloques del S2/S3 al N2/N3, b) Modelo estructural donde las estructuras rocas corresponden a VIF (Very Important Fault), las azules FT (Fault Trace), purpura las trazas corres.....	88
Figura 57: Sección transversal Elevación-Este del modelo de bloque.....	88
Figura 58: Zona de contraste de resistencia entre Falla Oeste y Americana. Expresada por las fallas WNW-ESE y Falla Arsénico (Azul). .....	89
Figura 59: Zona de contraste de resistencia al Este de la Falla Americana. Generada por la Falla Arsénico (Purpura) y Falla NNW-SSE (Azul). .....	89

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Catastro de sondajes.....	53
Tabla 2: Parámetros utilizados para el interpolador por kriging ordinario. ....	57
Tabla 3: Parámetros utilizados para la simulación secuencial gaussiana.....	58
Tabla 4: Estadística descriptiva general. ....	61
Tabla 5: Estadística descriptiva y por campañas.....	63
Tabla 6: Estadística descriptiva y por U.G.T.B. ....	64
Tabla 7: Estadística descriptiva por tipo de ruptura. ....	65
Tabla 8: Estadística descriptiva - Ruptura por Matriz.....	66
Tabla 9: Estadística descriptiva - Datos compositados .....	68
Tabla 10: Parámetros utilizados en el ajuste de los variogramas direccional y omnidireccional.....	70
Tabla 11: Parámetros utilizados para el variograma modelo direccional.....	71
Tabla 12: Parámetros utilizados para el variograma modelo omnidireccional. ....	72
Tabla 13: Parámetros utilizados en el ajuste de los variogramas direccional y omnidireccional - Variable normalizada. ....	76
Tabla 14: Parámetros utilizados para el variograma modelo direccional - Variable normalizada.....	77
Tabla 15: Parámetros utilizados para el variograma modelo omnidireccional - Variable normalizada.....	78
Tabla 16: Dimensiones del modelo de bloque. ....	80

## RESUMEN

El yacimiento Chuquicamata, ubicado en la región de Antofagasta a 15 km al norte de la ciudad de Calama, es reconocido como uno de los depósitos tipo pórfido cuprífero (Cu-Au-Mo) más importantes a nivel mundial y como la mina a cielo abierto más grande de su tipo. Este yacimiento se encuentra en la franja metalogénica del Eoceno-Oligoceno, conocida por albergar importantes depósitos de pórfidos cupríferos. La mina a cielo abierto Chuquicamata en el año 2019, inició un proceso de transición hacia la minería subterránea con el proyecto “Mina subterránea Chuquicamata”.

El objetivo del presente trabajo es generar un modelo de bloque geotécnico de la variable resistencia a la carga puntual corregida ( $Is_{50}$ ), obtenida mediante ensayo de carga puntual (PLT: *Point Load Test*), utilizando métodos de estadística avanzada como el análisis variográfico, interpolador de *kriging* y simulación condicional. Para el modelo de bloque se implementaron celdas con dimensiones de 20x20x20 metros con el objetivo de identificar la variabilidad y heterogeneidad presentes en las unidades geotécnicas básicas (U.G.T.B.) con respecto a la resistencia del macizo rocoso en la mina subterránea Chuquicamata, específicamente en el nivel 1 de producción. Además, se buscó identificar tendencias en la resistencia en las direcciones norte-sur, este-oeste y elevación, con el fin de comprender su variación espacial a lo largo de los tres ejes principales. Como resultado, se concluyó que, en general, la resistencia tiende a aumentar conforme se avanza de sur a norte, oeste a este y hacia la superficie. Además, se observó que, al avanzar entre las U.G.T.B. desde la Falla Oeste hacia el este, las unidades presentan en general resistencias más altas, destacando la Unidad Roca Cuarzo-Sericita (RQS) con las resistencias más bajas y el Pórfido Este Clorítico (PEC) con resistencias más altas con respecto a este estudio.

Los resultados obtenidos demuestran la capacidad del modelo de bloque para representar adecuadamente la distribución espacial de la resistencia en el nivel 1 de producción de la mina subterránea Chuquicamata a una escala más detallada.

Palabras clave: MODELO GEOTECNICO – GEOESTADISTICA – ENSAYO DE CARGA PUNTUAL – CHUQUICMATA

## **ABSTRACT**

The Chuquicamata deposit, located in the Antofagasta region, 15 km north of Calama city, is recognized as one of the most important porphyry copper (Cu-Au-Mo) deposits worldwide, and as the largest open-pit mine of its kind. This deposit is located in the Eocene-Oligocene metallogenic belt, known for hosting significant porphyry copper deposits. The Chuquicamata open-pit mine in 2019 began a transition process to underground mining with the "Mina subterranea Chuquicamata" project.

The objective of this work is to generate a geotechnical block model of the variable point load corrected ( $I_{s50}$ ) obtained through the Point Load Test (PLT) using advanced statistical methods such as variographic analysis, kriging interpolator, and conditional simulation. For the block model, cells with dimensions of 20x20x20 meters were implemented with the aim of identifying the variability and heterogeneity present in the Basic Geotechnical Units (U.G.T.B.) with respect to the strength of the rock mass in the Chuquicamata subterranean mine, specifically at level 1 of production. In addition, trends in resistance were identified in the north-south, east-west, and elevation directions in order to understand its spatial variation along the three main axes. As a result, it was concluded that, in general, the resistance tends to increase as one moves from south to north, west to east, and towards the surface. Furthermore, it was observed that, as one advances between the U.G.T.B. from the Western Fault towards the east, the units generally present higher resistances, highlighting the Quartz-Sericite Rock Unit (RQS) with the lowest resistances and the Chloritic East Porphyry (PEC) with higher resistances with respect to this study.

The results obtained demonstrate the capacity of the block model to adequately represent the spatial distribution of resistance at level 1 of production of the Chuquicamata underground mine on a more detailed scale.

**Keywords: GEOTECHNICAL MODEL – GEOSTATISTICS – POINT LOAD TEST – CHUQUICMATA**

## **I CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN**

El yacimiento de Chuquicamata, situado en el árido desierto de Atacama en Chile, es uno de los depósitos de cobre y molibdeno más significativos operados por Codelco. Explotado desde tiempos prehispánicos, la explotación a gran escala comenzó a fines del siglo XIX con métodos rudimentarios de rajo abierto. A partir de 1915, la operación industrializada marcó el inicio de una producción masiva de óxidos de cobre, seguida por una planta de flotación en 1952 para procesar minerales mixtos. A pesar de la disminución en las leyes de cobre y la expectativa inicial de cierre en 2020, la operación se extendió hasta 2028 debido al descubrimiento de sulfuros primarios bajo el pit final, impulsando el desarrollo del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMChS) iniciado en 2019 para operar hasta aproximadamente 2060.

### **1.1. Problema de investigación**

La mina subterránea de Chuquicamata enfrenta desafíos geotécnicos significativos debido a la alta fracturación de las rocas en el yacimiento, resultado de las alteraciones geológicas y de más de 100 años de extracción en la mina a rajo abierto que se encuentra en la superficie. Esta complejidad geotécnica hace que la caracterización precisa de las propiedades de las rocas sea fundamental para garantizar la seguridad y la eficiencia operativa. Sin embargo, la definición actual de las unidades geotécnicas básicas (U.G.T.B.) se ha realizado a una escala demasiado amplia, dificultando la evaluación de la variabilidad y heterogeneidad de la resistencia en cada unidad. Esta limitación impide identificar sectores donde las variaciones geotécnicas podrían afectar significativamente la predicción de zonas de inestabilidad.

La falta de modelos geotécnicos detallados conduce a una subestimación de los riesgos operativos. Investigar metodologías que aborden esta variabilidad a una escala más local, como un modelo geotécnico generado mediante geoestadística y simulaciones, es fundamental para mejorar la seguridad en las operaciones mineras. La relevancia de esta investigación radica en su potencial como herramienta para optimizar estrategias de extracción y mitigar los riesgos asociados en la mina subterránea.

## **1.2. Hipótesis**

Por medio de la utilización de técnicas geoestadísticas como el análisis variográfico, interpolador por *kriging* y simulación condicional, se desarrolló un modelo de bloques geotécnicos de la resistencia a la carga puntual corregida (Is50). El modelo se generó mediante celdas con dimensiones de 20 x 20 x 20 metros, con el fin de predecir con mayor exactitud la variabilidad y heterogeneidad que podría manifestarse dentro de cada U.G.T.B. Con ello, se podrán identificar zonas con cambios significativos de resistencia y, por ende, escoger el método de fortificación más adecuado para las características de la roca encajante.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Desarrollar un modelo de bloque de la variable Is50 del yacimiento Chuquicamata, enfocado en el nivel 1 de producción de la mina subterránea Chuquicamata.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

Definir un soporte adecuado para la variable geotécnica, con el fin de producir datos más homogéneos y con ello reducir la variación errática que podrían presentar los datos.

Determinar la estructura de correlación espacial de la variable regionalizada del Is50.

Evaluar la variabilidad espacial y la incertidumbre del modelo de bloque.

## **1.4. Ubicación y accesos**

El yacimiento de Chuquicamata está ubicado en el desierto de Atacama, en la segunda región de Antofagasta, al oeste de la cordillera de Los Andes. Se sitúa a una altitud de aproximadamente 2,870 metros sobre el nivel del mar, a unos 212 kilómetros al noreste de Antofagasta, la capital regional, y a aproximadamente 15 kilómetros al norte de Calama, que es la capital de la provincia de El Loa.

Para acceder al distrito de Chuquicamata desde la ciudad de Antofagasta, se debe tomar la Ruta 26 durante aproximadamente 13 km, hasta conectar con la Ruta 5 norte,

recorriendo luego unos 83 km con dirección noreste. Después, se continúa por la Ruta 25-CH por otros 112 km, ingresando por la zona sur de Calama. Una vez en Calama, se sale por la zona norte tomando la Ruta 24 por unos 13 km hasta llegar a la “Puerta 2”, que da acceso al distrito.

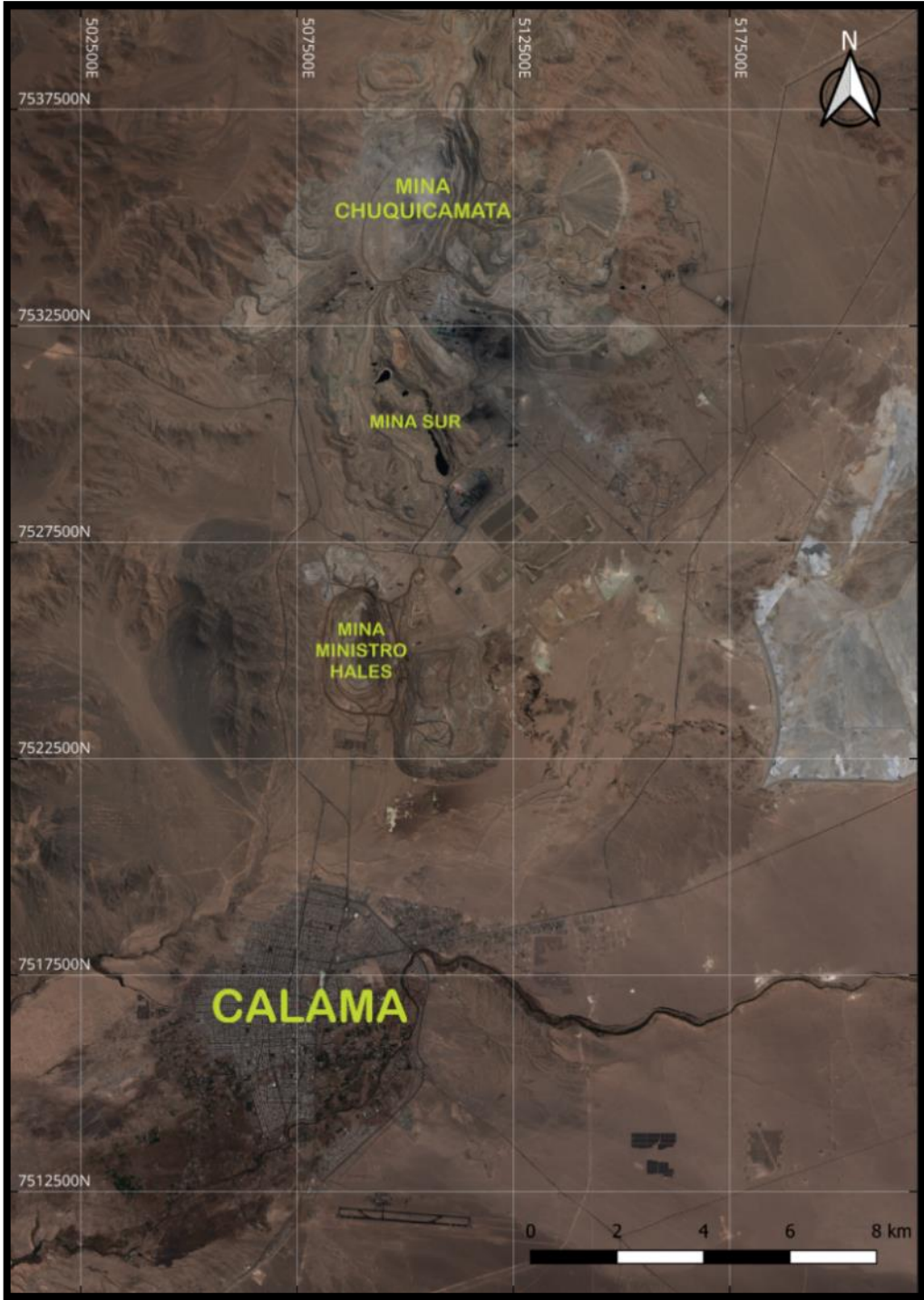


Figura 1: Mapa de ubicación del distrito de Chuquicamata. Escala 1:100.000.

## **II CAPITULO 2: MARCO GEOLÓGICO**

El distrito de Chuquicamata se enmarca dentro de una formación geológica compleja dominada por rocas volcánicas y sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico (Aguilar, 2008). Estas rocas han sido afectadas por intensos procesos tectónicos que han generado estructuras cruciales como la Falla Oeste y la Falla Mesabi (Ballard et al., 2001). Dichas estructuras desempeñan un papel fundamental en la distribución y mineralización del cobre en la región, controlando la ubicación de los grandes sistemas de pórfidos de cobre observados en el norte de Chile.

El desarrollo geológico del distrito ha sido influenciado por su ubicación en el extremo oriental del cinturón magmático andino, donde la actividad volcánica y las intrusiones ígneas han formado cuerpos geológicos significativos como el Complejo Porfídico Chuquicamata y el Complejo Granodiorítico Fortuna (Maksaev, 2001). Estos cuerpos han experimentado múltiples eventos tectónicos y metamórficos a lo largo de su historia (Faunes, 2000), culminando en la formación de depósitos de cobre de tipo pórfido y enriquecimientos supérgenos e hipogénicos.

### **2.1. Geología del distrital Chuquicamata**

Este mega-depósito se caracteriza por ser del tipo pórfido cuprífero de Cu-Mo, y ubicarse en la franja metalogénica del Eoceno superior – Oligoceno a lo largo de la cordillera de Domeyko (Boric et al., 1990; Maksaev, 1990), cuyo emplazamiento mineral es controlado por la Falla Oeste, siendo una ramificación del Sistema de Falla Domeyko, la cual presenta una orientación prácticamente N-S (Lindsay et al., 1995). La Falla Oeste actúa como el límite occidental de la mineralización en el yacimiento de Chuquicamata, estableciendo contacto con el complejo granodiorítico Fortuna, el cual no presenta una mineralización económica (Ballard et al., 2001). La ubicación de Chuquicamata en el cinturón metalogénico del Eoceno superior - Oligoceno inferior se presenta en la figura 2. Por otro lado, la figura 3 muestra las unidades principales del distrito de Chuquicamata, ubicando claramente a la mina dentro de este contexto (Skarmeta, 2021).

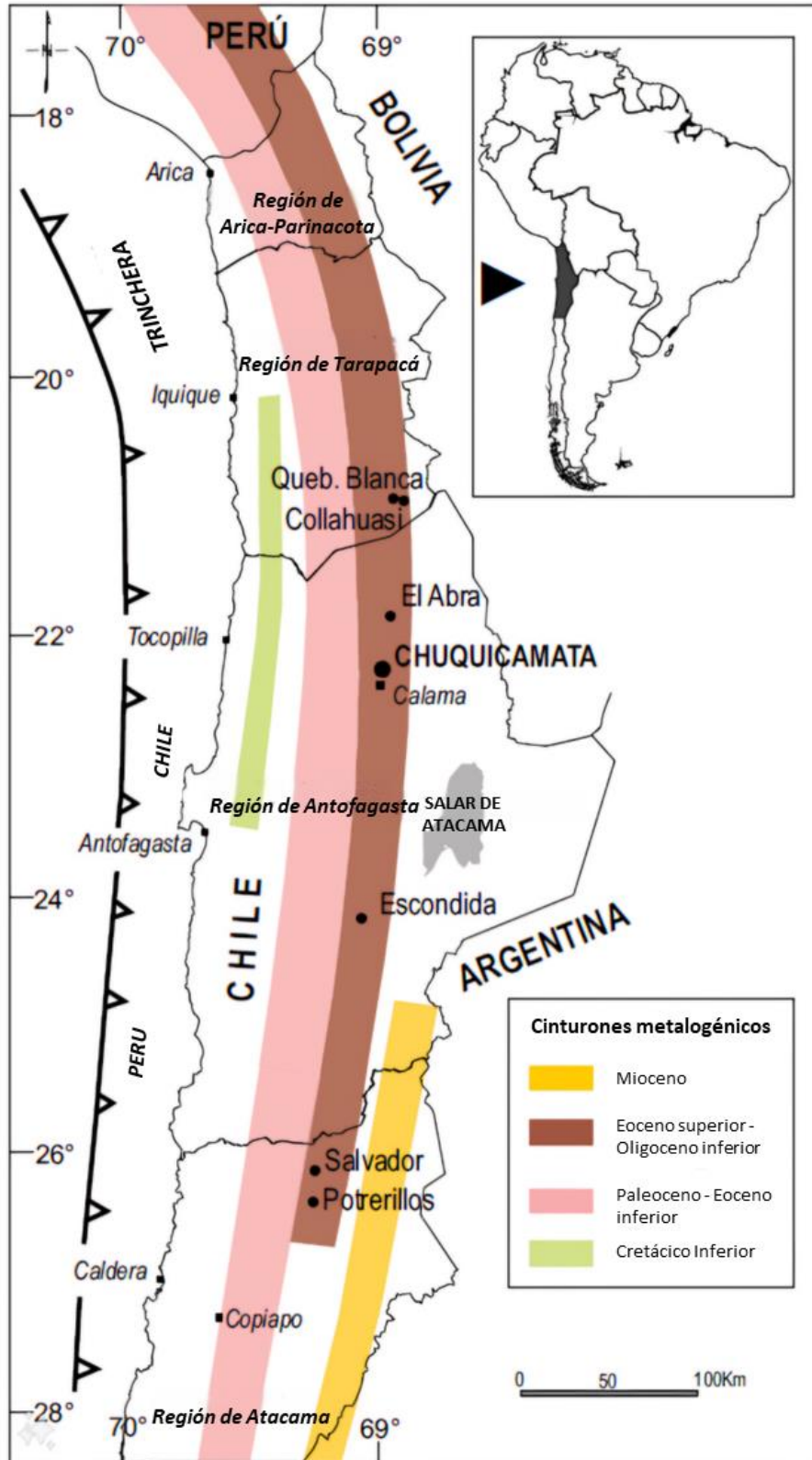


Figura 2: Ubicación de Chuquicamata en el cinturón metalogénico del Eoceno superior - Oligoceno inferior (~40–30 Ma). Además de presentar los cinturones del Mioceno, Paleoceno-Eoceno inferior y Cretácico inferior (Skarmeta, 2021).

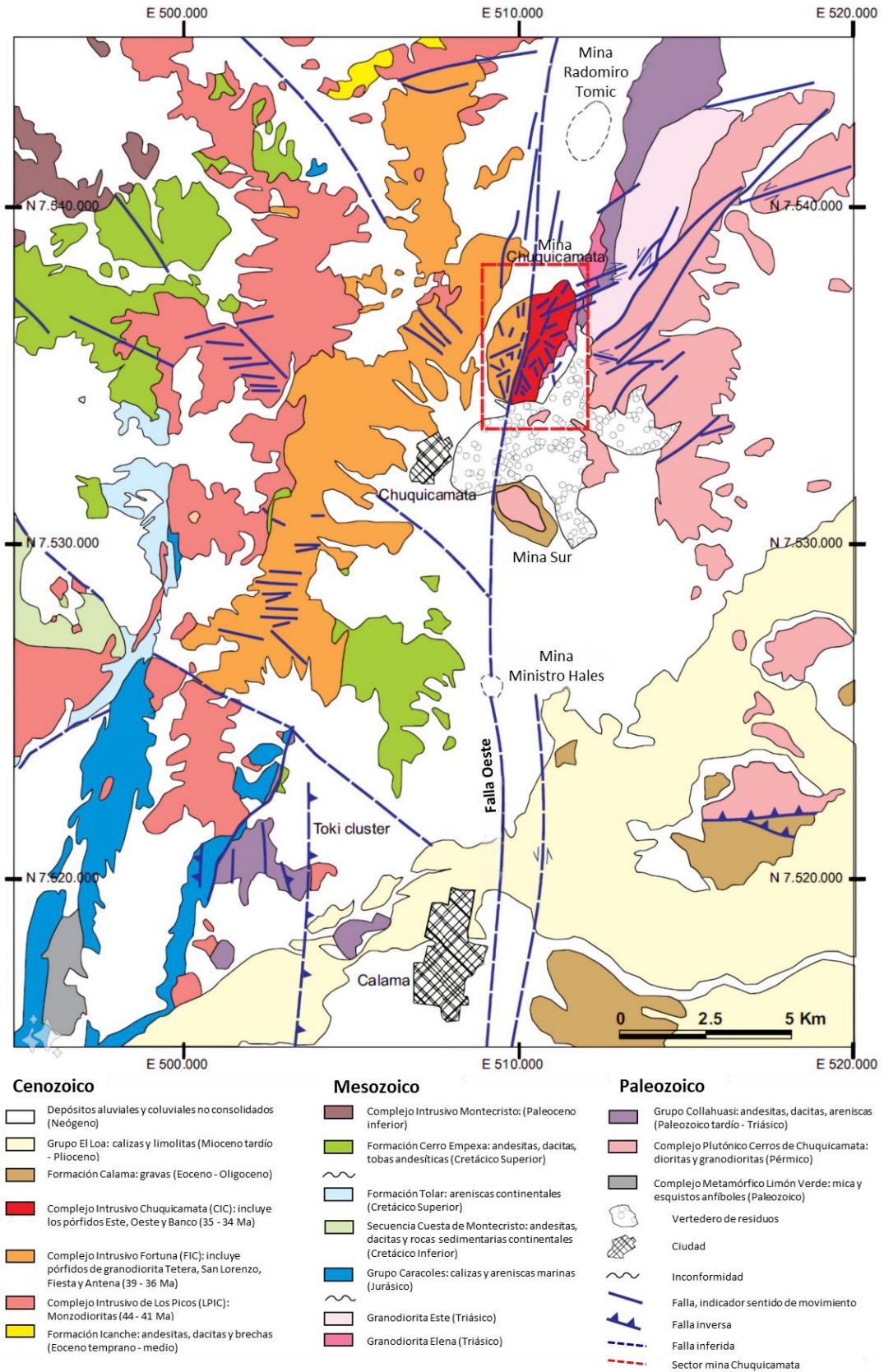


Figura 3: Unidades principales presente en el distrito Chuquicamata (Skarmeta, 2021).

## **2.1.1. Unidades estratificadas**

### **2.1.1.1. Formación Collahuasi (Carbonífero – Pérmico)**

Esta unidad se compone principalmente por rocas volcánicas. Estas incluyen flujos andesíticos y rocas piroclásticas de composición dacítica a riolítica, intercaladas con brechas sedimentarias y areniscas. Hacia el techo de la formación, se encuentran lutitas. Las rocas hacia la base muestran un mayor grado de metamorfismo, con un desarrollo significativo de la foliación (Rivera et al., 2012).

### **2.1.1.2. Formación Quetena (Pérmico – Triásico)**

Se ubicada en la Sierra Quetena al sureste de Chuquicamata, constituida por conglomerados polimícticos de 2 a 20 metros de espesor. Estos conglomerados contienen clastos de esquistos con moscovita paleozoica y vetas de cuarzo. Se considera un conglomerado basal que marca la transición entre brechas volcánicas triásicas y rocas sedimentarias marinas de la Formación Quehuita. Los estratos que sobreyacen a los conglomerados y brechas volcánicas se conocen como Estratos de Quetena (Tomlinson & Blanco, 2008). La formación se asigna a las edades del Pérmico–Triásico debido a la estratificación de los conglomerados, que refleja el alzamiento y erosión del basamento paleozoico antes del Triásico Medio (Alcota et al., 2009; Rivera et al., 2012).

### **2.1.1.3. Formación Cerros de Chuquicamata (Triásico superior)**

La formación se compone por una variedad de rocas volcánicas y sedimentarias que se extienden desde el Triásico Medio hasta el Superior, anteriormente parte de la Formación Agua Dulce. Predominan los flujos andesíticos y las brechas, acompañados de intercalaciones de conglomerados y areniscas. Se observan ocasionalmente piroclastos dacíticos. Hacia el este desde los yacimientos de Chuquicamata y Radomiro Tomic, la formación incluye estratos de composición calcárea y pizarras, con intercalaciones de rocas volcánicas triásicas (Tomlinson & Blanco, 2008).

### **2.1.1.4. Formación Quehuita (Jurásico)**

La unidad se emplaza en la Sierra Quetena, alrededor del Clúster Toki, afloran rocas sedimentarias de origen marino con edades del Jurásico, pertenecientes al miembro

inferior de la Formación Quehuita (Tomlinson & Blanco, 2008), la cual está conformada por calizas, limonitas y pizarras levemente metamorfizadas. Por otra parte, el miembro superior de la formación está conformado por areniscas y limonitas, las cuales afloran al norte del distrito, presentando un contacto erosivo con la Formación Tolar.

#### **2.1.1.5. Formación Tolar (Cretácico superior)**

Esta formación se constituye de estratos de color pardo rojizo, conglomerados con clastos paleozoicos y tobas dacíticas. Esta formación sobreyace al miembro superior de la Formación Quehuita y a las rocas volcánicas de la Formación Collahuasi. La formación se puede apreciar de mejor manera en el anticlinal de San Lorenzo (Tomlinson & Blanco, 2008).

#### **2.1.1.6. Formación Quebrada Mala (Cretácico superior – Paleoceno inferior)**

La formación se encuentra emplazada al oeste desde la mina Ministro Hales, específicamente en el sector del Cerro Negro, se presenta una composición de brechas sedimentarias, tobas, conglomerados y areniscas en el miembro inferior de la unidad, la cual sobreyace en inconformidad con la Formación Collahuasi. Por otra parte, el miembro superior está conformado por lavas andesíticas y tobas con intercalaciones piroclásticas dacíticas, donde se presenta un metamorfismo de contacto producto de un plutón del Eoceno, el cual se encuentra adyacente a la formación (Alcota et al., 2009; Rivera et al., 2012).

#### **2.1.1.7. Formación Icanche (Eoceno inferior – Eoceno Medio)**

Esta formación presenta un espesor superior a 500 metros, constituida principalmente por lavas andesíticas y rocas piroclásticas, con una intercalación menor de areniscas que se transforman en cuarcitas cerca de los plutones del Eoceno debido al metamorfismo de contacto. Estas rocas volcánicas sobreyacen en conformidad a la Formación Tolar (Rivera et al., 2012). La formación muestra numerosos diques de andesitas porfídicas y signos locales de alteración argílica avanzada, indicativos de un antiguo edificio volcánico parcialmente conservado. Los intrusivos de edad equivalente están parcialmente expuestos hacia el oeste, precediendo a eventos de alzamiento y depositación de gravas

sintectónicas asociadas al sistema porfídico de cobre (Blanco & Tomlinson, 2006; Rivera et al., 2012).

#### **2.1.1.8. Formación Calama (Eoceno)**

Esta formación es fundamental para comprender la disposición de los pórfidos y su relación con la estratificación en el distrito de Chuquicamata (May et al., 2005; Rivera et al., 2012). Está dividida en dos unidades principales: el miembro Topater, compuesto por ortoconglomerados con intercalaciones de lavas andesíticas y brechas saháricas, y el Miembro Chorrillos, que consiste en conglomerados con clastos que varían desde bloques hasta grava gruesa, junto con areniscas de grano grueso y limonitas arenosas (Tomlinson & Blanco, 2008). En la mina Ministro Hales, se han identificado conglomerados correlacionados con esta formación, separados por la Falla Oeste de roca mineralizada (Álvarez & Miranda, 1991; Sillitoe et al., 1998; Müller & Quiroga, 2003; Rivera et al., 2012). La formación es contemporánea con la mineralización de los pórfidos cupríferos, y los conglomerados indican un contexto de alzamiento tectónico activo que influyó en la deposición de estos sedimentos sintectónicos y en el emplazamiento del sistema porfídico de cobre en el distrito Chuquicamata (Rivera et al., 2012).

#### **2.1.1.9. Formación El Loa (Oligoceno – Plioceno superior)**

Esta formación se compone de gravas y rocas sedimentarias de grano fino, incluyendo calizas lacustres. Esta formación sobreyace a la Formación Calama en el bloque oriental y a rocas paleozoicas y mesozoicas en el bloque occidental, separadas por la Falla Oeste. El Grupo El Loa se divide en dos unidades principales: el miembro inferior, conocido como Formación Jalquinche, está compuesto por fangolitas, areniscas, capas de yeso y tobas intercaladas en la base y el techo (Tomlinson & Blanco, 2008; Alcota et al., 2009; Rivera et al., 2012). El miembro superior, denominado Formación Opache, consiste en calizas y sedimentos lacustres con intercalaciones de tobas (Tomlinson & Blanco, 2008). Estas formaciones marcan la fase final de la sedimentación en la cuenca de Calama, posterior a los últimos movimientos registrados en la Falla Oeste (Rivera et al., 2012).

#### **2.1.2. Unidades intrusivas**

#### **2.1.2.1. Complejo Plutónico y Metaplutónico Cerros de Chuquicamata (Carbonífero superior- Triásico inferior)**

abarca las rocas plutónicas más antiguas de la región, organizadas en cinturones con orientación NNE-SSW que aumentan en edad de oeste a este. La unidad más antigua es el Granito Mesa, que incluye granitos, sienogranitos y monzogranitos foliados, datados entre 305 y 295 Ma (Tomlinson & Blanco, 2008). Este granito está intruido por dioritas y cuarzo-dioritas, con una fase tardía datada entre 238 y 229 Ma, que interseca las dioritas con orientación NE-SW y se encuentra en contacto con rocas volcánicas y calizas del Triásico a través de la Falla Mesabi. Además, la Granodiorita Elena intruye las rocas volcánicas del lado occidental del Triásico y es intruida por el Complejo Porfídico Chuquicamata en su lado oriental, sugiriendo una compleja relación entre estas unidades (Rivera et al., 2012).

#### **2.1.2.2. Pórfidos Hipabísales (Cretácico superior)**

La serie de Pórfidos Hipabisales se emplaza disminuyendo en edad de oeste a este, donde presentan una edad radiométrica de entre 69 a 63 Ma, donde las rocas más antiguas se encuentran determinadas como monzonitas y granodioritas (Ballard et al., 2001; Campbell et al., 2006; Rivera et al., 2012). Esta serie interseca cortando las rocas sedimentarias del miembro superior de la Formación Quehuita, provocando un metasomatismo y metamorfismo de contacto (Tomlinson & Blanco, 2008).

#### **2.1.2.3. Complejo Diorítico Los Picos (Eoceno medio)**

La unidad presenta una datación de 43 a 42 Ma (Dilles et al., 1997, 2011; Campbell et al., 2006; Tomlinson et al., 2010; Rivera et al., 2012). Está constituido por rocas de diorita, monzonita y monzodiorita con dirección N-S, y una longitud aproximada de 30 km, cortando las Formaciones Collahuasi, Quebrada Mala, Icanche, Quehuita y Estratos Cerros de Chuquicamata (Rivera et al., 2012).

#### **2.1.2.4. Complejo Granodiorítico Fortuna**

Esta unidad se extiende al este de la Diorita Los Picos, abarcando aproximadamente 29 km de longitud y 6 km de ancho en dirección NNE-SSW. Está compuesta por cuatro unidades distintas: Granodiorita Antena (40-39 Ma), Granodiorita Fiesta (39-37 Ma),

Granitos Aplíticos Tetera (40-37 Ma) y Pórfidos Granodioríticos San Lorenzo (38-37 Ma) (Ambrus, 1979; Dilles et al., 1997; Tomlinson et al., 2001). La Granodiorita Antena es la más antigua y presenta una textura de grano fino a medio con hornblenda, biotita y ocasionalmente augita. Intruye a las Dioritas Los Picos y a las rocas volcánicas de la Formación Icanche.

Las unidades más recientes, como la Granodiorita Fiesta, que muestra textura hipidiomórfica inequigranular con mega-cristales de feldespato potásico, intruyen a la Granodiorita Antena y a la Formación Quebrada Mala. Los Granitos Aplíticos Tetera son stocks irregulares que también intruyen a la Granodiorita Fiesta. Por último, los Pórfidos Granodioríticos San Lorenzo se dividen en dos litofacies, con una fase temprana relacionada con alteración potásica y mineralización de sulfuros de cobre, y una fase más tardía monzodiorítica a granodiorítica. Estas unidades presentan una compleja relación de intrusión, donde la unidad más joven gradualmente intruye a las más antiguas, aunque en algunos sectores se observa inversión de esta relación (Dilles et al., 1997; Tomlinson et al., 2001).

#### **2.1.2.5. Pórfido Toki y Mina Ministro Hales (Eoceno inferior – Eoceno superior)**

El clúster Toki está constituido por los pórfidos cupríferos Genoveva, Quetena, Toki, Miranda, Opache y Pulucktur, los cuales se emplazan en roca andesita, dacita, riolita y roca sedimentaria de la Formación Collahuasi; monzodiorita a diorita cuarcífera del Complejo Los Picos; granodiorita del Complejo Granodiorítico Fortuna, ubicados bajo las gravas aluviales o rocas sedimentarias del Mioceno - Plioceno (Camus, 2003; Rivera & Pardo, 2004; Rivera et al., 2009, 2012). Además, representa un evento de mineralización de tipo pórfido Cu-Mo ocurrido entre 38 y 36 Ma (Barra et al., 2013).

#### **2.1.2.6. Complejo Porfídico Chuquicamata (Eoceno superior – Oligoceno inferior)**

La unidad se extiende de manera alargada y subvertical hacia el oeste, con dimensiones de 14 km de largo y entre 0.7 a 2 km de ancho, abarcando desde la mina Chuquicamata hasta el norte de la mina Radomiro Tomic (Rivera et al., 2012). La litología predominante

es granodiorítica, aunque también se presentan variaciones como monzodiorita cuarcífera, monzogranito y monzonita cuarcífera (Aracena, 1981; Cabrera, 2011).

En la mina Chuquicamata, este complejo se subdivide en varios pórfidos basados en criterios texturales: el Pórfido Este, que presenta granodiorita de biotita y hornblenda con textura porfídica; el Pórfido Oeste, que varía de microgranito a microgranodiorita de biotita; el Pórfido Banco, compuesto por micromonzogranito cuarcífero de biotita; y el Pórfido de Textura Fina, caracterizado por cuerpos tabulares discontinuos con fuerte alteración sericítica y una textura más fina (Ossandón et al., 2001).

## **2.2. Geología local de Chuquicamata**

En el distrito de Chuquicamata se localizan importantes yacimientos de tipo pórfido Cu-Mo, los cuales están relacionados con la franja metalogénica del Eoceno-Oligoceno. (Rivera et al., 2012).

### **2.2.1. Complejo Porfídico Chuquicamata**

El Complejo Porfídico Chuquicamata presenta una composición que varía desde monzodiorita hasta granodiorita de biotita, con una orientación subvertical a vertical, con contactos comúnmente foliados. El complejo está constituido por los siguientes tres pórfidos:

#### **2.2.1.1. Pórfido Este (34.6 Ma.)**

Es el pórfido que presenta un mayor volumen, distribuido en todo el yacimiento Chuquicamata, con una geomorfología elongada con una orientación NNE, siendo intruido por los Pórfidos Oeste y Banco. Su composición varía desde granodiorita a monzodiorita cuarcífera de biotita, con una textura hipidiomórfica granular, fanerítica inequigranular a débilmente porfídica, con megacristales de feldespatos potásicos con textura poiquilítica, fenocristales de plagioclasas subhedrales a euhedrales y fenocristales de biotita con escasa hornblenda, cuarzo y feldespato intersticial. Datado con el método de U-Pb zircón con una edad de 34.6 Ma (Ballard et al., 2001; Camus, 2003).

#### **2.2.1.2. Pórfido Oeste (33.5 Ma.)**

El pórfido se presenta como afloramiento en la zona extremo norte del yacimiento Chuquicamata, con un cuerpo irregular semi elongado de dimensiones pequeñas, con un eje máximo de aproximadamente 1 km por 250 metros de ancho, que intruye al Pórfido Este, mostrando un contacto que no es abrupto, sino gradual y difuso. Esto significa que, en lugar de haber una línea clara y definida entre ambos pórfidos, la transición entre ellos es suave y se produce de manera paulatina. El pórfido presenta una composición monzogranítica de grano medio con plagioclasas, feldespato potásico, ojos de cuarzo y biotita en una masa fundamental aplítica con un hábito sacaroidal. Datado con U-Pb zircón con una edad de 33.5 Ma (Ballard et al., 2001).

#### **2.2.1.3. Pórfido Banco (33.3 Ma.)**

El pórfido aflora en el sector norte del yacimiento Chuquicamata con una morfología de cuerpos irregulares, intruyendo al Pórfido Este en forma de diques con contactos bien definidos y abruptos. Su litología presenta plagioclasas en una masa fundamental fina de textura aplítica, caracterizándose por una textura porfídica bimodal con dos tamaños de fenocristales. Datado mediante U-Pb zircón con una edad de 33.3 Ma (Ballard et al., 2001).

#### **2.2.2. Roca de caja del Pórfido Chuquicamata**

##### **2.2.2.1. Granodiorita Elena (37.7 Ma.)**

Este cuerpo geológico presenta una litología que varía desde granodiorita hasta monzodiorita cuarcífera, compuesta principalmente por biotita y escasa hornblenda. Su color oscila entre gris rosado y gris, y su textura es hipidiomórfica equigranular de grano medio. La mineralización de sulfuros es escasa o prácticamente nula, encontrándose asociada principalmente a los contactos con diques andesíticos. Es relevante señalar que la Granodiorita Elena exhibe signos de alteración clorítica, que proviene de los procesos de alteración típicos de un pórfido. Aflorando en la zona este y noreste del yacimiento, limitada por la Falla Mesabi. En el extremo sur, se puede observar el contacto con el Pórfido Este, el cual se considera un límite difuso debido a la similitud entre ambas rocas. Mediante el método U-Pb zircón, se determinó una edad de 37.7 Ma. (Ballard et al., 2001).

##### **2.2.2.2. Granodiorita Fortuna (39 – 38 Ma.)**

Corresponde a un stock granodiorítico de hornblenda y biotita con una textura fanerítica de grano medio a grueso, con variaciones locales. En los alrededores de la Falla Oeste, la unidad es afectada por una fuerte brechización y cizalleo, con abundantes vetillas de calcita y hematita. Además, manifiesta alteraciones cloríticas de baja intensidad en los minerales máficos; en cambio, se puede presentar alteración potásica de baja intensidad y mineralización tardímagmática de baja ley (pirita, calcopirita y molibdenita subordinada) en sectores locales a una profundidad de 1 a 2 km al oeste de la Falla Oeste, asociada a la facies Pórfido San Lorenzo. Mediante el método U-Pb se determinó una edad de 39-38 Ma (Ballard et al., 2001).

### **2.2.2.3. Metavolcanitas y Metasedimentitas**

Se conforma de rocas de origen sedimentario, volcánico e ígneo que se encuentran afectadas por metamorfismo de contacto y dinámico, aflorando como una franja irregular con orientación N-S. El grupo de rocas se encuentran parcialmente metamorfozadas y milonitizadas, con rocas completamente silicificadas. Se pueden distinguir metasedimentos clásticos y químicos, milonitas, cataclasitas, andesitas volcánicas, rocas córneas y rocas deformadas no identificadas. Por lo general, las rocas que presentan metamorfismo resultan ser estériles; sin embargo, existen sondeos profundos que identifican metavolcanitas y metasedimentitas con mineralización del tipo skarn de calcopirita y magnetita. El grupo se encuentra "colgado" con contactos estructurales hacia el oeste con el Pórfido Este y hacia el este con las Granodiorita Elena (Siña et al., 2005).

### **2.2.3. Estructuras principales**

El desarrollo de los pórfidos y la génesis del depósito de Chuquicamata, junto con sus episodios de mineralización y alteración, están fuertemente influenciados por las estructuras que han moldeado toda su historia evolutiva (Ossandón et al., 2001). Estas estructuras, que se ilustran en la figura 4, incluyen las principales fallas: Oeste, Americana y Estanques Blancos, las cuales desempeñan un papel crucial en la depositación y mineralización del Pórfido Chuquicamata. Además, a nivel de mina, destacan otras estructuras importantes como las fallas C-2, Zaragoza, Portezuelo, NEE-1 y la zona de falla NNW-SSE y WNW-ESE (Collado et al., 2005).

A continuación, se describirán los rasgos estructurales más relevantes en orden cronológico:

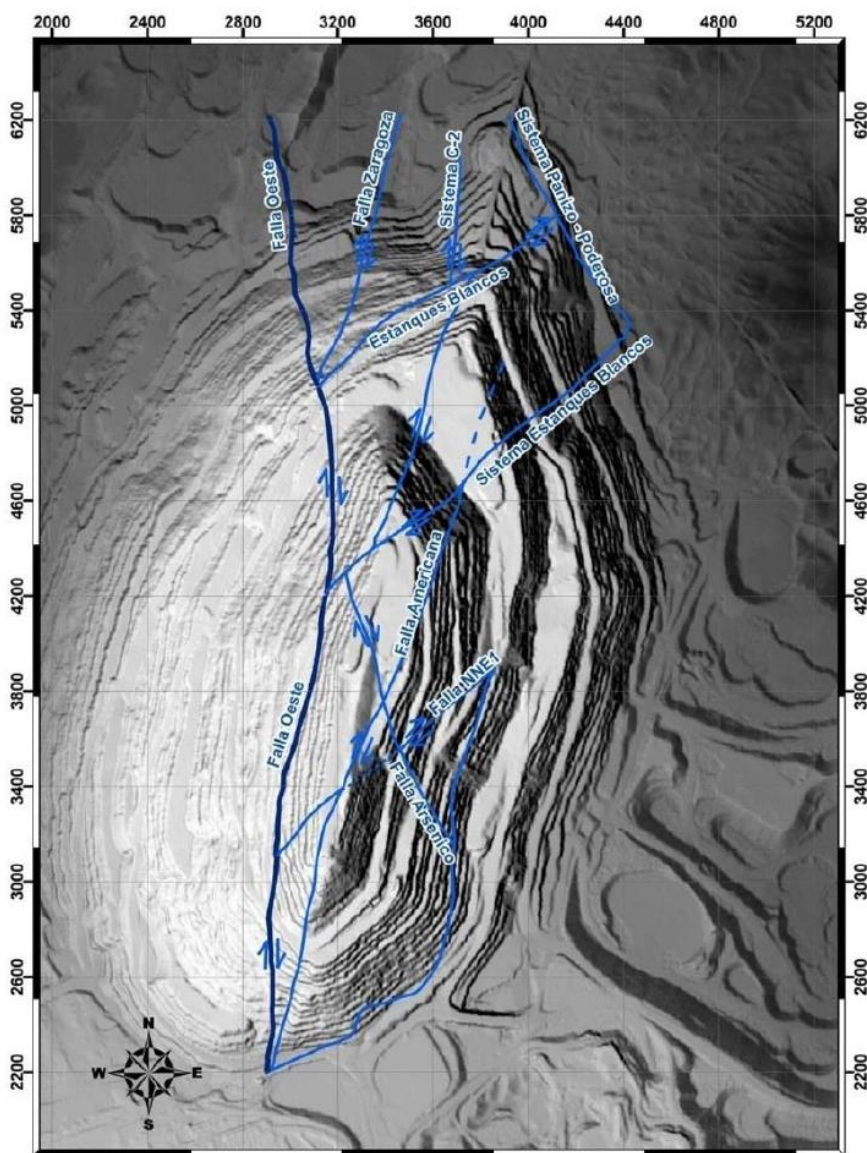


Figura 4: Estructuras principales en la mina Chuquicamata (Collado et al., 2005).

### 2.2.3.1. Zona de cizalle frágil – dúctil de orientación NNE-SSW

Conformada por la Zona de Deformación Este, zonas cataclásticas que controlan la alteración potásica intensa, la Falla Americana, la Falla Zaragoza y la Zona de Falla C-2. Esta configuración representa la fase más antigua del depósito, influyendo en el emplazamiento inicial del Pórfido Chuquicamata y en las primeras etapas de mineralización.

### **a) Zona de Deformación Este**

Su identifica de manera continua en las zonas centrales y sureste del yacimiento, delimitando el límite entre el Complejo Porfídico Chuquicamata y la Granodiorita Elena. Esta área presenta complejidad, compuesta por rocas falladas cohesivas como milonitas, cataclasitas y brechas de falla recrystalizadas, con un grosor variable e inclinación pronunciada hacia el oeste ( $\pm 80^\circ$ ). Las brechas contienen fragmentos de litologías intrusivas circundantes y cuarzo, posiblemente relacionados con etapas tempranas de mineralización, incrustados en una matriz recrystalizada de clorita, feldespatos y magnetita, características de un protolito ígneo.

### **b) Zona de Falla Americana**

Esta zona de falla, con una orientación N-S e inclinación entre  $80^\circ$  y  $88^\circ$  hacia el oeste, es un rasgo estructural significativo vinculado al desarrollo del sistema mineralizado y la zona de cizalle *Riedel* post-mineral. Se presenta como una brecha con una matriz de minerales como piritita y enargita, afectando principalmente a las vetas de cuarzo-molibdenita. Su reactivación se debe a la actividad cizallante sinistral de la Zona de Falla Oeste. En su estado anterior, carece de mineralización y actúa como límite oriental para la zona de descarga hidrotermal durante la alteración y mineralización primaria, un papel que comparte con la Zona de Falla C2, influenciado por la cinemática de la Zona de Falla Estanques Blancos (Siña et al., 2005; Véliz, 2009).

### **c) Zona de Falla C-2**

Ubicada en el extremo norte del depósito, esta estructura antigua está asociada con la formación del sistema mineralizado, similar a la Zona de Falla Americana. Su trazado se extiende entre 5800N y 6400N, y 5200N y 4600N, abarcando hasta 150 metros con una orientación de  $N20^\circ E/80^\circ NW$ . En esta franja se observa deformación cohesiva frágil, incluyendo brechas y pseudotaquilitas, junto con salbandas grises. Las brechas presentan indicadores de movimientos dextrales, sincrónicos con la mineralización primaria, mientras que las salbandas muestran movimientos sinestrales, similares a los de la Zona de Falla Americana. Se interpreta que esta estructura constituye la porción septentrional de la Zona de Falla Americana, desempeñando un papel análogo (Véliz, 2009).

#### ***d) Falla Zaragoza***

En el extremo norte de la mina, cerca de la Zona de Falla Oeste, se encuentra la Falla Zaragoza, una estructura vertical con rumbo N-S a NNE-SSW, similar a la Falla Americana en el sur. Entre el sistema Zaragoza y la Falla Oeste se halla el 'Pórfido Chuqui', caracterizado por rocas máficas cloritizadas y escasa mineralización de baja ley de cobre, lo que sugiere el cierre y simetría original del depósito en su extremo noroeste. La Falla Zaragoza actúa como una veta reactivada con cataclasis, funcionando como una falla sinistral-inversa en la región septentrional del depósito (Véliz, 2009).

#### **2.2.3.2. Foliación dúctil en el Pórfido Chuquicamata**

Este elemento estructural se observa en varias zonas, donde se desarrolla un cizallamiento milonítico que genera foliación y lineación dúctil. Estas características resultan de la orientación, aplastamiento y estiramiento de minerales máficos y granos de cuarzo en las diversas unidades litológicas. La deformación ocurre después de las alteraciones potásicas tempranas, pero antes de la alteración cuarzo-sericítica tardía (Siña et al., 2005).

#### **2.2.3.3. Sistema de Fallas Estanques Blancos y Portezuelo**

Se trata de un conjunto de fallas con una orientación predominante ENE-WSW y una inclinación subvertical, que se extiende a lo largo de todo el depósito, pero es especialmente penetrante en la parte norte, donde se encuentra la Zona de Falla Estanques Blancos, y hacia el sur con la Zona de Falla Portezuelo (Siña, et al., 2005).

#### ***a) Zona de Falla Estanques Blancos***

Con orientación ENE-WSW e inclinación hacia el SSE, esta estructura se extiende entre las coordenadas 5000N y 6000N. Presenta características de movimiento dextral-normal, desarrolladas después de la mineralización primaria. Su función principal es facilitar el contacto entre las partes más profundas del sistema porfídico en el bloque norte y las más superficiales en el bloque colgante al sur (Véliz, 2009).

#### ***b) Zona de Falla Portazuelos y NNE-1***

La Falla Portezuelo se sitúa en el extremo sur de la mina, con orientación ENE-WSW y un manteo uniforme hacia el noroeste. Se manifiesta a través de trazas continuas,

indicativas de movimientos dextral-normales posteriores a la mineralización primaria, influyendo en la Falla Oeste al alterar su inclinación en aproximadamente 25°. Al igual que la Zona de Falla Estanques Blancos, está relacionada con la formación del sistema mineralizado, reactivando la anisotropía heredada al intersectar este sistema y hacerlo más permeable (Véliz, 2009). Además, el sistema NNE-1, ubicado en el centro-sur del depósito, se desarrolla en estrecha relación con los anteriores. Este sistema, con orientación NNE–SSW y carácter dextral-normal, forma un sistema escalonado que expone gradualmente las partes más profundas del cuerpo mineralizado, desde el norte (área de mina Radomiro Tomic y norte de Chuquicamata) hacia las capas más superficiales al sur (mina Ministro Hales) (Siña et al., 2005; Véliz, 2009).

#### **2.2.3.4. Zona de Falla Oeste**

Se destaca como el rasgo estructural más prominente en la mina Chuquicamata, extendiéndose a lo largo del yacimiento. Su orientación varía de N–S a N10°E, con un manto variable hacia el oeste y espesores entre 15 y 60 metros. A pesar de su inclinación general, su trazado conserva su configuración al ascender en altitud, manteniéndose relativamente inalterado por la topografía del rajo y mostrando cierta compatibilidad con un manto hacia el este. Este fenómeno se atribuye a la influencia de rasgos estructurales posteriores que inducen flexión plástica en su trayectoria. Su composición, principalmente arcillosa (salbanda), le confiere un comportamiento no completamente frágil ante los esfuerzos (Véliz, 2009).

#### **2.2.3.5. Zona de falla NNW-SSE y WNW-ESE**

Estas estructuras presentan una disposición geométrica y cinemática coherente con zonas de cizallamiento transcurrente sinistral. Las fallas NNW–SSE son sintéticas (R) respecto al movimiento de la falla maestra, la Falla Oeste, mientras que las WNW–ESE son antitéticas (R'). En posición *Riedel*, reflejan desplazamientos oblicuos con una componente horizontal más prominente que la vertical. Las fallas NNW–SSE muestran rechazos horizontales sinestrales, mientras que las WNW–ESE son dextrales (Véliz, 2009).

### 2.3. Unidades Geotécnicas Básicas (U.G.T.B.)

Desde el año 1999, se empezó a implementar el concepto de unidades geotécnicas básicas (UGTB) realizada por la dirección de geotecnia de Codelco Norte, con el fin de caracterizar el yacimiento de Chuquicamata, en el que se obtuvieron cuerpos con características geotécnicas relativamente homogéneas, producto de la superposición de las alteraciones sobre las unidades litológicas.

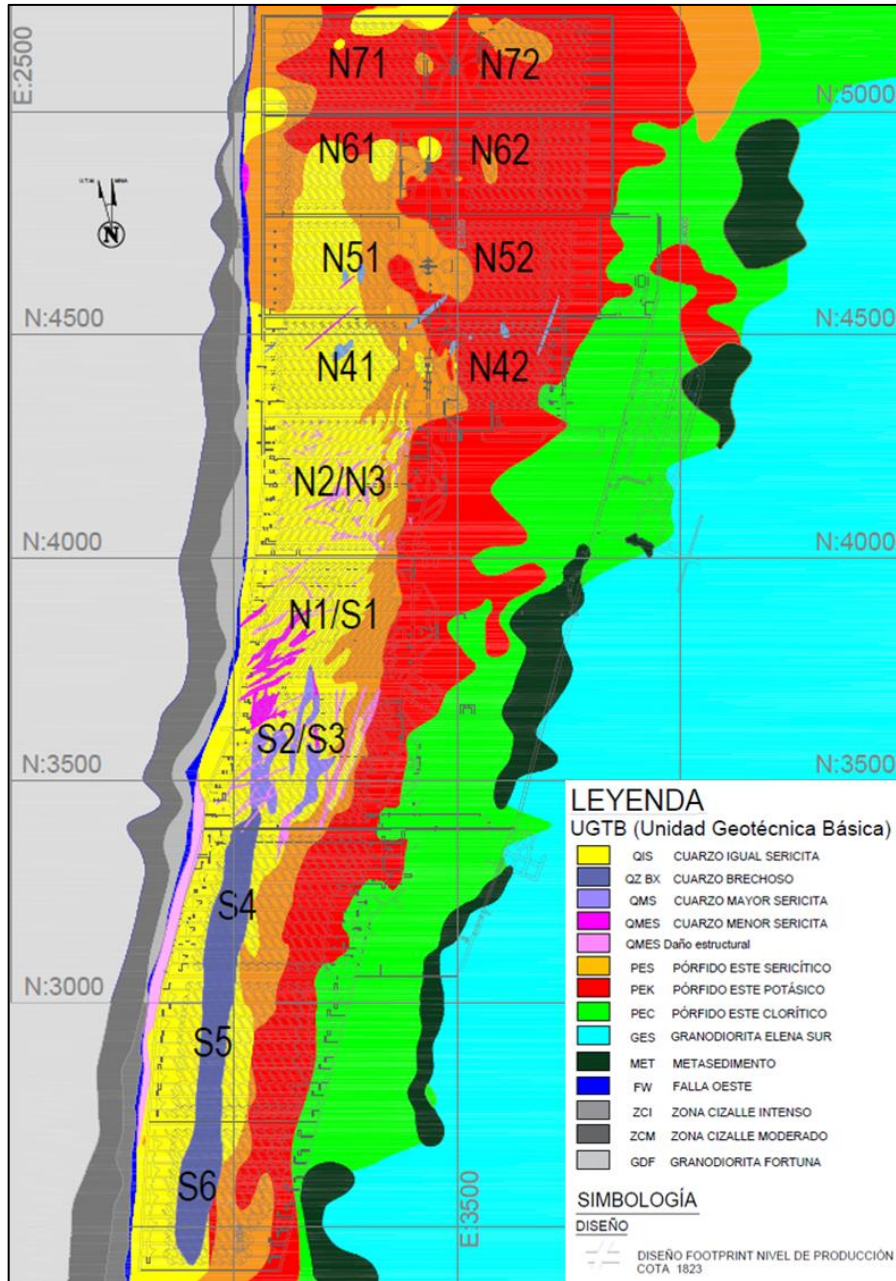


Figura 5: Consolidado modelo UGTB macrobloque N7 a S6, nivel de producción - Cota 1823 (Superintendencia de Estudios Geomecánicos, CODELCO, 2023).

### **2.3.1. Unidad geotécnica Granodiorita Fortuna (GDF)**

Compuesta exclusivamente por Granodiorita Fortuna, esta roca presenta una textura equigranular de grano medio a grueso, con hornblenda y cristales de 4 a 12 mm. La alteración principal es clorítica, además de sericitización, feldespato potásico y arcillas.

Es la unidad de mayor volumen en la mina Chuquicamata, extendiéndose por el bloque oeste de la Falla Oeste, y actúa como límite occidental del yacimiento. Geotécnicamente, se clasifica como un macizo rocoso muy resistente, con una resistencia a compresión uniaxial ( $I_{s50} = 3.08$  MPa). La fracturación es irregular, con fracturas selladas a ligeramente abiertas (<1 mm). Según la clasificación GSI de Hoek & Brown (1997), se categoriza como fracturado a fuertemente fracturado en bloques, con discontinuidades de regular a buena y calidad geotécnica de buena a regular.

### **2.3.2. Unidad geotécnica Zona de Cizalle Moderado (ZCM)**

Situada adyacente a la traza occidental de la Falla Oeste, esta zona presenta una deformación menos pronunciada sobre la Granodiorita Fortuna. La textura está parcialmente deteriorada, con fragmentos de granodiorita fracturada en planos irregulares rellenos de arcilla.

La ZCM muestra alteraciones que incluyen calcita, feldespato potásico, minerales arcillosos, y cuarzo en microfracturas o vetillas, así como clorita que altera cristales de biotita primaria. Se extiende en dirección N-S como un halo externo de la zona de cizalle intensa, formando una franja paralela a esta.

Los ensayos uniaxiales realizados en terreno mediante sondajes con equipos PLT indican que esta unidad es resistente ( $I_{s50} = 2.76$  MPa). Según la clasificación GSI de Hoek & Brown (1997), se clasifica como un macizo fracturado y perturbado a fuertemente fracturado en bloques, con discontinuidades de pobre a regular y calidad geotécnica regular.

### **2.3.3. Unidad geotécnica Zona de Cizalle Intenso (ZCI)**

Ubicada adyacente a la traza occidental de la Falla Oeste, esta zona presenta la mayor deformación de la Granodiorita Fortuna debido a la actividad de la falla. La intensa

deformación ha destruido completamente la textura original de la roca, dejando múltiples planos de cizalle (más de 4 en un bloque de 10 cm), biotitas orientadas y rellenos arcillosos.

La principal alteración es la calcita, que llena microfracturas y cavidades. También se observan minerales arcillosos que alteran fragmentos de plagioclasa y sericita, que puede formar la matriz de la roca. Se interpreta que esta zona se extiende en paralelo a la Falla Oeste y disminuye en espesor con la profundidad. Su composición es similar a una brecha no cohesiva, con bloques de hasta 10 cm en una matriz arcillosa que representa aproximadamente el 15% del volumen total, lo que permite que el material se comporte como un suelo, con poca cohesión y propenso a desprendimientos.

Los ensayos uniaxiales realizados con equipo PLT indican que esta unidad es débil a moderadamente resistente ( $I_s50 = 1.97$  MPa). Según la clasificación GSI de Hoek & Brown (1997), se considera un macizo fracturado y perturbado a desintegrado, con discontinuidades de muy pobre a pobre y calidad geotécnica mala.

#### **2.3.4. Unidad geotécnica Brecha de Falla (BEF)**

Esta unidad se presenta como una franja alargada en dirección N-S, compuesta principalmente por mega brechas tectónicas generadas por reactivaciones en la Falla Oeste. La brechización tectónica proviene del protolito de la Granodiorita Fortuna y se caracteriza por fragmentos de roca en una matriz molida y arcillas compactas, con un color rojo distintivo por la presencia de hematita u óxidos de hierro que llenan las discontinuidades.

La alteración principal es causada por calcita, junto con feldespatos potásicos y minerales arcillosos. También se observa cuarzo secundario en microfracturas y vetillas, y clorita que reemplaza cristales de biotita.

El macizo rocoso es débil a moderadamente resistente a la compresión uniaxial, con un  $I_s50$  de 1.71 MPa, según mediciones realizadas con equipo PLT. Presenta un fracturamiento polidireccional con fracturas selladas y rellenos de hematita y arcilla. Según el índice GSI de Hoek & Brown (1997), esta unidad muestra una calidad geotécnica

mala, caracterizándose como un bloque fuertemente fracturado y perturbado, con discontinuidades de pobre a regular.

### **2.3.5. Unidad geotécnica Roca Cuarzo – Sericita (RQS)**

La Esta unidad se forma por la alteración cuarzo-sericita pervasiva sobre el Pórfido Este, presentándose como una roca altamente alterada dominada por cuarzo mineral. Se caracteriza por "ojos recristalizados" y vetillas polidireccionales en una matriz fina de sericita. La variabilidad geotécnica de esta unidad está relacionada con el porcentaje de cuarzo y sericita, definiendo tres subunidades distintas: Cuarzo menor Sericita (QMeS), Cuarzo igual Sericita (QIS) y Cuarzo mayor Sericita (QMS).

#### **2.3.5.1. Unidad geotécnica Cuarzo Menor Sericita (QMeS)**

Esta unidad consiste en una roca con textura completamente alterada debido a una extensa alteración cuarzo-sericita, caracterizada por un contenido de sericita mayor al de cuarzo, superando el 75% del volumen total de la roca. La alteración incluye cuarzo secundario y sericita, que obliteran completamente la textura original, con trazas de anhidrita y cristales de yeso presentes.

Se asocia principalmente con la zona de daño de la Falla Oeste y las fallas de tipo VIF (Very Important Fault). La unidad se presenta en orientación N-S como una franja discontinua en el flanco oriental de la Falla Oeste, formando un halo alrededor de estructuras mayores. A mayor profundidad, su morfología se aísla, extendiéndose colgante hasta los 4,500 metros al norte.

Se caracteriza como un macizo rocoso débil a la compresión uniaxial, con un  $I_{s50}$  de 1.30 MPa, y según el índice GSI de Hoek & Brown (1997), se clasifica como fracturada y perturbada, con condiciones de discontinuidad de mala a regular.

#### **2.3.5.2. Unidad geotécnica Cuarzo Igual Sericita (QIS)**

Esta unidad se define como el background de las unidades Cuarzo menor Sericita y Cuarzo mayor Sericita. Está compuesta por una roca alterada por cuarzo y sericita de manera pervasiva, obliterando completamente su textura original. Se pueden observar cristales de anhidrita y cantidades menores de yeso.

La característica distintiva de esta unidad es la proporción equitativa de cuarzo y sericita, con un contenido de cuarzo que varía entre el 30% y el 60% del volumen total de la roca. Se extiende a lo largo de todo el cuerpo de cuarzo sericitico, siendo la mayor expresión volumétrica de las tres subunidades. Se presenta como un cuerpo elongado en dirección N-S, continuo hasta los 4,500 metros al norte, donde se manifiesta como cuerpos aislados y colgados, desapareciendo a profundidades de 5,000 metros al norte. Además, esta unidad gradúa hacia el este hacia el Pórfido Este Sericitico.

En términos de resistencia a la compresión uniaxial, se caracteriza como moderadamente resistente a resistente, con un  $I_{s50}$  de 3.25 MPa. Según el índice GSI de Hoek & Brown (1997), se clasifica como fuertemente fracturado en bloques, con una condición de discontinuidad regular.

#### **2.3.5.3. Unidad geotécnica Cuarzo Mayor Sericita (QMS)**

Esta unidad representa una roca completamente obliterada debido a la intensa alteración cuarzo-sericítica. La alteración está dominada por cuarzo secundario y sericita, inicialmente formando vetas monominerálicas de cuarzo, con cantidades menores de anhidrita y yeso. La sericita y el cuarzo secundario penetran la roca, alterando cristales de feldspatos relictos y asociándose con calcita y minerales de arcilla. La presencia de anhidrita, yeso, calcita, sericita y minerales de arcilla se encuentra diseminada y como relleno de microfracturas.

Esta unidad se caracteriza por tener más del 70% de cuarzo en comparación con sericita. Se manifiesta como una franja en dirección N-S en la zona central de la mina, ubicándose en el centro del cuerpo de cuarzo sericita. Se extiende a lo largo de la parte inferior del talud oeste y continúa en la porción centro-sur del yacimiento, así como en cuerpos colgados y aislados.

En términos de resistencia a la compresión uniaxial, se clasifica como resistente a muy resistente, con un  $I_{s50}$  de 3.59 MPa. Según la clasificación GSI de Hoek & Brown (1997), se cataloga como fracturada en bloque, con una condición de discontinuidad buena.

#### **2.3.6. Unidad geotécnica Pórfido Este Sericitico (PES)**

Esta unidad se forma por la alteración sericítica potásica sobre el Pórfido Este. Petrográficamente, es una granodiorita a diorita cuarcífera con textura porfídica, caracterizada por fenocristales de tamaño medio en una matriz fina. La alteración débil y pervasiva del feldespatos a sericita distingue su textura original.

Se distribuye como una franja en dirección N-S en la zona centro-sur de la mina, mientras que en el sector norte se presenta sin una orientación preferencial. Hacia el oeste, tiene un contacto gradacional con la Unidad de Roca Cuarzo Sericítica, y hacia el este, gradúa hacia el Pórfido Este Potásico.

Los ensayos realizados en terreno con equipo PLT indican que esta unidad es resistente ( $I_{s50} = 4.25$  MPa). Presenta un fracturamiento intenso en direcciones no ortogonales, generando bloques irregulares. Según la clasificación GSI de Hoek & Brown (1997), se considera fuertemente fracturado en bloque, con condiciones de discontinuidad regular y calidad geotécnica de regular a buena.

### **2.3.7. Unidad geotécnica Pórfido Este Potásico (PEK)**

Esta unidad se forma por la alteración potásica (incluyendo potásica de fondo, "K-Sil", sericítica gris-verde y potásica intensa) sobre el Pórfido Este. Petrográficamente, es una roca porfídica con fenocristales de tamaño medio en una matriz fina, presentando una cantidad limitada de estos componentes.

Se presenta como una franja elongada y discontinua en dirección NE-SW, desde el centro hacia el sur de la mina, y en porciones aisladas hacia el norte dentro de la unidad del Pórfido Este Sericítico.

El macizo rocoso se caracteriza por ser muy resistente a la compresión uniaxial, con un  $I_{s50}$  de 4.59 MPa. Según la clasificación GSI de Hoek & Brown (1997), se cataloga como fracturado en bloque, con una condición de discontinuidad buena y calidad geotécnica buena.

### **2.3.8. Unidad geotécnica Pórfido Este Clorítico (PEC)**

Esta unidad se forma por la alteración clorítica sobre el Pórfido Este. Su forma geomorfológica es alargada, con orientación N-S a NNE-SSW, ubicándose en la zona

central del rajo Chuquicamata. Presenta un contacto gradacional en su límite oeste con las unidades Pórfido Este Sericítico y Pórfido Este Potásico, y una disconformidad hacia el este con los Metasedimentos y/o Granodiorita Elena Sur.

El macizo rocoso se caracteriza por ser resistente a muy resistente, con un  $I_{s50}$  de 4.39 MPa, según mediciones en testigos de sondajes con equipo PLT. Según el índice GSI de Hoek & Brown (1997), se clasifica como fracturado en bloque, con condiciones de discontinuidad que varían de buena a regular y calidad geotécnica considerada buena.

### **2.3.9. Unidad geotécnica Metasedimentos (MET)**

Esta unidad está compuesta por una mezcla de rocas sedimentarias, volcánicas e ígneas que han sufrido metamorfismo de contacto y dinámico, resultando en una roca parcialmente metamorfizada, milonitizada y silicificada. Se pueden identificar metasedimentos clásticos, metasedimentos químicos, milonitas, cataclasitas, andesitas volcánicas, rocas corneas y rocas deformadas indiferenciadas.

Los metasedimentos se distribuyen en el talud este como una franja continua e irregular con orientación NNE-SSW, y a menudo se presentan como cuerpos colgados. Tienen un contacto estructural hacia el oeste con la unidad del Pórfido Este Clorítico y hacia el este con la Granodiorita Elena Sur.

El macizo rocoso es resistente a la compresión uniaxial, con un  $I_{s50}$  de 4.53 MPa según mediciones de sondajes. La alta intensidad de fracturamiento, que no sigue una orientación preferencial, genera bloques irregulares de tamaños promedio de 15 cm y 8 cm. Según el índice GSI de Hoek & Brown (1997), se clasifica como fuertemente fracturado a fracturado y perturbado, con condiciones de discontinuidad entre regular y pobre, caracterizadas por pátinas de calcita, arcilla y óxidos de hierro en zonas lixiviadas.

### **2.3.10. Unidad geotécnica Granodiorita Elena Sur (GES)**

Esta unidad está compuesta exclusivamente por la Granodiorita Elena Sur, una roca de textura equigranular de grano medio a grueso, rica en biotita y hornblenda, afectada por alteración clorítica regionalizada. Se ubica en la zona este del rajo, formando una banda con orientación N-S y marcando el límite oriental del yacimiento. Se destaca por su muy alta resistencia a la compresión uniaxial, con un  $I_{s50}$  de 4.76 MPa, y presenta un

fracturamiento con direcciones definidas que se correlaciona bien con los sistemas estructurales principales, donde las diaclasas están selladas o ligeramente abiertas, resultando en un tamaño de bloque promedio de 25 cm.

Según el índice GSI de Hoek & Brown (1997), el rango de fracturación varía desde fracturado hasta fuertemente fracturado en bloques, con condiciones de continuidad que oscilan entre regular y buena. Esto determina que el macizo tenga una calidad geotécnica regular.

#### **2.3.11. Unidad geotécnica Lixiviados (LIX)**

Esta unidad incluye todas las rocas afectadas por procesos de lixiviación, que pueden variar desde parcial hasta pervasiva, como resultado de eventos de mineralización en el yacimiento. En la mina Chuquicamata, se observan principalmente afloramientos locales en las zonas periféricas del rajo, especialmente en los sectores norte y sur. En el norte, se ha confirmado su presencia a través de perforaciones que atravesaron la cobertura de grava y botaderos, revelando un terreno muy irregular con espesores máximos de hasta 200 metros y claros signos de control estructural.

El macizo rocoso presenta características de resistencia a la compresión uniaxial, estimada en terreno mediante un martillo geológico (IRS), y muestra un fracturamiento polidireccional con superficies levemente abiertas (entre 1 mm y 2 mm), generalmente bastante alteradas. Según el índice GSI de Hoek & Brown (1997), se clasifica como fuertemente fracturado en bloques, con condiciones de fractura que oscilan entre regular y pobre, otorgándole una calidad geotécnica regular.

### III CAPITULO 3: MARCO TEORICO

La generación de un modelo geotécnico mediante técnicas geoestadísticas es una herramienta esencial para la evaluación y gestión de la estabilidad y características geotécnicas de los depósitos minerales. Este enfoque integra el análisis variográfico, la interpolación mediante *kriging* y la simulación condicional para caracterizar la distribución espacial de propiedades críticas del terreno, como la resistencia y los comportamientos de deformación. Todos estos análisis estadísticos se llevarán a cabo utilizando datos de ensayos de carga puntual (PLT), lo que permitirá una representación precisa y detallada de las propiedades mecánicas del macizo rocoso.

#### 3.1. Ensayo de carga puntual – Point Load Test (PLT)

El ensayo de carga puntual (*Point Load Test* o PLT) se lleva a cabo para determinar la resistencia a la compresión simple de rocas irregulares, testigos de sondajes o bloques. Este método se realiza conforme a las especificaciones de la norma ASTM D 5731 (Método estándar de prueba para la determinación del índice de resistencia a la carga puntual de rocas y su aplicación en la clasificación de resistencia de rocas). En esta prueba, la carga se aplica utilizando una prensa hidráulica, donde la muestra se coloca entre dos punzones metálicos con forma cónica. Estos punzones deben tener dimensiones estandarizadas, con una apertura de 60° entre sus lados extremos y un radio de 5 mm en la punta (ASTM, 2023).

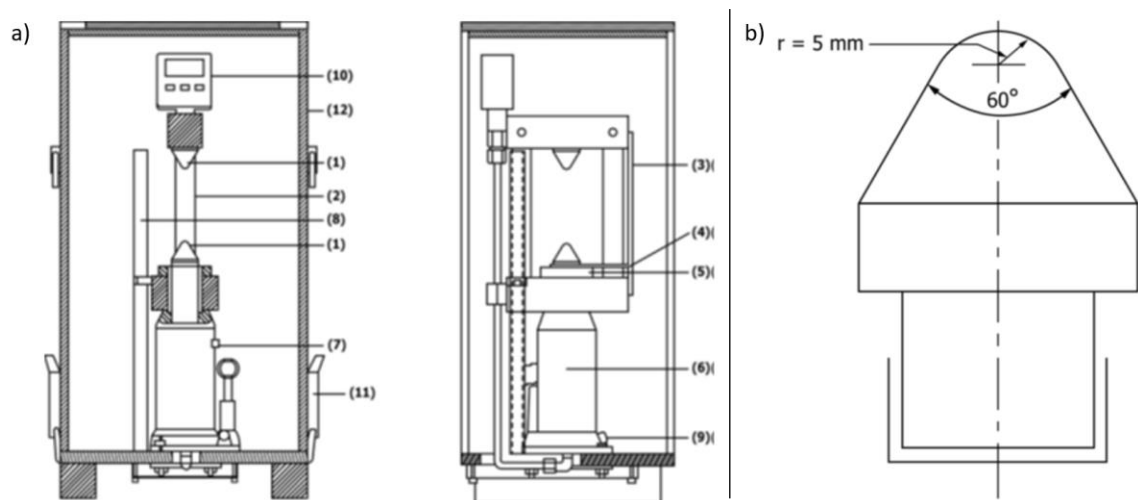


Figura 6: Equipo utilizado para ensayo PLT. a) Prensa Hidráulica, b) Punzón cónico estandarizado por ASTM D 5731.

Una vez que la muestra se fractura, es crucial medir la carga aplicada en el momento de la rotura y registrar el grado de deformación de las placas antes y durante el proceso de fractura.

Una vez ya realizada la prueba de resistencia se debe determinar el índice de resistencia a la carga puntual ( $I_s$ ), la cual se calcula por medio de la siguiente fórmula (ASTM, 2023):

$$I_s = \frac{P}{De^2} [MPa]$$

Donde:

- $P$  = Carga de falla [Newton] (Se corrige mediante,  $P$  = Valor medido en el equipo x 1.426 cm<sup>2</sup>)
- $D$  = Muestras diametrales [mm]
- $De^2$  =  $D^2$  para muestra diametrales [mm<sup>2</sup>]
- $De^2$  =  $4 \cdot \text{Área} / \pi$  [mm<sup>2</sup>] (Para muestras irregulares, axiales o bloques)

Luego de determinar el  $I_s$  se debe calcular el índice de resistencia a la carga puntual corregida ( $I_{s50}$ ), definido como el valor de  $I_s$  medido con un diámetro de 50mm y se corrige aplicándole un factor de corrección de tamaño ( $F$ ) (ASTM, 2023).

$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0.45}$$

Posteriormente se debe multiplicar el factor corrección ( $F$ ) con el índice de resistencia a la carga puntual ( $I_s$ ) (ASTM, 2023).

$$I_{s50} = F * I_s [MPa]$$

### 3.2. Análisis geoestadísticos

El análisis geoestadístico representa una herramienta fundamental en disciplinas como la geografía, la geología y el medio ambiente, así como en áreas afines. Su propósito es comprender la distribución espacial de variables geográficas o georreferenciadas mediante la aplicación de métodos estadísticos a datos geográficos. Este análisis permite examinar patrones, tendencias y relaciones espaciales. En términos más específicos, se enfoca en la

caracterización de la variabilidad espacial de los fenómenos, la predicción de valores en ubicaciones no muestreadas y la identificación de estructuras espaciales como la autocorrelación y la anisotropía. Entre las herramientas utilizadas se encuentran la interpolación espacial, los variogramas, el *kriging*, y otros métodos estadísticos y espaciales (Emery, 2013).

### 3.2.1. Variograma experimental

Es una función que describe la variabilidad espacial de una variable regionalizada  $Z(x)$  en función de la distancia entre  $n$  puntos  $\{x_1, \dots, x_n\}$  en un espacio geográfico. Siendo el estimador tradicional del variograma un vector de separación  $h$  dado, que se define de la siguiente manera:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} [z(x_\alpha) - z(x_\beta)]^2$$

El variograma experimental para un vector  $h$  se puede definir como el momento de inercia de la nube de correlación diferida (nube de puntos  $Z(x_\alpha)$  y  $Z(x_\beta)$ , con  $x_\alpha - x_\beta = h$ ), que calcula la distancia cuadrática promedio entre los puntos de la nube y la línea diagonal (Emery, 2013).

El variograma experimental se puede determinar para diferentes distancias  $h$  y direcciones. Igualmente, en la mayoría de los casos la distribución espacial de los datos no tiende a ser regular, de manera que se agregan tolerancias para la dirección y distancias (Emery, 2013), donde:

- $T(h)$ : Tolerancia de paso o distancia.
- $\theta$ : Azimut o dirección de interés. Medida en un punto horizontal respecto al norte, en sentido del reloj.
- $\Delta\theta$ : Tolerancia del azimut.
- $\Delta h$ : Ancho de banda en el azimut. Banda dentro de la cual se consideran validos los datos para el cálculo del variograma.

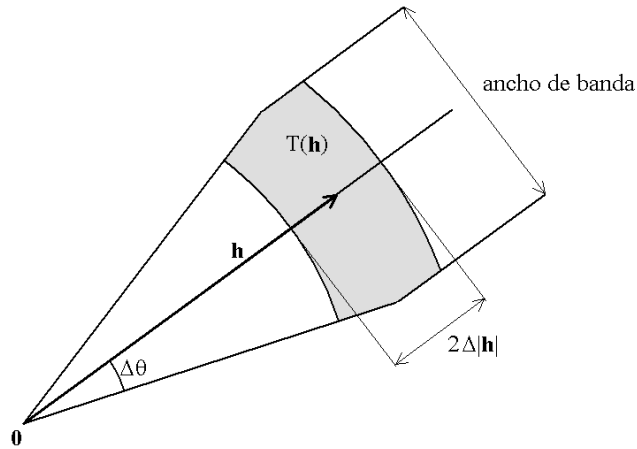


Figura 7: Región de tolerancia  $T(h)$  alrededor del vector  $h$ , caso bidimensional (Emery, 2013).

### 3.2.2. Variograma teórico o modelo

Es una función matemática que se ajusta a los datos observados para modelar la estructura de correlación espacial subyacente en la variable regionalizada  $Z(x)$ . Es una representación teórica de cómo debería comportarse la variabilidad espacial de la variable en ausencia de errores de muestreo o variabilidad aleatoria. Se utiliza para ajustar modelos de interpolación espacial y predecir valores en ubicaciones no muestreadas. Para lograr un buen ajuste a los datos observados, el variograma teórico se adapta utilizando métodos como el ajuste por mínimos cuadrados o técnicas de máxima verosimilitud (Emery, 2013).

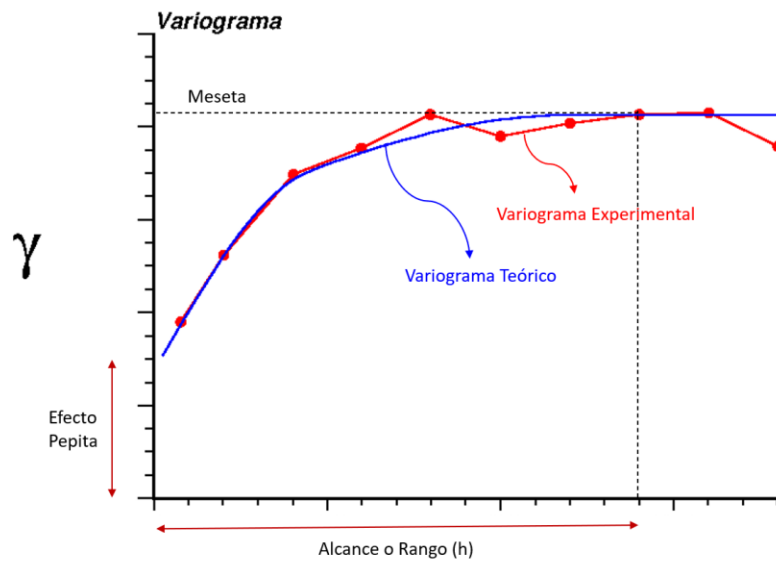


Figura 8: Características de un Variograma.

- **Efecto pepita:** representa la variabilidad espacial que no puede ser explicada por la distancia entre puntos de muestreo. Es un componente de varianza pequeño o nulo en el variograma, indicando que hay variabilidad aleatoria a una escala menor que la distancia de muestreo (Emery, 2013). El variograma pepítico de meseta C se define como:

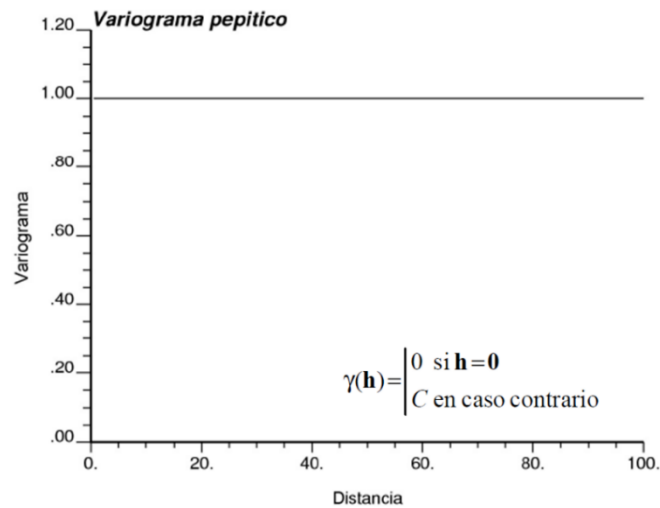


Figura 9: Variograma pepítico, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013).

- **Modelo esférico:** El variograma alcanza un *sill* (meseta) a una cierta distancia de alcance. A partir de ese alcance, la variabilidad se estabiliza y no se incrementa más con la distancia, indicando correlación espacial finita (Emery, 2013). El variograma esférico de alcance a y meseta C se define como:

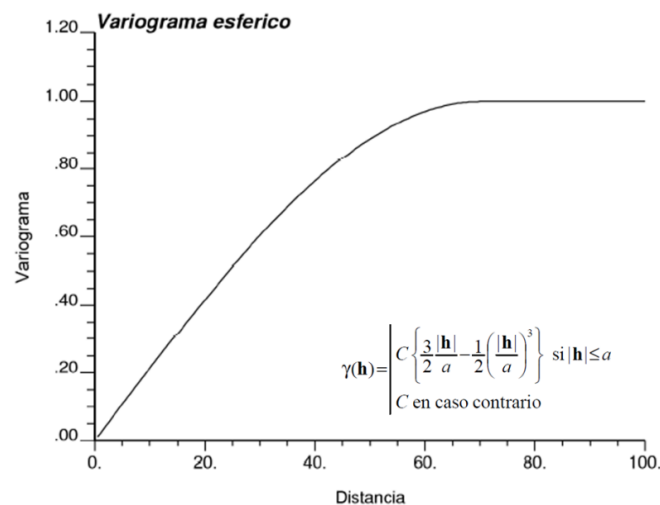


Figura 10: Variograma esférico, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013).

- Modelo exponencial:** La variabilidad aumenta con la distancia, pero no alcanza un sill meseta. Esto sugiere que la correlación entre los puntos de muestreo disminuye gradualmente a medida que aumenta la distancia (Emery, 2013). El variograma exponencial de parámetro  $a$  y meseta  $C$  se define como:

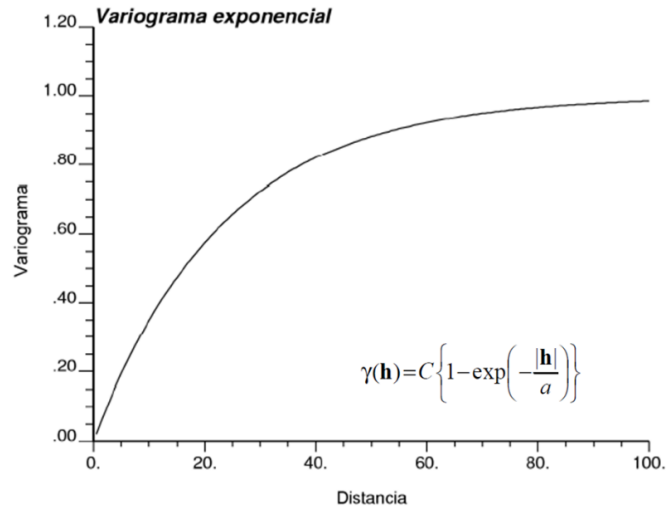


Figura 11: Variograma exponencial, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013).

- Modelo gaussiano:** Muestra un sill a una cierta distancia de alcance. La variograma tiene una forma más suave y simétrica alrededor del sill, con una transición más gradual desde el efecto pepita hasta el sill (Emery, 2013). El variograma Gaussiano de parámetro  $a$  y meseta  $C$ , donde la meseta se alcanza asintóticamente y el alcance práctico puede considerarse igual a  $a\sqrt{3}$  que se define como:

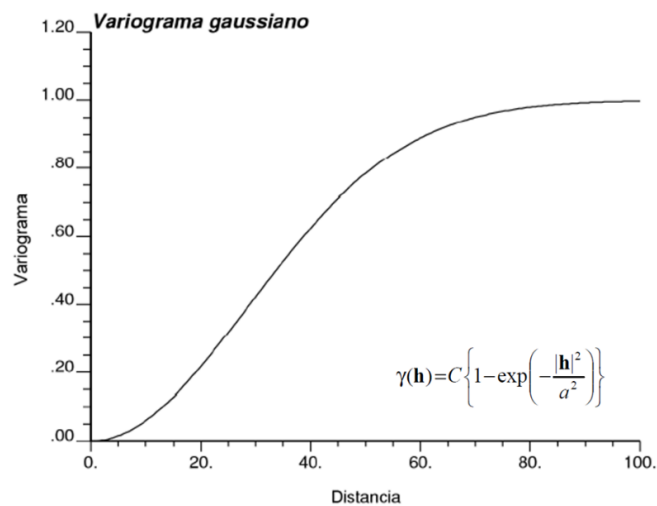


Figura 12: Variograma gaussiana, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013).

- Modelo seno cardinal:** Exhibe un comportamiento oscilante alrededor de un valor constante después del efecto pepita. Esto puede ser útil para capturar patrones periódicos o estructuras oscilatorias en la variabilidad espacial (Emery, 2013). El variograma seno cardinal de parámetro  $a$  y meseta  $C$  se define como:

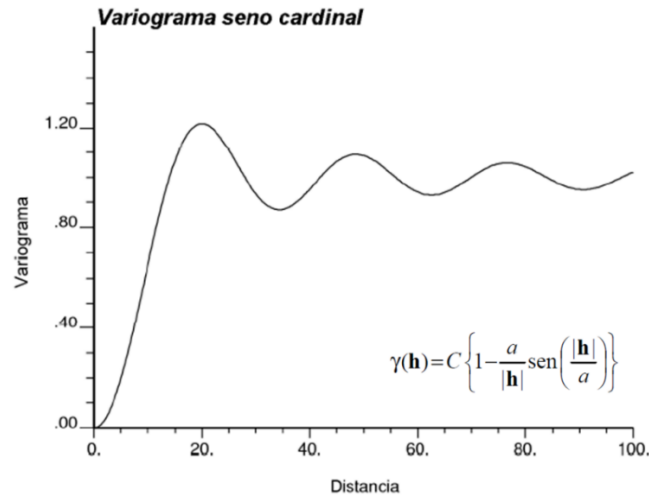


Figura 13: Variograma seno cardinal, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013).

- Modelo potencial:** Es un tipo de variograma que no tiene meseta ni alcance definidos, sino que aumenta indefinidamente con la distancia. El exponente  $\theta$  puede variar entre 0 (variograma pepítico) y 2 (variograma parabólico). Cuando  $\theta$  es 1, se llama modelo lineal (Emery, 2013). El variograma potencia de pendiente  $\omega$  y exponente  $\theta$  se define como:

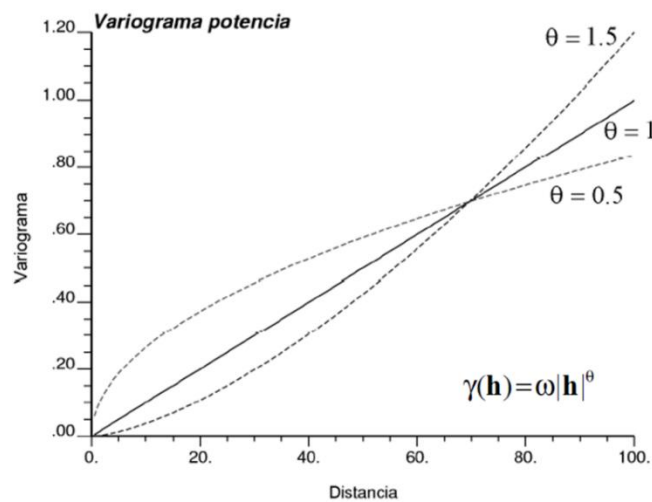


Figura 14: Variograma potencial, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013).

- **Modelo anidado:** Tiene la capacidad de capturar variabilidades espaciales a múltiples escalas dentro de un conjunto de datos. Esto implica la presencia de estructuras o patrones que se repiten a diferentes niveles de detalle dentro de la distribución de la variable estudiada (Emery, 2013).

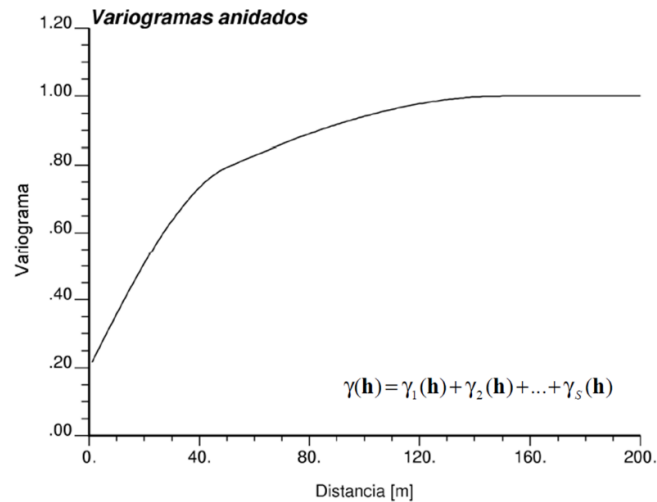


Figura 15: Variograma anidados, con su respectiva definición matemática (Emery, 2013).

### 3.2.3. Kriging

Es una técnica avanzada de interpolación espacial en el campo de la geoestadística. Se emplea para estimar valores desconocidos de una variable en ubicaciones no muestreadas a partir de datos observados en ubicaciones cercanas. Este método no solo considera la proximidad espacial de los datos, sino también la estructura de correlación espacial, la cual se describe mediante el variograma (Emery, 2013).

### 3.2.4. Kriging ordinario

El *kriging* ordinario consiste en la medición de la variable  $Z(x)$  en los puntos  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , de la zona de estudio, donde se tienen las realizaciones de  $Z(x_1), \dots, Z(x_n)$ , y se desea predecir  $Z(x_0)$  en un punto  $x_0$  donde no se tiene medición. El *kriging* ordinario propone que se puede predecir el valor mediante combinaciones lineales de  $n$  variables aleatorias, representadas por la siguiente fórmula (Emery, 2013):

$$Z^*(x_0) = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \dots + \lambda_n Z(x_n) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

Siendo  $\lambda_i$  el peso determinado por el valor muestreado, el cual se calcula mediante la distancia del punto conocido al punto donde se va a estimar la predicción. Para asegurar que el predictor tenga la misma esperanza que la variable original, es crucial que la suma de los pesos asignados sea igual a uno. Este requisito se conoce como la condición de insesgamiento, garantizando así que el estimador sea imparcial y no sesgado. Representado de la siguiente manera (Giraldo, 2002):

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

Si asumimos que el proceso es estacionario, con una media  $m$  (cuyo valor específico es desconocido), y aplicamos las propiedades del valor esperado, podemos deducir que la suma de las ponderaciones debe ser igual a uno (Giraldo, 2002):

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

$Z^*(x_0)$  se considera el predictor óptimo, ya que es un predictor lineal que utiliza pesos diseñados para minimizar la varianza del error de predicción (Giraldo, 2002).

### 3.2.5. Anamorfosis gaussiana

Corresponde a una técnica utilizada en geoestadística para mejorar la representación de datos espaciales en el mapa, donde su propósito principal es corregir la distorsión que se produce al representar fenómenos geográficos que tienen una distribución no uniforme en el espacio. La intención del proceso es modificar los datos de manera que, una vez transformados, adquieran una distribución gaussiana estándar con una media de 0 y una varianza de 1. En términos simples, la anamorfosis gaussiana ajusta la escala de los elementos del mapa de acuerdo con la distribución de los datos subyacentes, de modo que las áreas con mayor densidad de datos se representan de manera más prominente, mientras que las áreas con menos datos se representan de manera más atenuada (Emery, 2013).

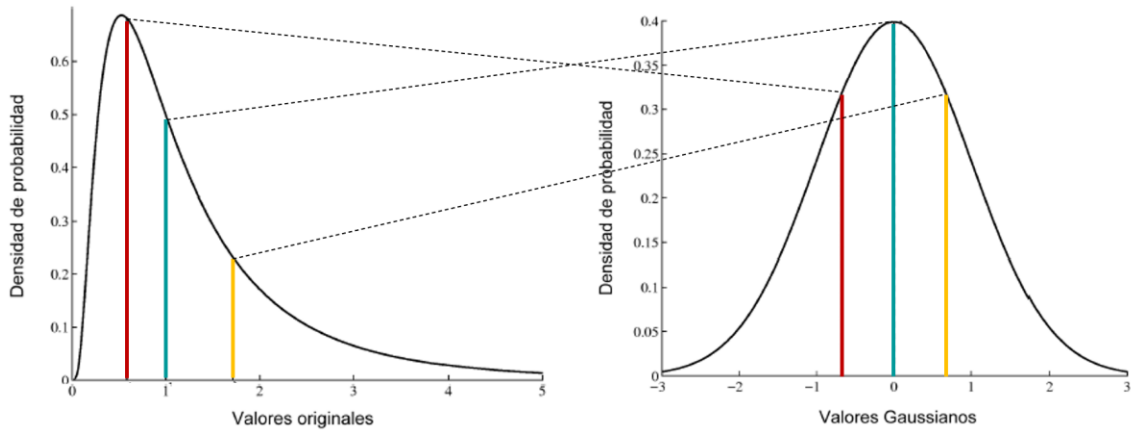


Figura 16: Construcción gráfica de la anamorfosis Gaussiana (Emery,2013).

Donde  $Z(x)$  es una función aleatoria que no presenta una distribución gaussiana, siendo  $Y(x)$  su transformación gaussiana, definida por la siguiente expresión (Emery, 2013):

$$Z(x) = \phi[Y(x)]$$

Con  $\phi = F^{-1}$  o  $G$  como la función de anamorfosis, y siendo  $F(z)$  y  $G(y)$  la función de distribución respectiva de  $Z(x)$ .

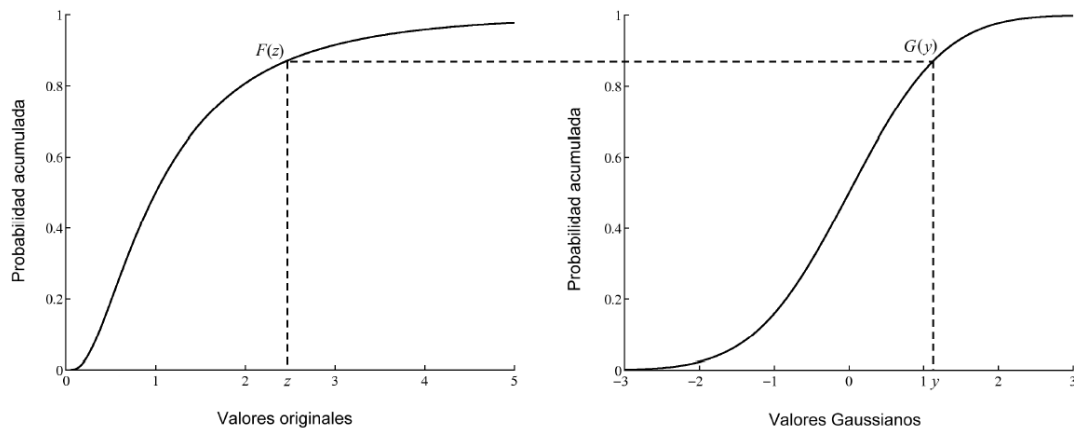


Figura 17: Construcción de la anamorfosis con ayuda de las funciones de distribución  $F$  (variable original) y  $G$  (variable Gaussiana) (Emery,2013).

### 3.2.6. Simulación secuencial gaussiana

La simulación secuencial gaussiana se establece como una herramienta fundamental en la geoestadística, aprovechando tanto los datos observados como el modelo de variograma para estimar los valores en ubicaciones no muestreadas. Este método se despliega de forma iterativa, generando valores en cada ubicación uno a la vez. Considera la información previamente simulada y las características de la correlación espacial definida

por el variograma. A través de la generación de múltiples realizaciones de un campo aleatorio continuo, bajo la suposición de una distribución gaussiana, se obtienen estimaciones coherentes que mantienen la correlación espacial entre los puntos de muestreo. Esto permite predecir los valores en ubicaciones no observadas con precisión en el espacio (Emery, 2012).

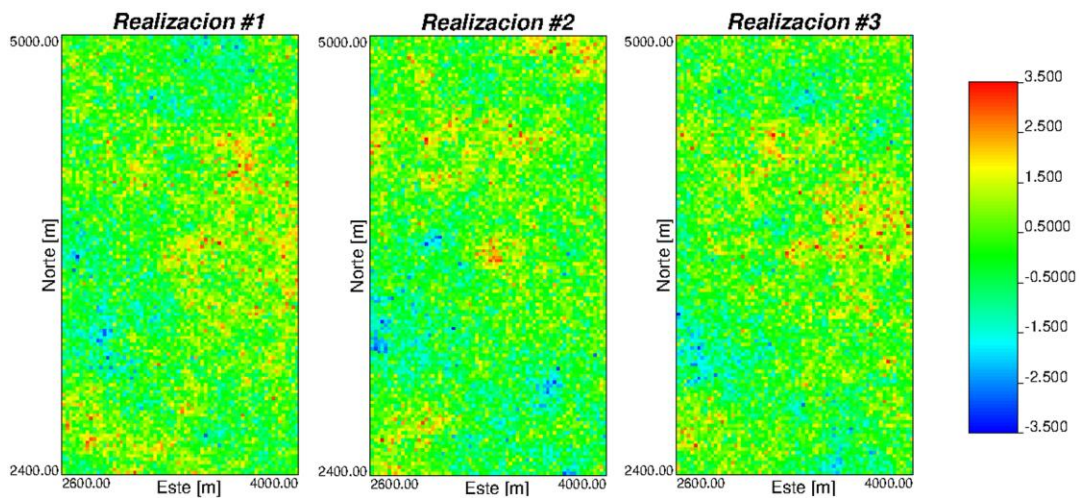


Figura 18: Realizaciones de campos aleatorios continuos.

Este método pertenece a una simulación condicional, ya que la generación de valores en ubicaciones no muestreadas se realiza en función de la información disponible en las ubicaciones muestreadas previamente. Cuando llevamos a cabo una simulación, nuestro objetivo es que refleje fielmente los valores observados en los sitios de muestreo  $\{x_a, a = 1 \dots n\}$ . En términos del modelo probabilístico, esto se logra mediante el condicionamiento, que implica construir una función aleatoria con una distribución espacial idéntica a la de  $Z(x)$ , mientras se asegura que los valores en los sitios donde se tienen datos sean conocidos y coincidan con las observaciones (Emery, 2012).

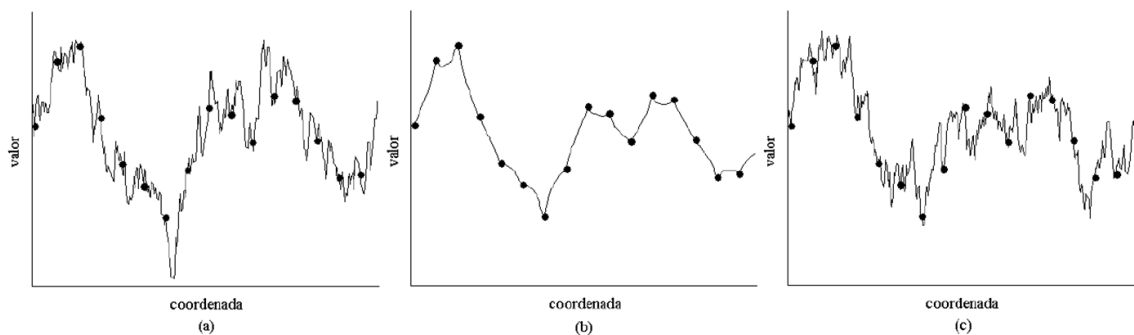


Figura 19: Comparación entre realidad (a), kriging (b) y simulación condicional (c) donde los datos condicionantes están indicados por círculos (Emery, 2012).

#### IV CAPITULO 4: METODOLOGIA

La base de datos proporcionada por la Superintendencia de Estudios Geomecánicos de la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD) de Chuquicamata ofrece información clave sobre los ensayos de carga puntual (PLT) realizados en la mina Chuquicamata, tanto en su área a rajo abierto como subterránea. En la que se identificaron cinco campañas de sondajes (SP5, SP6, SP7, SP8 y VPS) correspondiente a 500 perforaciones realizadas que representaban una totalidad de 31,852 datos de PLT en bruto, los cuales se tuvieron procesar y filtrar para la obtención de una base de datos más limpia de 25,264 datos.

La metodología para el modelamiento de bloque a través de un estudio geoestadístico se inició con un análisis exploratorio de datos (EDA) del índice de resistencia a la carga puntual corregida ( $I_{s50}$ ), obtenido de los ensayos de carga puntual. Se utilizaron herramientas como *Microsoft Excel* y *Minitab 20* para identificar patrones y tendencias a través de histogramas y diagramas de caja, lo que facilitó la selección de datos relevantes.

Posteriormente, los datos fueron transformados mediante compositación en *Maptek Vulcan 12* para garantizar su homogeneidad. El análisis variográfico se realizó con *WinGSLib 1.6.1*, modelando la estructura de correlación espacial a través de variogramas omnidireccionales y direccionales. Se aplicó *kriging* ordinario para interpolar valores desconocidos, minimizando la varianza y teniendo en cuenta la incertidumbre espacial.

Finalmente, se llevó a cabo una simulación secuencial gaussiana con 200 realizaciones, normalizando los datos mediante anamorfosis gaussiana y obteniendo un modelo promedio de la variable original. Este modelo fue ajustado al nivel 1 de producción e integró estructuras geológicas relevantes para su correlación con las alteraciones y mineralizaciones del yacimiento.

La metodología siguió un enfoque riguroso y sistemático dividido en cuatro fases, cada una con sus respectivas subetapas, las cuales se encuentran sintetizadas en el diagrama de flujo mostrado en la figura 20.

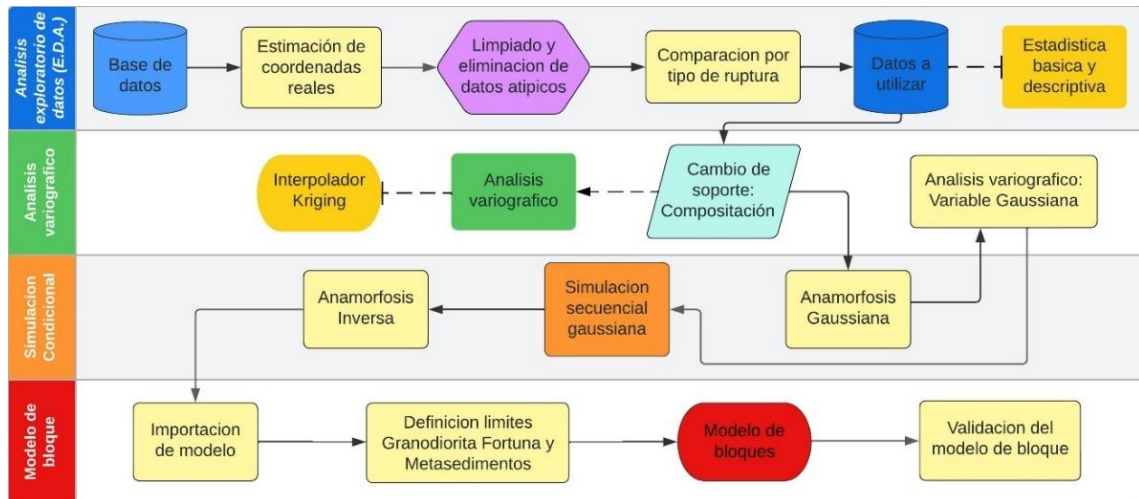


Figura 20: Diagrama de flujo de la metodología a utilizar para la obtención de un modelo de bloques geotécnico mediante análisis geoestadístico para Chuquicamata subterránea.

- **Análisis exploratorio de datos (E.D.A.):**

Este proceso conllevó a una revisión y preparación inicial de la base de datos de cinco campañas de sondajes, que incluyen 467 sondeos realizados (25,514 datos). Estos datos fueron revisados mediante los *softwares Microsoft Excel y Minitab 20* y posteriormente utilizando procesos geoestadísticos. Los cuales, incluyeron la detección y eliminación de datos atípicos mediante diagramas de caja y bigotes, basando la decisión en antecedentes recolectados de la empresa. Así se llegó a la consolidación de la base de datos final, la cual consto de 25,264 datos, que se utilizaron para los análisis de estadística descriptiva, realización de histogramas y pruebas de ajuste. El objetivo fue garantizar la precisión y consistencia de los datos, asegurando su idoneidad para interpretaciones precisas en el modelado geoestadístico. Además, se buscó identificar patrones y tendencias mediante análisis de deriva.

- **Revisión de la base de datos**

- a) **Exploración general de la base de datos**

Al examinar la base de datos, se identificaron posibles errores, como datos faltantes, valores por generar y otras inconsistencias. Durante este análisis, se notó que había un total de 28 sondajes sin información sobre la ubicación inicial o la trayectoria, y de estos, 5 mostraban una profundidad registrada como cero.

Tabla 1: Catastro de sondajes

	Nº
Sondajes	500
Sondaje sin Collar/Survey	28
Sondaje sin Profundidad	5
Sondajes Disponibles	467

### b) Filtrado y eliminado de datos atípicos

Tras asignar las UGTB, se seleccionaron las unidades pertinentes (QMeS, QIS, QMS, PES, PEK, PEC y MET) y se eliminaron datos fuera del rango volumétrico especificado (2.600E-4.100E, 2.400N-5000N y 940L-2220L). Se identificaron valores atípicos mediante análisis de *box-plot* para cada UGTB y se recortó la base de datos por su alta presencia. Se recopiló información histórica sobre la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), que proporciona resultados más confiables y está directamente relacionada con  $I_s50$  según la fórmula de Bieniawski (1972) ( $UCS = 23 * I_s50$ ).

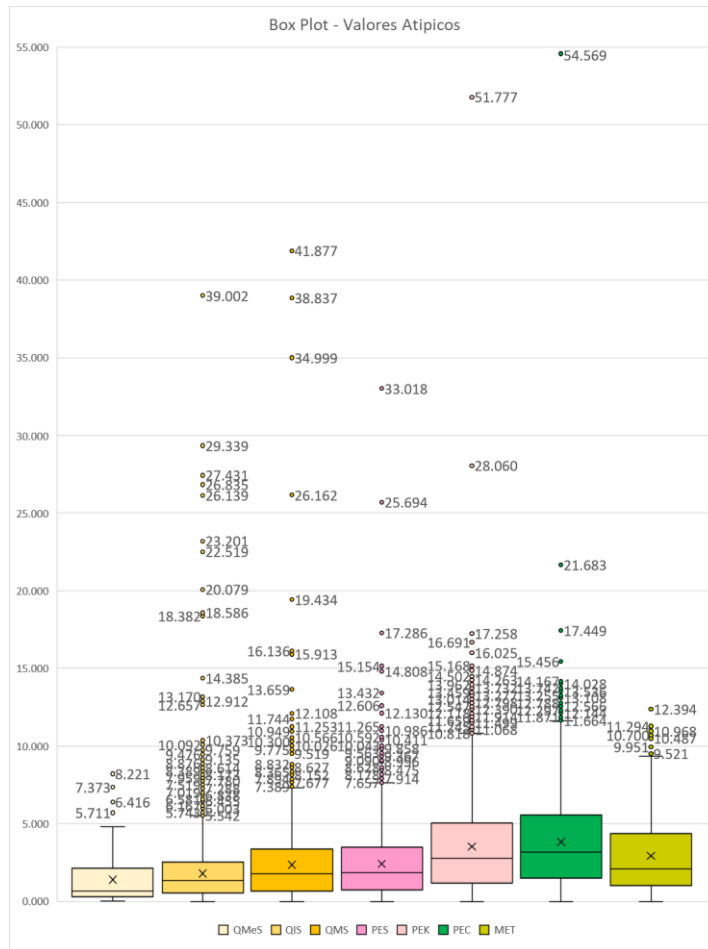


Figura 21: Box-plot de datos atípicos clasificado por U.G.T.B.

Tomando en cuenta los informes de caracterización geotécnica realizados en la mina de Chuquicamata: “Caracterización geotécnica estructural del proyecto Chuquicamata subterránea” (Codelco, 2009), se recolectaron los antecedentes de UCS máximo de 170 MPa (equivalente a 7.39 MPa en Is50) en la unidad PEK. Según el informe de “Propiedades de la Roca Intacta UGTB Macro Bloques Centrales N1-S1” (Superintendencia de Geotecnia, Codelco, 2016), se recolectaron los antecedentes UCS máximo de 96.5 MPa (equivalente a 4.2 MPa en Is50) en la unidad PEK; y en informe “Propiedades Geotécnicas de Roca Intacta UGTB Macro Bloque N4 al norte y S4-S5” (Superintendencia de planificación de la mina subterránea, Codelco, 2020), se recolectaron los antecedentes de UCS máximo de 102.2 MPa (equivalente a 4.44 MPa en Is50) en la unidad PEK.

Dado el gran número de datos superiores a 7.39 MPa provenientes de diversas unidades, sería contraproducente eliminar estos valores para los análisis geoestadísticos. En la base de datos proporcionada, la unidad PEC muestra los valores más altos de Is50, con un bigote máximo de 11.499 MPa según el *box-plot* generado. Basándose en estos datos y análisis preliminares, se decidió realizar un *clipping* eliminando el 1% de los datos con valores superiores a 11.5 MPa en Is50.

#### ➤ **Ubicación espacial de datos**

El área de estudio se ubica en el yacimiento Chuquicamata, segunda región de Antofagasta, al norte de la ciudad de Calama, donde Codelco, división Chuquicamata, trabaja con coordenadas locales, dejando el área delimitada por 2400N-5100N y 2500E-4500E.

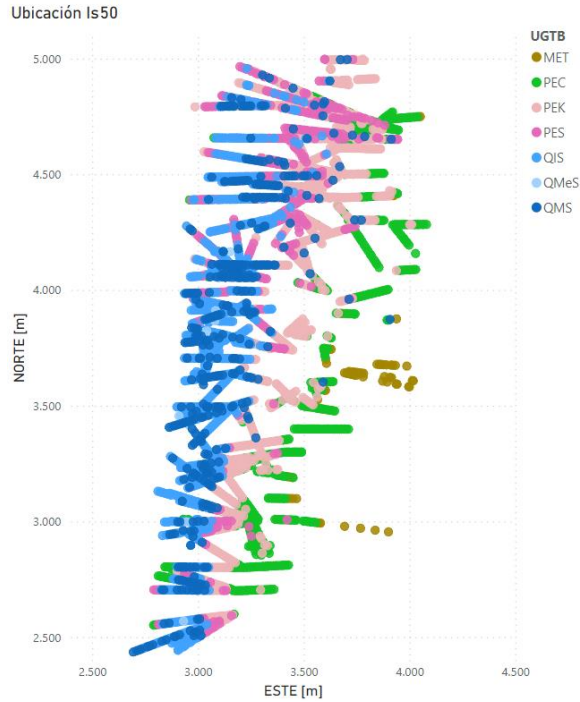


Figura 22: Distribución espacial de la base de datos, vista de planta, clasificados por U.G.T.B.

La formación del pórfido de Chuquicamata está estrechamente relacionada con la Falla Oeste, así como con las alteraciones y mineralización presentes en el yacimiento. Con el fin de tener una mejor comprensión del yacimiento, Codelco realiza la caracterización de las unidades geotécnicas básicas (UGTB), que consiste en unificar las unidades geológicas de alteración (UGA) con las unidades litológicas.

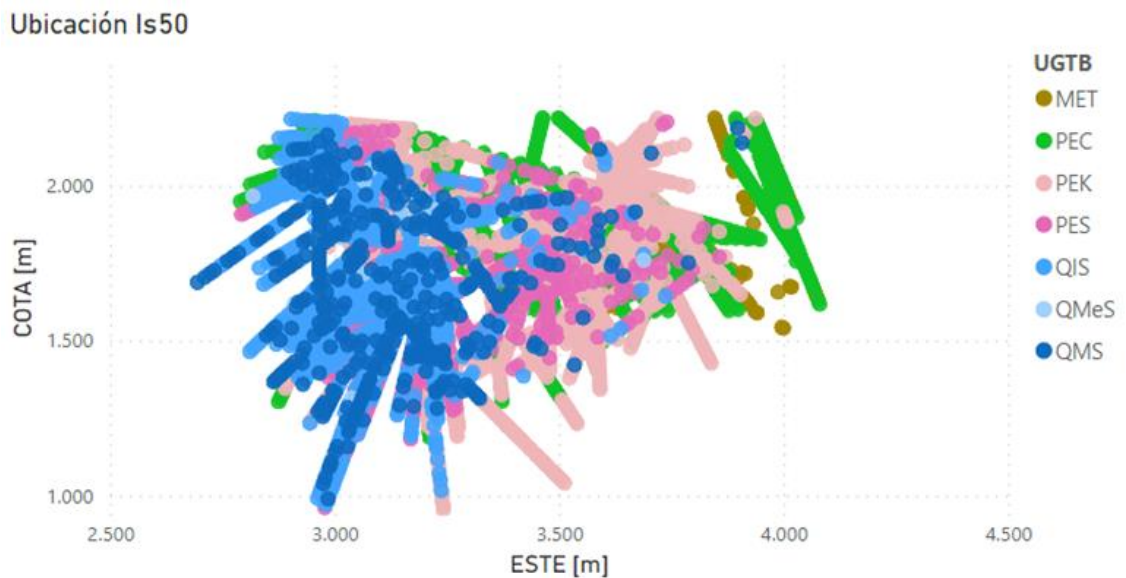


Figura 23: Distribución espacial de la base de datos, vista Cota v/s Este, clasificados por U.G.T.B.

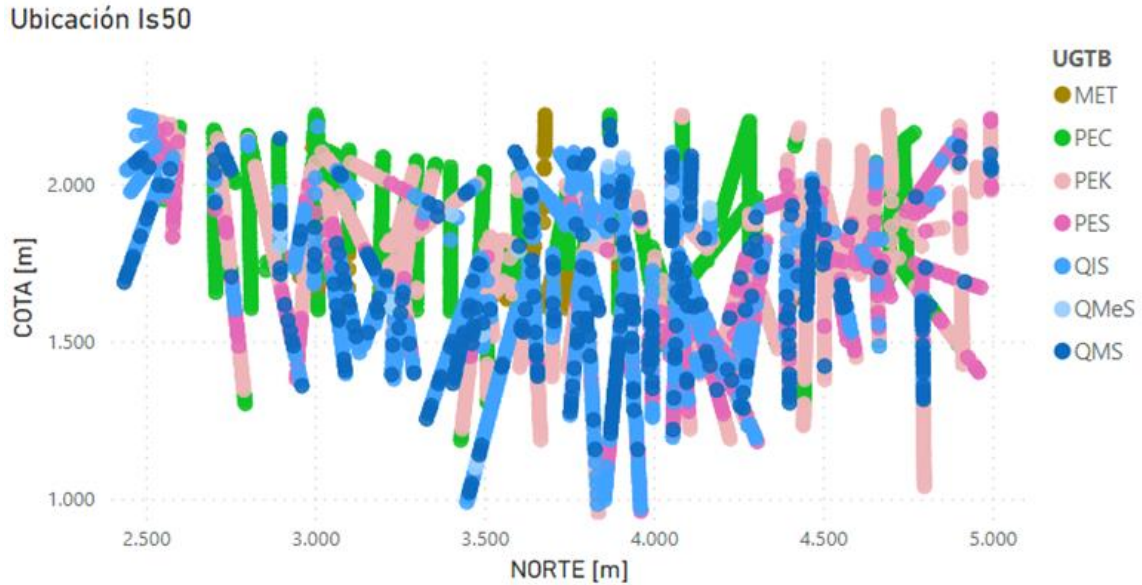


Figura 24: Distribución espacial de la base de datos, vista Cota v/s Norte, clasificados por U.G.T.B.

La mina Chuquicamata en general cuenta con 13 unidades geotécnicas básicas, de las cuales en el estudio se tomaron en cuenta 7 de ellas. Se puede observar en la disposición espacial de las UGTB que presentan una "zonación", dejando los Cuarzo-Sericita (QIS, QMS y QMeS) en la parte más oeste y cercana a la Falla Oeste; seguido hacia el este se encuentran el Pórfido Este Sericítico (PES) y el Pórfido Este Potásico (PEK); y más en la periferia este del yacimiento se encuentra el Pórfido Este Clorítico (PEC) y los Metasedimentos (MET).

- **Análisis variográfico:**

Para reducir la variabilidad de la muestra, se llevó a cabo un cambio de soporte mediante el método de compositación por pedio del *software Maptek Vulcan 12*. Este método consistió en combinar muestras individuales del depósito para crear una muestra compuesta (en este caso, ensayos PLT obtenidos mediante sondajes) que refleje con precisión las características del depósito en una ubicación específica. El objetivo principal de esta técnica fue reducir la variabilidad inherente en las muestras individuales, lo que permitió obtener muestras más homogéneas y de más fácil interpretación (4,422 datos).

El análisis variográfico consistió en identificar la estructura matemática que describiera la variabilidad espacial de la variable Is50 mediante el *software WinGSlab 1.6.1*. A través del análisis de variogramas experimentales (variogramas direccionales y omnidireccionales),

se determinaron los parámetros que caracterizan la correlación espacial entre las muestras. Este análisis fue crucial para estimar parámetros y modelar el comportamiento espacial de Is50, proporcionando información esencial para la toma de decisiones en el contexto geotécnico.

Posteriormente se utilizó específicamente el interpolador de *kriging* ordinario, el cual se caracteriza por asumir que la media del campo aleatorio es constante y desconocida. Además, presenta cualidades como proporcionar la mejor estimación lineal no sesgada de los valores desconocidos, minimizar el error de predicción y considerar la incertidumbre al proporcionar la estimación de la varianza junto con las estimaciones de los datos desconocidos.

Para llevar a cabo la interpolación, se optó por emplear el variograma modelo omnidireccional. Esta decisión se basó en la ausencia de una anisotropía espacial claramente definida; por ende, el modelo omnidireccional resultó el más idóneo para este caso. En este contexto, se definieron los parámetros indicados en la tabla 1.

Tabla 2: Parámetros utilizados para el interpolador por *kriging* ordinario.

Metodo: Kriging Ordinario				
Variograma:				
$\gamma(h) = 2.2Nug + 0.6sph(40) + 0.32sph(100) + 0.3sph(240) + 0.73sph(380)$				
Parametros del Kriging				
Min & Max para krigear un bloque		2	10	
	x	y	z	
Discretización por bloque		1	1	1
Radio de búsqueda		600	600	600
Rotación Angulo		0	0	0
Definición de grillas				
	Nº bloques	Min	Max	Tamaño
x	70	2600	4000	20
y	130	2400	5000	20
z	52	1180	2220	20

- **Simulación secuencial gaussiana:**

Para utilizar esta técnica, los datos deben presentar una distribución normal; por lo tanto, el compósito se transformó mediante una anamorfosis gaussiana (en *WinGSlib 1.6.1*), resultando en una variable con media de 0 y una desviación estándar que tendiera a 1,

respetando así la distribución normal. La simulación secuencial gaussiana se empleó para generar múltiples escenarios posibles de la variable aleatoria, condicionados a un método de estimación definido (en este caso, estimación por *kriging* ordinario) y a un modelo variográfico establecido. En este estudio, se llevaron a cabo 200 simulaciones mediante el *software WinGSlib 1.6.1* para representar la incertidumbre espacial de Is50. Esta metodología permitió explorar diferentes escenarios posibles del comportamiento de la variable dentro de un modelo geológico específico. En este contexto, se definieron los parámetros utilizados en la tabla 2.

Tabla 3: Parámetros utilizados para la simulación secuencial gaussiana.

Simulación Condicional: Simulación Secuencial Gaussiana				
Nº Simulación		200		
Metodo: Kriging Ordinario				
Variograma: $\gamma(h) = 0.54Nug + 0.15sph(100) + 0.1sph(180) + 0.13sph(380) + 0.08sph(900)$				
Opciones de búsqueda				
Nº de Max y Min dato por simulación		2	8	
	x	y	z	
Tamaño de la tabla de búsqueda de Covarianza	70	130	52	
Radio de búsqueda	910	910	910	
Rotación Angulo	0	0	0	
Definición de grillas				
	Nº bloques	Min	Max	Tamaño
x	70	2600	4000	20
y	130	2400	5000	20
z	52	1180	2220	20

- **Modelo de bloques:**

El modelo de bloques geotécnico simulado se importó a *Maptek Vulcan 12*, el cual consiste en una representación tridimensional del yacimiento Chuquicamata, con dimensiones de 1400 x 2600 x 1040 metros.

El modelo incluyó estimaciones en sectores donde se ubicaban las unidades de Granodiorita Fortuna y los Metasedimentos. Debido al método de simulación utilizado, cada estimación se fundamentó en datos calculados previamente de celdas adyacentes, lo que pudo resultar en la acumulación de errores significativos en áreas extensas del modelo.

Para mitigar este efecto, fue crucial delimitar de manera más precisa las áreas asignadas al Pórfido Este, excluyendo la influencia de la Granodiorita Fortuna y los Metasedimentos. Esta medida permitió reducir la influencia de las variaciones geológicas heterogéneas en las estimaciones, mejorando así la precisión y la coherencia de los resultados obtenidos mediante la simulación secuencial gaussiana.

Posteriormente se debió validar el modelo resultante mediante:

➤ **Validación visual de sondajes – perfiles:**

Este proceso implicó la comparación directa de los datos obtenidos de los sondajes con las interpolaciones y predicciones generadas por el modelo de bloques. El objetivo principal era determinar la concordancia entre las muestras reales y las simuladas en términos de distribución espacial y variabilidad.

➤ **Validación por coincidencia de estructuras:**

Este proceso implicó comparar detalladamente la distribución y características del modelo con las estructuras reales observadas, incluyendo las principales como la Falla Oeste, la Falla Americana y las trazas de la Falla Arsénico. Las coincidencias entre el modelo y la geología real reforzaron la confianza en la precisión del modelo, indicando una representación fiel de la distribución espacial y la configuración de las estructuras geológicas.

➤ **Consideración de la incertidumbre (varianza y desviación estándar):**

Este método permitió evaluar la variabilidad espacial del Is50, proporcionando una visión más completa de las posibles distribuciones dentro de los límites de incertidumbre definidos por los datos de entrada. Al considerar la incertidumbre de esta manera, se fortaleció la confianza en las predicciones del modelo de bloque, ya que se pudieron explorar diferentes escenarios y tomar decisiones informadas basadas en una evaluación robusta de las posibles configuraciones del yacimiento.

## V CAPITULO 5: RESULTADOS

### 4.1. Análisis exploratorio de datos (E.D.A.)

Se buscó analizar y visualizar el comportamiento de los datos del índice de resistencia a la carga puntual corregida (Is50), empleando técnicas de geostatística y el análisis exploratorio de datos. Este enfoque permitirá no solo identificar patrones y tendencias significativas, sino también detectar diversas irregularidades presentes en la base de datos, ofreciendo así una comprensión más profunda del fenómeno estudiado.

#### 4.1.1. Comportamiento de los datos

El análisis de deriva corresponde a un estudio espacial de la variable regionalizada para comprender de mejor manera el comportamiento de los datos a lo largo del área de estudio. En este caso, se observará el comportamiento del Is50 a lo largo de los tres ejes principales: este, norte y cota.

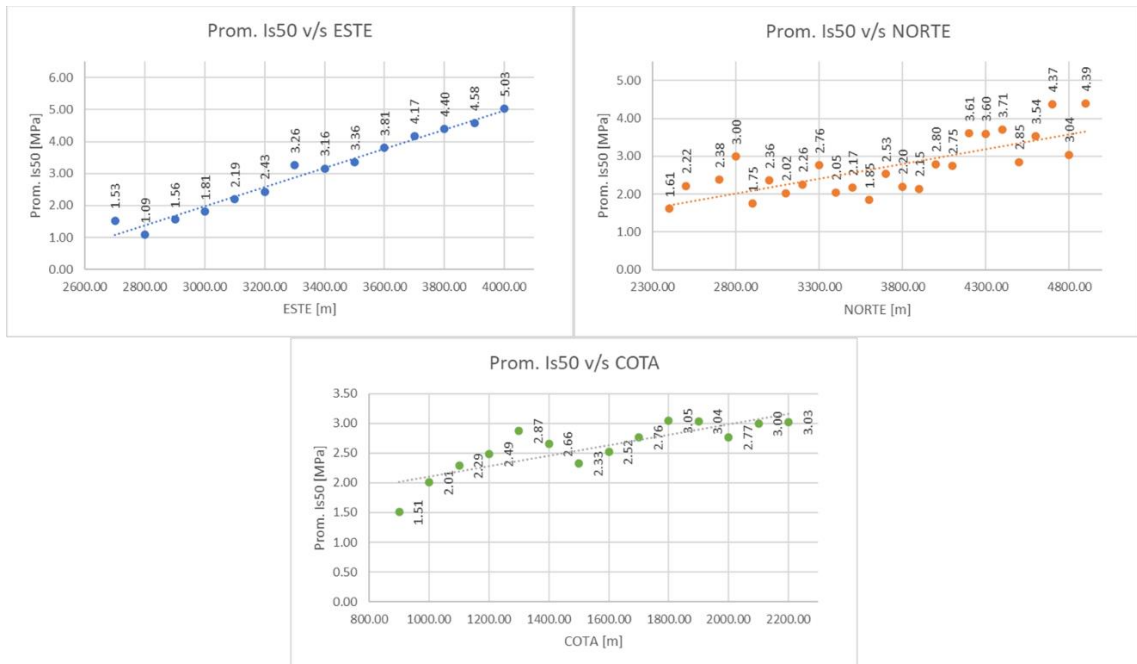


Figura 25: Análisis de deriva, Promedio Is50 v/s Este, Norte y Cota.

Al examinar el comportamiento del Is50 en las tres direcciones principales (figura 25), se observa una tendencia clara: la roca exhibe una mayor competencia hacia el este, evidenciada por incrementos en los valores de Prom. Is50. En la dirección de sur a norte, también se nota un aumento gradual en estos valores conforme se avanza hacia el norte.

En términos de elevación, se verifica una relación positiva donde las resistencias son mayores a cotas más altas.

#### 4.1.2. Estadística descriptiva

El análisis geoestadístico se dividió en estadística general, por campaña, por UGTB, y por inicio de ruptura. Para conocer mejor el comportamiento de las variables a lo largo del yacimiento Chuquicamata.

##### 4.1.2.1. Estadística descriptiva de la base de datos

Al analizar la estadística descriptiva de los 25,264 ensayos PLT (Is50), se puede observar en la tabla 4 una variabilidad en los datos que oscila entre 0.003 y 11.5 MPa. La medida central revela una media general de 2.77 MPa y una mediana de 2.12 MPa, la cual divide equitativamente el conjunto de datos. Destaca una moda de 2.35 MPa, que indica el valor más recurrente. Respecto a la dispersión, la desviación estándar se sitúa en 2.41, lo que revela cuán distantes están los datos de la media, mientras que la varianza registra 5.83, denotando una alta dispersión de los datos.

*Tabla 4: Estadística descriptiva general.*

<b>Estadística descriptiva General</b>	
Media	2.77
Mediana	2.12
Moda	2.35
Desviación estándar	2.41
Varianza de la muestra	5.83
Curtosis	0.95
Coficiente de asimetría	1.18
Mínimo	0.003
Máximo	11.50
Cuenta	25264

La distribución presente en la figura 26, exhibe una curtosis de 0.95, indicando una concentración de valores alrededor de la media y una curva leptocúrtica. Además, presenta una asimetría de 1.18, lo que sugiere una mayor cantidad de valores a la izquierda de la media, demostrando una asimetría positiva.

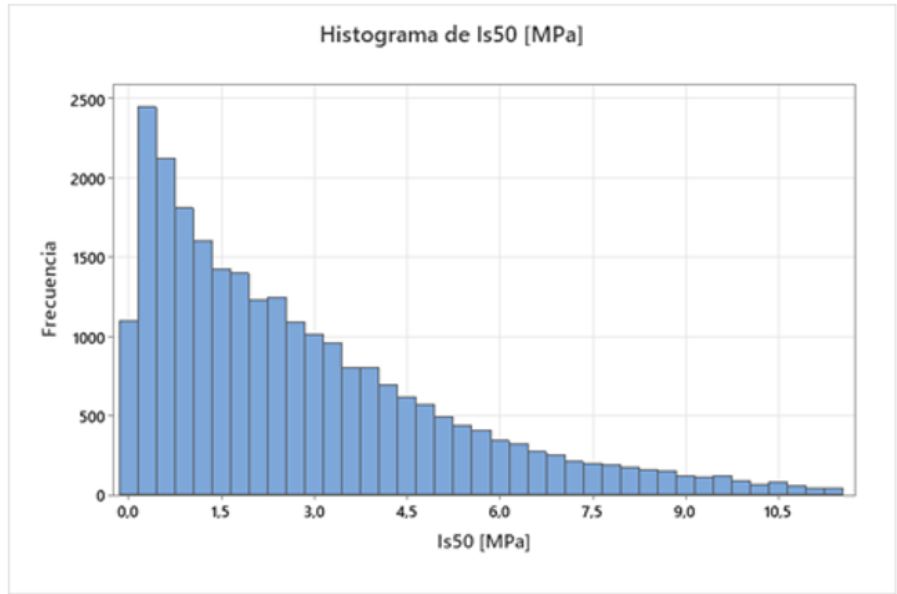


Figura 26: Histograma de los datos general.

Se llevaron a cabo pruebas de ajuste a distribuciones normal, lognormal, exponencial y Weibull (figura 27) para el conjunto de datos, encontrando que las últimas dos se ajustaban de manera óptima y eran las más reconocidas. Sin embargo, los resultados indicaron que la distribución del conjunto no se corresponde con ninguna distribución estadística definida.

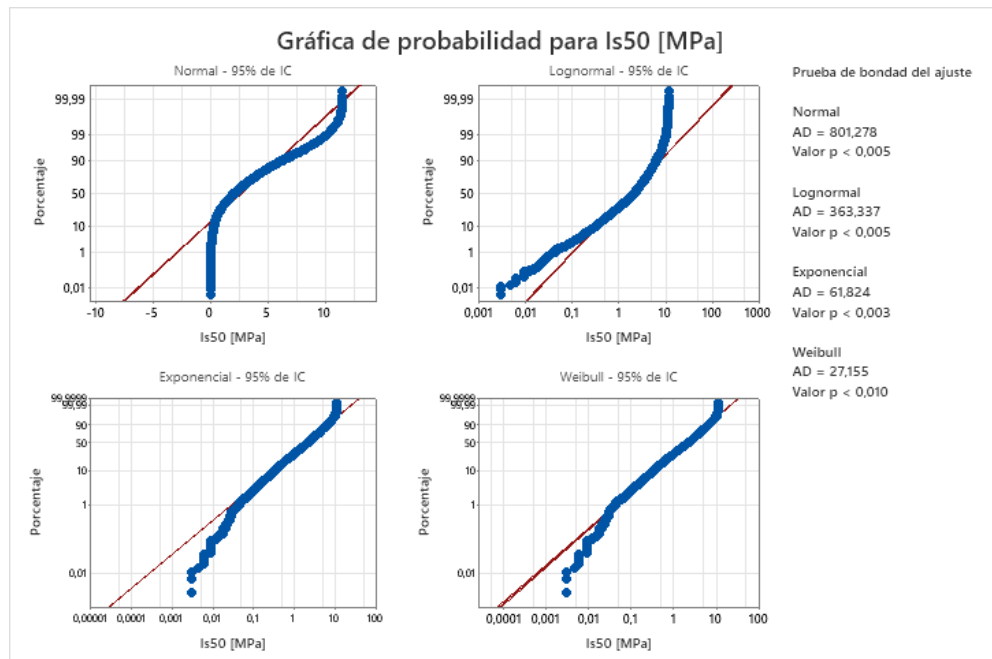


Figura 27: Prueba de ajuste de distribución para el total de la base de datos: distribución normal, log-normal, exponencial y weibull.

#### 4.1.2.2. Estadística descriptiva por campaña

Se llevó a cabo el análisis de los sondeos por campaña, revelando en la tabla 5 una consistencia en las medidas de posición central que variaban aproximadamente entre 1.99 hasta 2.40 en las campañas SP6, SP7, SP8 y VPS. Sin embargo, se observó que la campaña SP5 exhibía valores más elevados de resistencia, tanto en las medidas de posición central como en los rangos intercuartiles del diagrama de caja (figura 28). Esto se atribuye a que los sondeos realizados en esta campaña acumularon una cantidad significativa de datos asociados al Pórfido Este Clorítico, considerado como una de las UGTB con mayor resistencia.

Tabla 5: Estadística descriptiva y por campañas.

	General	SP5	SP6	SP7	SP8	VPS
Media	2.77	4.36	2.30	2.40	2.37	1.99
Mediana	2.12	3.89	1.91	2.17	1.63	1.48
Moda	2.35	2.35	1.88	1.49	0.15	1.13
Desviación estándar	2.41	2.61	1.38	1.40	2.28	1.79
Varianza de la muestra	5.83	6.81	1.91	1.97	5.18	3.22
Mínimo	0.003	0.005	0.344	0.184	0.003	0.006
Máximo	11.50	11.48	6.32	8.40	11.50	11.42
Cuenta	25264	6331	114	903	11452	6464

En la figura 28 se puede apreciar de mejor manera la distribución de los datos, separados por campañas. Se observa que la campaña SP5 presenta los valores más altos de Is50 en la base de datos.

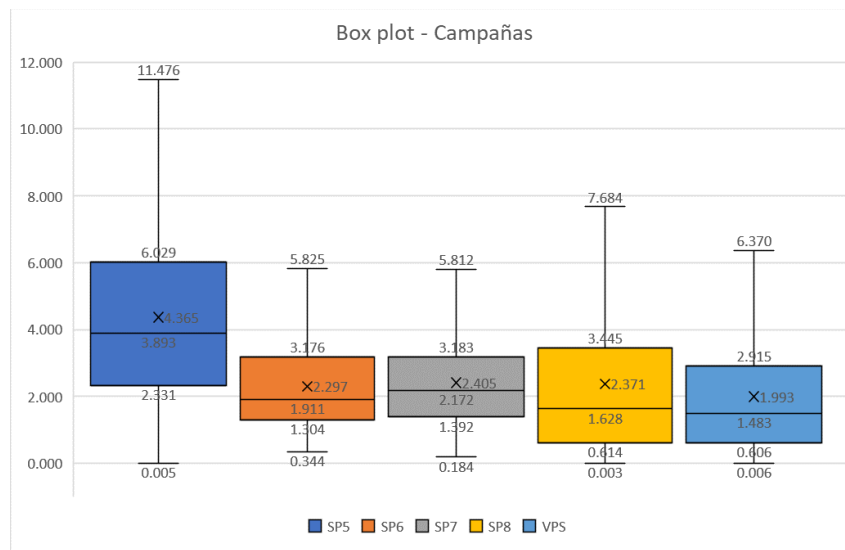


Figura 28: Box-plot por campañas realizadas.

### 4.1.2.3. Estadística descriptiva por UGTB

En este análisis, los datos de Is50 se agruparon por unidades geotécnicas básicas, para comprender mejor el comportamiento de la resistencia de la roca en cada unidad. En la tabla 6, se puede observar un incremento gradual en los valores de media y mediana al desplazarse de una unidad hacia el este, hasta llegar a los Metasedimentos. Esto tiene sentido, ya que esta unidad presenta una composición y características distintas a las de las otras seis unidades.

Tabla 6: Estadística descriptiva y por U.G.T.B.

Estadística Descriptiva	General	QMeS	QIS	QMS	PES	PEK	PEC	MET
Media	2.77	1.40	1.76	2.28	2.38	3.36	3.67	2.92
Mediana	2.12	0.67	1.32	1.79	1.86	2.73	3.12	2.10
Moda	2.35	#N/D	1.82	0.04	0.70	2.65	2.35	1.27
Desviación estándar	2.41	1.65	1.58	1.96	2.05	2.67	2.69	2.48
Varianza de la muestra	5.83	2.73	2.50	3.83	4.21	7.13	7.26	6.14
Mínimo	0.003	0.012	0.003	0.009	0.003	0.006	0.005	0.006
Máximo	11.50	8.22	10.37	11.40	11.45	11.50	11.48	11.29
Cuenta	25264	112	6010	2829	3317	7510	5045	441

Posteriormente, se realizó un diagrama de caja y bigotes (figura 29) con el propósito de ofrecer una visualización más clara de la distribución y de los patrones de las unidades, además de distinguir cómo se comportan los datos en cada una de ellas.

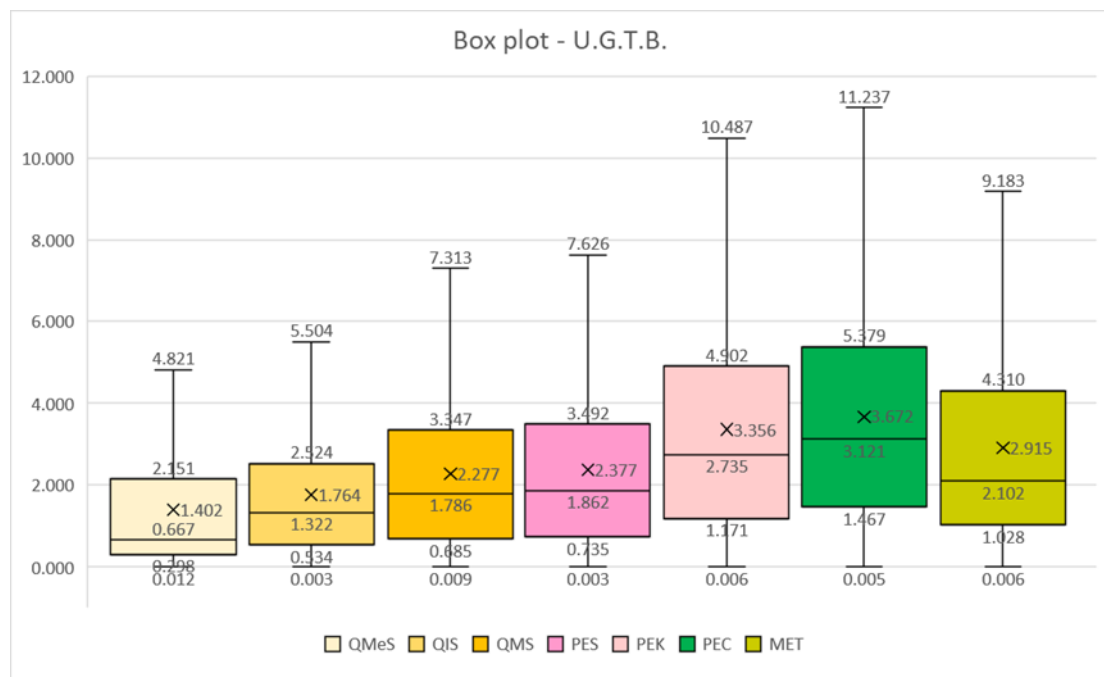


Figura 29: Box-plot por U.G.T.B.

La disposición de las UGTB en la figura 29 sigue el orden geográfico dentro del yacimiento, desde el oeste hacia el este. Se observa que las medidas de distribución central (media, mediana y moda), el rango intercuartil y el alcance de los bigotes superiores aumentan progresivamente de una UGTB a otra en dirección oeste-este, hasta llegar a la unidad Pórfido Este Clorítico, que presenta los valores de Is50 más altos. A continuación, en los Metasedimentos se nota una disminución general en la distribución de los valores debido a sus composición y características diferentes en comparación con las otras unidades estudiadas, que se relacionan con una composición porfídica. Por lo tanto, se decide excluir los datos pertenecientes a la unidad Metasedimentos de los siguientes análisis estadísticos.

#### 4.1.2.4. Estadística descriptiva por inicio de ruptura

Al comparar los conjuntos de datos, se observa en la tabla 7 que los datos de ruptura por matriz muestran valores más altos en la media, mediana, moda y valor máximo en comparación con los datos de ruptura por vetilla y mixta. Esta disparidad tiene sentido dado que las vetillas representan planos de debilidad, lo que implica una menor resistencia y, por ende, valores más bajos en las medidas mencionadas.

Tabla 7: Estadística descriptiva por tipo de ruptura.

	R. Matriz	R. Vetilla	R. Mixta
Media	3.02	1.04	1.69
Mediana	2.50	0.61	1.17
Moda	2.42	0.96	0.12
Desviación estándar	2.33	1.24	1.63
Varianza de la muestra	5.44	1.53	2.66
Mínimo	0.006	0.003	0.003
Máximo	11.50	10.78	10.70
Cuenta	8897	3113	5810

#### 4.1.3. Datos utilizados para el modelo de bloques

Se determinó utilizar los datos de Is50 clasificados por ruptura por matriz, debido a ser lo más similar al comportamiento de una roca intacta.

Tabla 8: Estadística descriptiva - Ruptura por Matriz.

Estadística descriptiva Is50 [MPa]	
Media	3.02
Mediana	2.50
Moda	2.42
Desviación estándar	2.33
Varianza de la muestra	5.44
Curtosis	0.82
Coficiente de asimetría	1.08
Mínimo	0.006
Máximo	11.50
Cuenta	8897

Al final, se han utilizado un total de 8,897 ensayos PLT (Is50). Se realizó una estadística descriptiva, que se presenta en la tabla 8, con valores que oscilan entre 0.006 y 11.5 MPa. La media aritmética de estos ensayos se sitúa en 3.02 MPa, mientras que la mediana se encuentra en 2.5 MPa, lo que indica que la mitad de los datos está por encima y la otra mitad por debajo de este valor. Asimismo, la moda es de 2.42 MPa, siendo el valor más frecuente en el conjunto de datos. En cuanto a la dispersión de los datos, la desviación estándar es de 2.33, lo que indica cuánto se alejan en promedio los valores de la media, y la varianza es de 5.44, lo que indica un grado de dispersión considerablemente alto. Por otra parte, en la figura 30 se puede ver como se comporta la dispersión de forma gráfica.

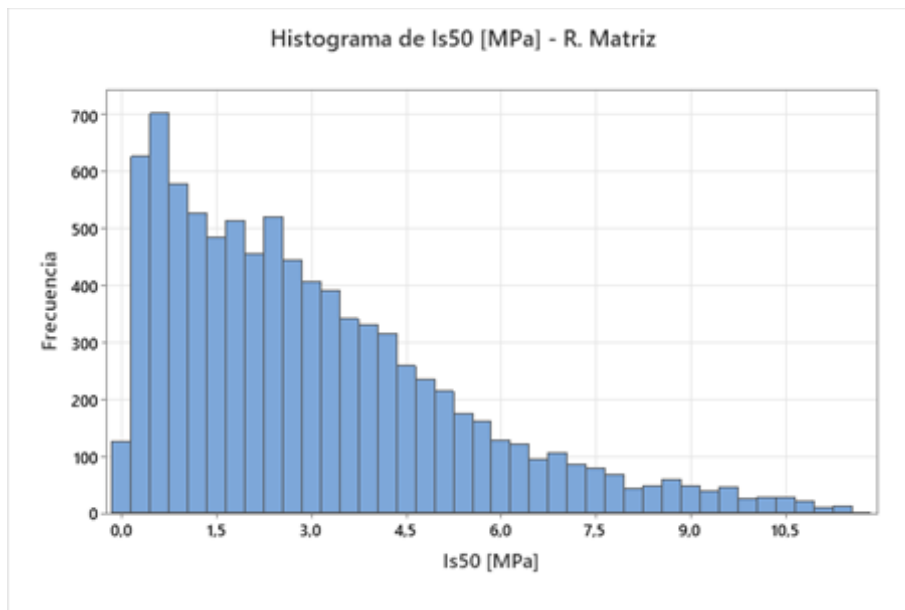


Figura 30: Histograma - Ruptura por Matriz

Se llevaron a cabo análisis de distribución normal, lognormal, exponencial y Weibull (figura 31) en el conjunto de datos para determinar cuál se ajustaba mejor y cuáles eran más apropiadas. Sin embargo, los resultados mostraron que la distribución del conjunto de datos no se corresponde con ninguna de las distribuciones estadísticas definidas, lo que sugiere una distribución atípica o poco común.

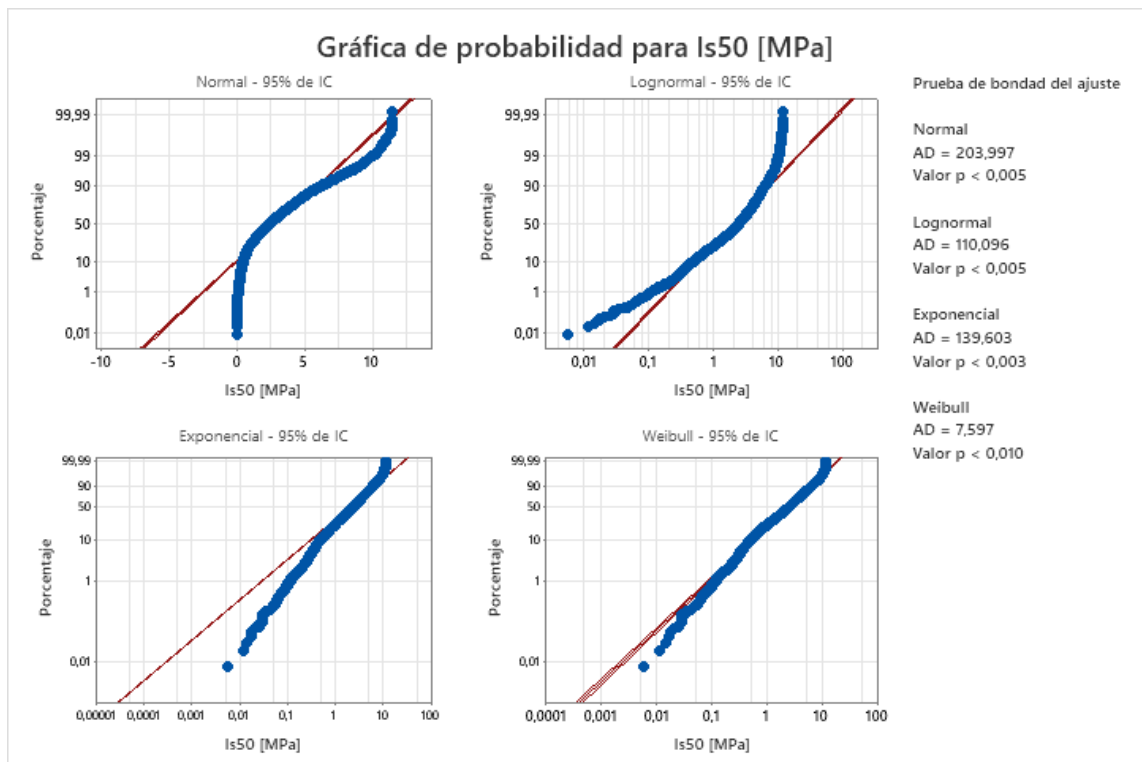


Figura 31: Prueba de ajuste de distribución para datos con Ruptura por Matriz: distribución normal, log-normal, exponencial y weibull.

#### 4.1.4. Cambio de soporte: composición

En este estudio, se decidió generar un composito cada 10 metros a lo largo de los sondajes. Esto resultó en la transformación de una base de datos inicial de 8,897 muestras a un composito más refinado, que consta de 4,422 muestras.

Tabla 9: Estadística descriptiva - Datos compositados

Est. desc. Is50 - Composito R. Matriz	
Media	3.11
Mediana	2.78
Moda	1.92
Desviación estándar	2.06
Varianza de la muestra	4.25
Curtosis	0.98
Coefficiente de asimetría	1.01
Mínimo	0.029
Máximo	11.43
Cuenta	4422

El conjunto de datos presente en la tabla 9 abarca un amplio rango, desde 0.029 hasta 11.43 MPa, con un total de 4,422 muestras. En la figura 32 destaca una clara tendencia central (línea roja), representada por una media de 3.11 MPa. La mediana (línea celeste), situada en 2.78, marca el punto de división entre las dos mitades del conjunto de datos. La moda (línea amarilla), que es 1.92 MPa, refleja su alta repetición en la base de datos.

En términos de dispersión, la varianza calculada es de 4.25, lo que proporciona una medida de cuánto difieren las muestras de la media, mientras que la desviación estándar de 2.06 MPa indica la distancia promedio de los valores respecto a la media. La distribución muestra una asimetría positiva, con un coeficiente de 1.01 y una curtosis leptocúrtica de 0.98, lo que sugiere una concentración de datos alrededor de la media y una mayor concentración de valores extremos en comparación con una distribución normal.

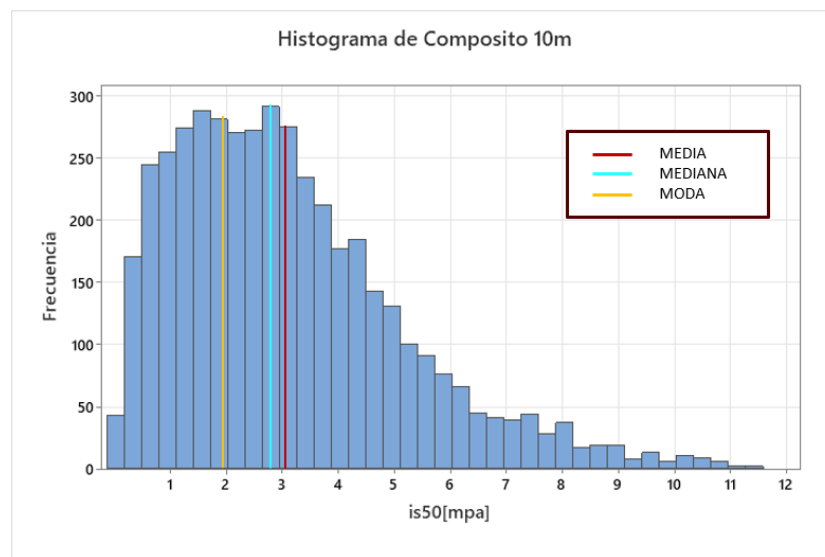


Figura 32: Histograma - Compósito de 10 metros. Junto a sus medidas de posición: Media (Rojo), Mediana (Celeste) y Moda (Amarillo).

Se llevó a cabo una prueba de ajuste en el composite generado para determinar si se ajusta a alguna distribución estadística. En la figura 33, se evaluaron las distribuciones más comunes (Normal, Log-Normal, Exponencial y Weibull), y aquella que mostró el "Valor P" más bajo, por debajo del intervalo de confianza de 0.05, indicó que el composite no sigue una distribución estadística definida.

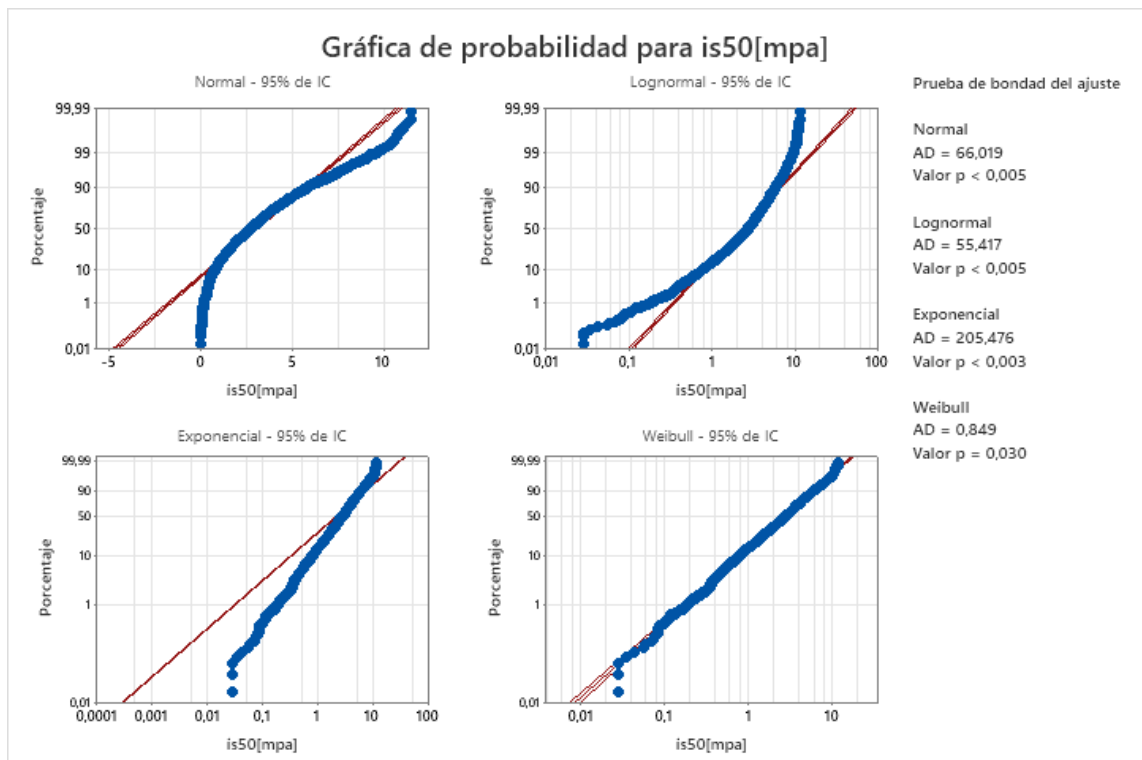


Figura 33: Prueba de ajuste de distribución para datos Compositados: distribución normal, log-normal, exponencial y weibull.

## 4.2. Análisis variográfico

A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante el análisis variográfico, el cual ha sido fundamental para comprender el comportamiento espacial de la variable regionalizada.

### 4.2.1. Mapa variografico

El mapa variográfico de la figura 34 permite tener una representación visual del comportamiento del variograma experimental en todas las direcciones, lo cual es fundamental para identificar la presencia de anisotropía y determinar si existe una dirección preferencial en la variabilidad espacial de la variable regionalizada.

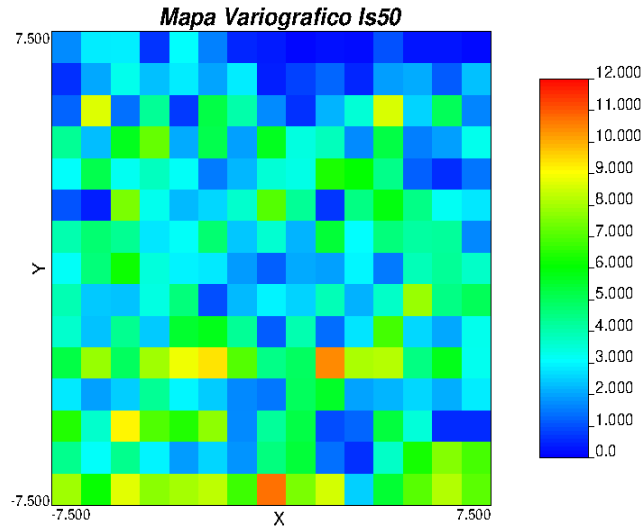


Figura 34: Mapa variografico de la variable regionalizada Is50

A través de esta herramienta, es posible analizar cómo varía la estructura de dependencia espacial de la variable estudiada. Desde una perspectiva inicial, al observar el mapa variográfico, se puede concluir que no se evidencia anisotropía, indicando que la variable no presenta una dirección dominante de variabilidad.

#### 4.2.2. Variograma experimental

Se generaron los variogramas experimentales del compuesto de Is50 utilizando los ejes principales norte-sur, oeste-este y vertical, así como el variograma omnidireccional, utilizando los siguientes parámetros:

Tabla 10: Parámetros utilizados en el ajuste de los variogramas direccional y omnidireccional.

Dirección	Nº Lag	Lag	Tol. Lag	Azimut	Tol. Azimut	Dip	Tol. Dip
Norte-Sur	25	20	10	0	20	0	20
Oeste-Este	25	20	10	90	20	0	20
Elevación	25	20	10	0	20	90	20
Omnidireccional	25	20	10	0	90	90	90

Observando la figura 35 simple vista, se puede determinar que en el variograma direccional, la dirección oeste-este (azul) refleja una mayor continuidad en comparación con las direcciones norte-sur y de elevación, las cuales muestran una tendencia más errática. Por otra parte, el variograma omnidireccional expresa la variabilidad promedio en todas las direcciones.

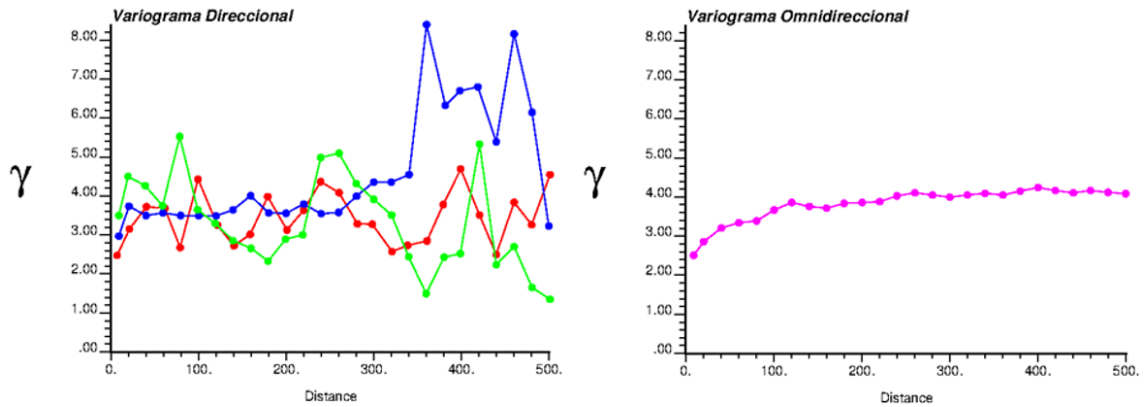


Figura 35: Variogramas direccional y omnidireccional.

### 4.2.3. Modelado del variograma

Posteriormente, se determinó el variograma modelo para los variogramas direccionales, con el fin de comprender de manera más precisa y cuantitativa la estructura de la variabilidad del fenómeno aleatorio a lo largo de las tres direcciones principales.

Tabla 11: Parámetros utilizados para el variograma modelo direccional.

Tipo Ajuste	Meseta	hMax	hMin	hVert
Nugget	2	0	0	0
Esferico	1.53	20	40	20
Esferico	0.19	$\infty$	40	20
Esferico	0.56	$\infty$	$\infty$	20

Después de ajustar el modelo al variograma direccional experimental, se estableció en la tabla 11 un modelo esférico para cada dirección, con un efecto *nugget* de 2. Este último aspecto señala la variabilidad en una escala más pequeña que la distancia mínima entre las muestras. Además, se identificaron los alcances óptimos de correlación espacial para las direcciones oeste-este y elevación, ambos de 20 metros, mientras que para la dirección norte-sur se fijó en 40 metros. Además, se notó un nivel máximo de variabilidad en las direcciones norte-sur, oeste-este y elevación de 3.72, 3.53 y 4.28, respectivamente. Al no encontrarse diferencias significativas en los rangos entre las tres direcciones principales y en la variabilidad, se concluyó que el variograma es isotrópico, lo que indica que no hay una dirección preferencial de variación.

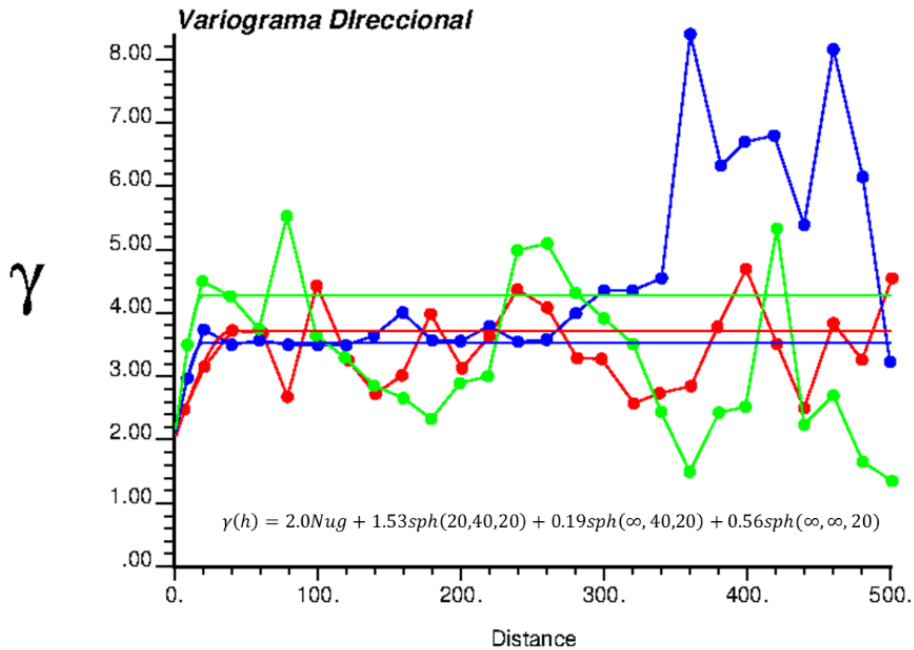


Figura 36: Variograma direccional y modelo matemático.

De la misma manera, se procede a calcular el modelo para el variograma omnidireccional, con el fin de comprender mejor la variabilidad promedio de todas las direcciones posibles.

Tabla 12: Parámetros utilizados para el variograma modelo omnidireccional.

Tipo Ajuste	Meseta	Alcance
Nugget	2.2	0
Esferico	0.6	40
Esferico	0.32	100
Esferico	0.3	240
Esferico	0.73	380

Mediante el proceso de ajuste del modelo al variograma omnidireccional, se logró identificar en la tabla 12 cuatro modelos esféricos que capturan la estructura de correlación espacial del compuesto. Estos modelos se caracterizan por un efecto *nugget* de 2.2, que refleja la variabilidad a una escala más fina que la distancia mínima entre muestras. Además, se determinó un alcance óptimo de correlación espacial de 380 metros, que representa la distancia a la cual la correlación entre los valores de la variable de interés deja de ser significativa. La presencia de una meseta con un valor de 4.28 en los variogramas sugiere la existencia de una variabilidad máxima en las distancias más allá del alcance óptimo.

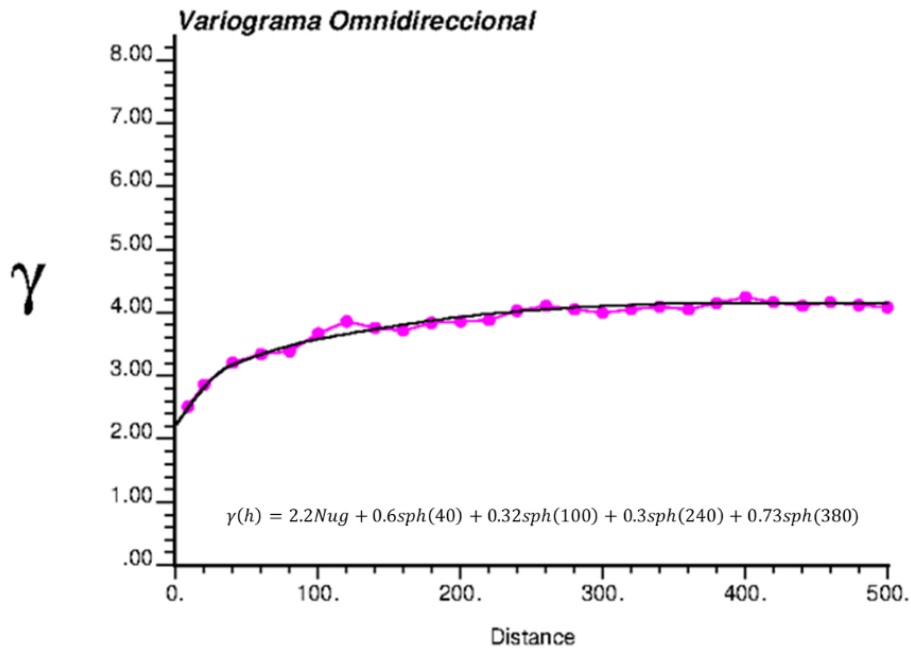


Figura 37: Variograma omnidireccional y modelo matemático.

### 4.3. Estimación de kriging

Utilizando los parámetros descritos en la tabla 12, se generó un modelo de bloque mediante el *software* de modelación geoestadística *WinGSLib*. El resultado se puede observar en la figura 38, que fue un modelo con dimensiones de 1400 x 2600 x 1280 metros, el cual se empleó como hipótesis de comparación en la simulación secuencial gaussiana realizada posteriormente.

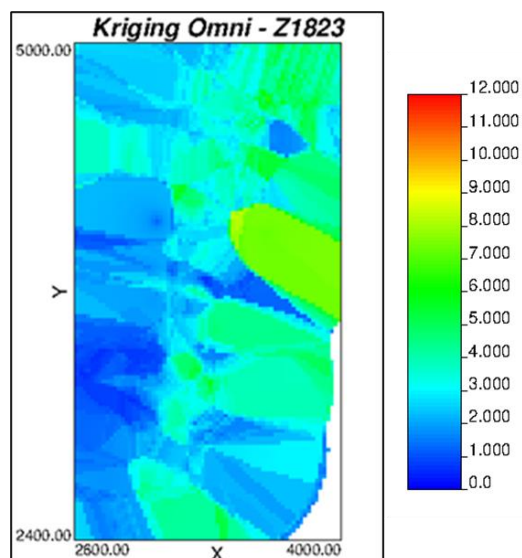


Figura 38: Estimación resultante de la interpolación por kriging ordinario acotado a nivel 1 de producción (Cota 1823).

Se observa una mayor resistencia de la roca al este del yacimiento Chuquicamata en áreas que presentan tonalidades verdes, mientras que hacia el oeste se identifica una menor resistencia, evidenciada por tonos azules. La figura 39.a proporciona una representación visual clara de esta variación en la resistencia. En las zonas con tonos más azulados (unidades QMS, QIS y QMeS) hacia el oeste, se muestra una menor resistencia, mientras que, hacia el este en colores verde-amarillo (unidades PES, PEK y PEK), se observan valores más altos de resistencia.

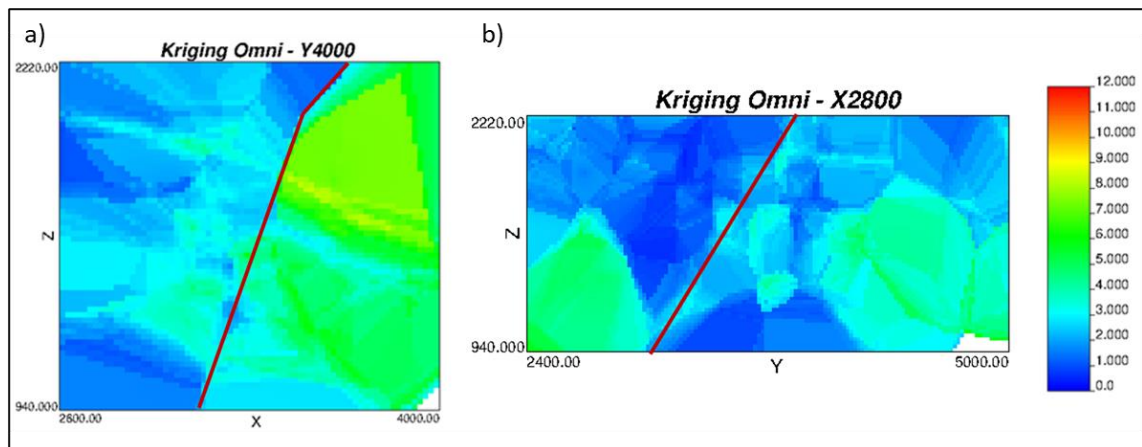


Figura 39: Estimación resultante de la interpolación por kriging ordinario: a) Sección Cota v/s Este (Y4000) y b) Cota v/s Norte (X2800). Presentando cambios significativos de resistencia (Línea roja).

#### 4.4. Simulación secuencial gaussiana

Se llevaron a cabo simulaciones secuenciales gaussianas para generar múltiples escenarios de un campo aleatorio con distribución normal gaussiana. Este método, de tipo condicional, permitió generar valores simulados de manera ordenada, uno a uno, utilizando una función de correlación espacial diferida. Los resultados aseguran que cada valor simulado se ajuste adecuadamente a los valores muestreados y a la estructura de correlación espacial observada.

##### 4.4.1. Anamorfosis gaussiana

La base de datos compositada, que inicialmente presentaba un campo aleatorio no gaussiano, fue transformada mediante una anamorfosis gaussiana (figura 40). Esto permitió obtener la variable normalizada, cumpliendo así con la condición de presentar una distribución normal.

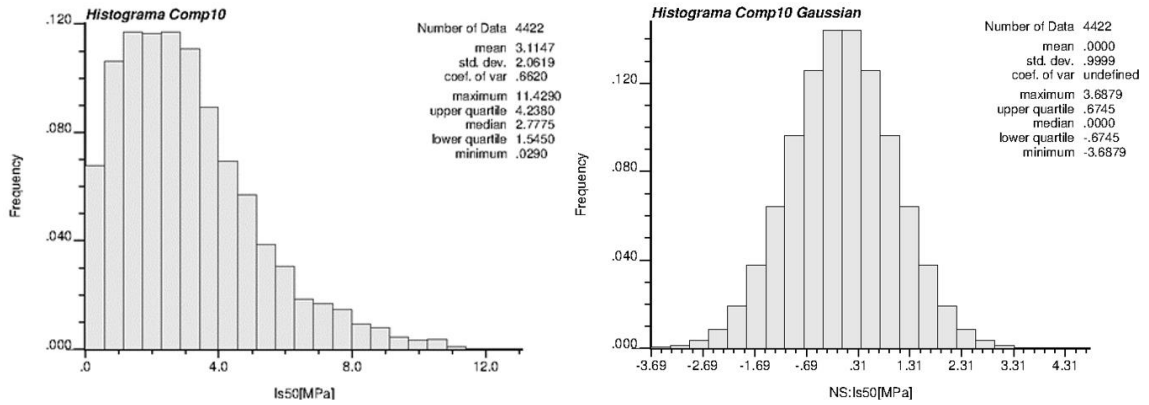


Figura 40: Histogramas de datos compositados (Distribución no definida) y datos normalizados (Distribución normal).

Posteriormente, se obtuvo una variable normalizada compuesta por 4422 datos, con un rango que variaba de -3.69 a 3.69 y una media que coincidía con la mediana, tendiendo a cero, además de una varianza que tiende a 1. Con estas últimas especificaciones, inicialmente se pudo asumir que presentaba una distribución gaussiana. Para verificar que realmente correspondía a una distribución normal, se llevó a cabo la prueba de normalidad de Anderson-Darling utilizando el software Minitab, la cual se encuentra representada en la figura 41. Donde se obtuvo un "Valor P" de 1, que superaba el intervalo de confianza de 0.05, confirmando la hipótesis de una distribución normal.

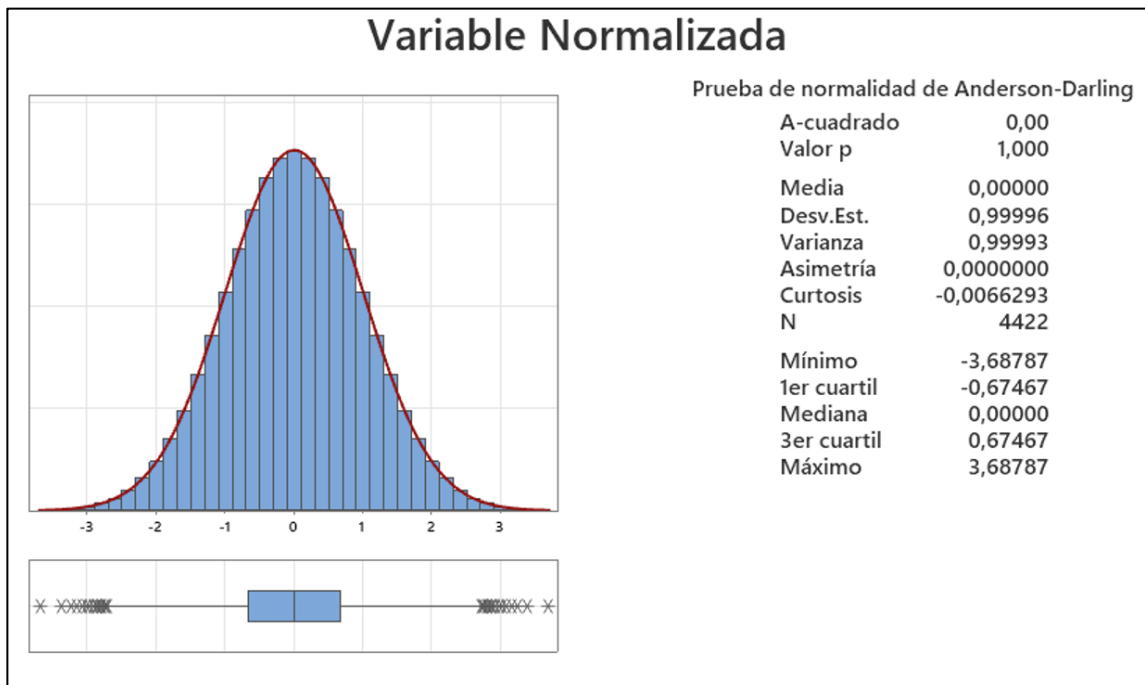


Figura 41: Prueba de normalidad de Anderson-Darling para datos transformados.

#### 4.4.2. Variograma de la variable normalizada

Se realizó nuevamente un análisis variográfico, a diferencia de que en este caso se confeccionó para identificar la correlación espacial de la variable normalizada y obtener el variograma modelo que se utilizará para la simulación. Para ello, se utilizaron las siguientes configuraciones presente en la tabla 13 para ajustar los variogramas direccional y omnidireccional.

Tabla 13: Parámetros utilizados en el ajuste de los variogramas direccional y omnidireccional - Variable normalizada.

Dirección	Nº Lag	Lag	Tol. Lag	Azimut	Tol. Azimut	Dip	Tol. Dip
Norte-Sur	13	30	15	0	20	0	20
Oeste-Este	13	30	15	90	20	0	20
Elevación	13	30	15	0	20	90	20
Omnidireccional	50	30	15	0	90	90	90

En la figura 42 se puede observar la representación de ambos variogramas. Con respecto al variograma direccional, se puede determinar que en los datos comienzan a volverse erráticos a una distancia aproximada de 90 metros, con ellos indicando el rango de influencia que tiene una muestra con respecto a otra. Siendo la dirección oeste-este (azul) el variograma más estable en comparación con los otros dos ejes principales (norte-sur en rojo y elevación en verde). Por otro lado, el variograma omnidireccional se mantiene más estable hasta una distancia aproximada de 1000 metros, presentando un rango de influencia mucho más amplia.

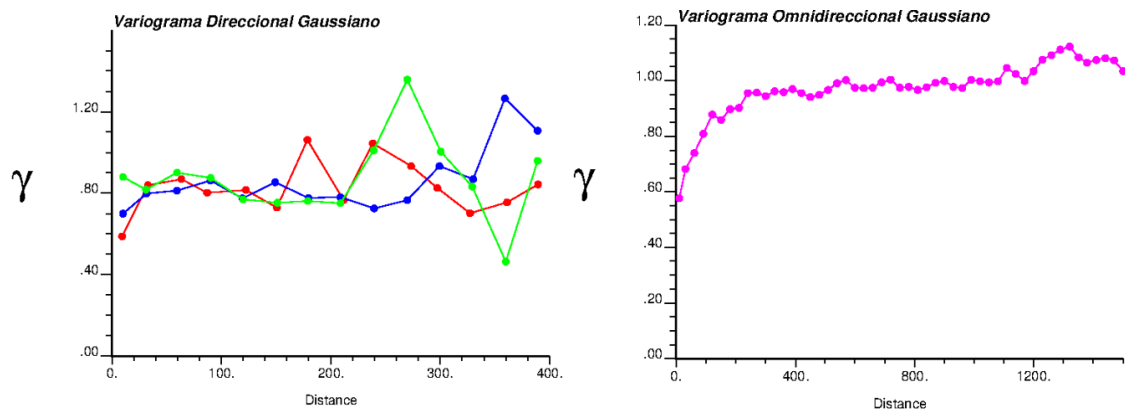


Figura 42: Variogramas direccional y omnidireccional - Variable normalizada.

Posteriormente, se procedió a ajustar un variograma modelo para los variogramas direccional y omnidireccional gaussianos. En este proceso, se definieron los siguientes parámetros para el variograma modelo direccional:

Tabla 14: Parámetros utilizados para el variograma modelo direccional - Variable normalizada.

Tipo Ajuste	Meseta	hMax	hMin	hVert
Nugget	0.45	0	0	0
Esferico	0.36	30	40	60
Esferico	0.03	$\infty$	40	60
Esferico	0.06	$\infty$	$\infty$	60

En la tabla 14, se estableció un modelo de variograma anidado con configuración esférica para las tres direcciones principales, junto con un efecto *nugget* de 0.45 para reflejar la variabilidad a una escala más pequeña que la distancia mínima entre las muestras. Esto permitió identificar los alcances óptimos de correlación espacial para las direcciones oeste-este, norte-sur y elevación, siendo de 30, 40 y 60 metros respectivamente. Asimismo, se determinaron los niveles máximos de variabilidad para las direcciones oeste-este (0.36), norte-sur (0.03) y elevación (0.06). Dado que las diferencias observadas en la figura 43, expone que los rangos entre las tres direcciones principales de alcances máximos y la variabilidad no son significativas, se concluye que el variograma es isotrópico, lo que indica la ausencia de una dirección preferencial de variación.

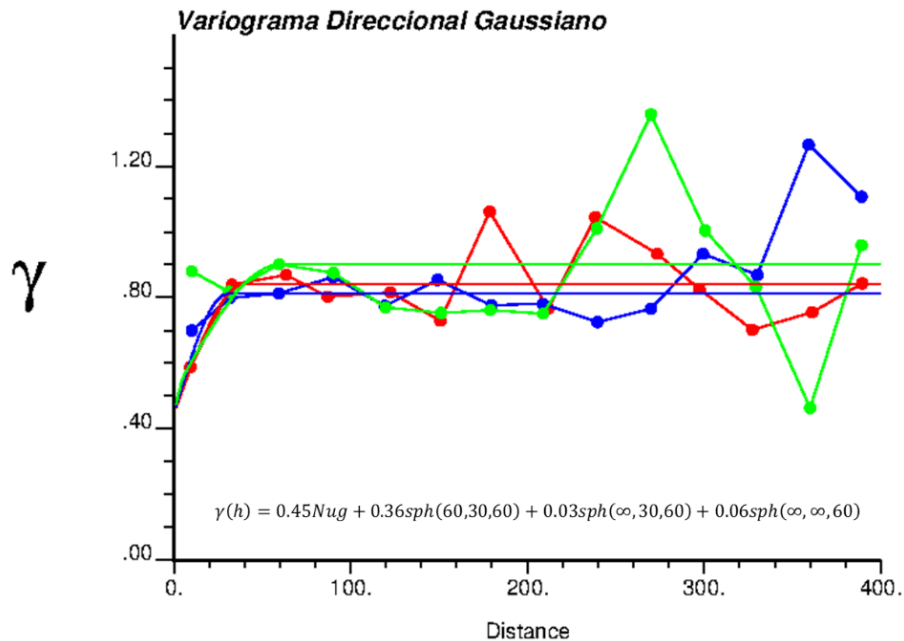


Figura 43: Variograma direccional y modelo matemático - Variable normalizada.

La tabla 15 representa la configuración del modelo ajustado al variograma omnidireccional gaussiano.

Tabla 15: Parámetros utilizados para el variograma modelo omnidireccional - Variable normalizada

Tipo Ajuste	Meseta	Alcance
Nugget	0.54	0
Esferico	0.15	100
Esferico	0.1	180
Esferico	0.13	380
Esferico	0.08	900

Se procede a la estimación del variograma modelo anidado con un *nugget* de 0.54, el cual se ajusta empleando cuatro configuraciones esféricas distintas (figura 44). Estas configuraciones representan la variabilidad espacial de la variable normalizada y se caracterizan por un alcance definido de 900 metros, que indica la distancia a la cual la correlación espacial entre las muestras deja de ser significativa. Además, se identifica una meseta de valor 1 en el variograma, lo que sugiere una estabilización de la variabilidad a distancias mayores al alcance.

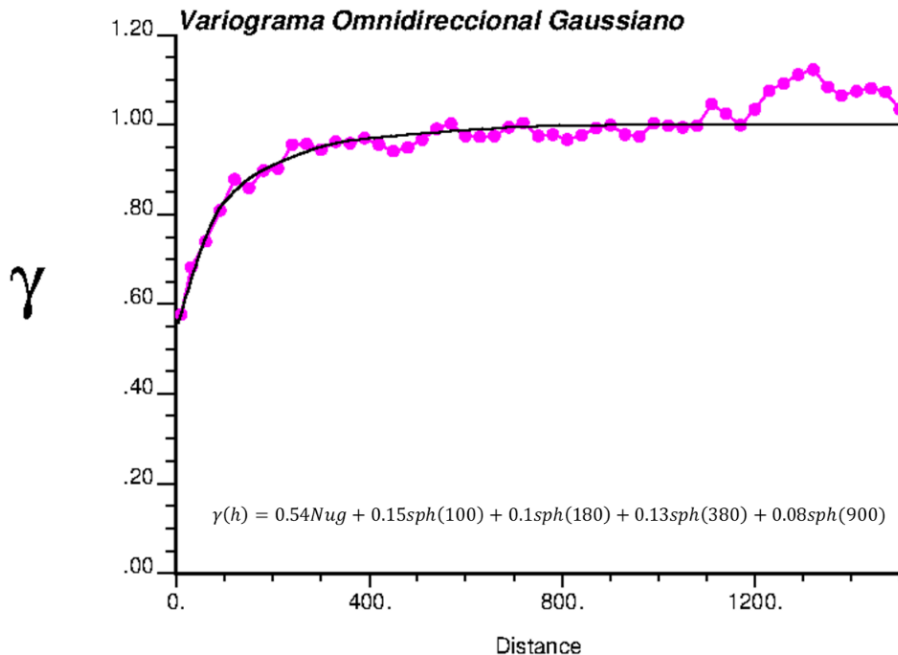


Figura 44: Variograma omnidireccional y modelo matemático - Variable normalizada.

#### 4.4.3. Simulación

Utilizando los parámetros descritos en la tabla 15. Donde la función aleatoria generada mediante interpolación exhibe características consistentes, incluyendo la misma distribución y continuidad espacial definida por el variograma modelo definido.

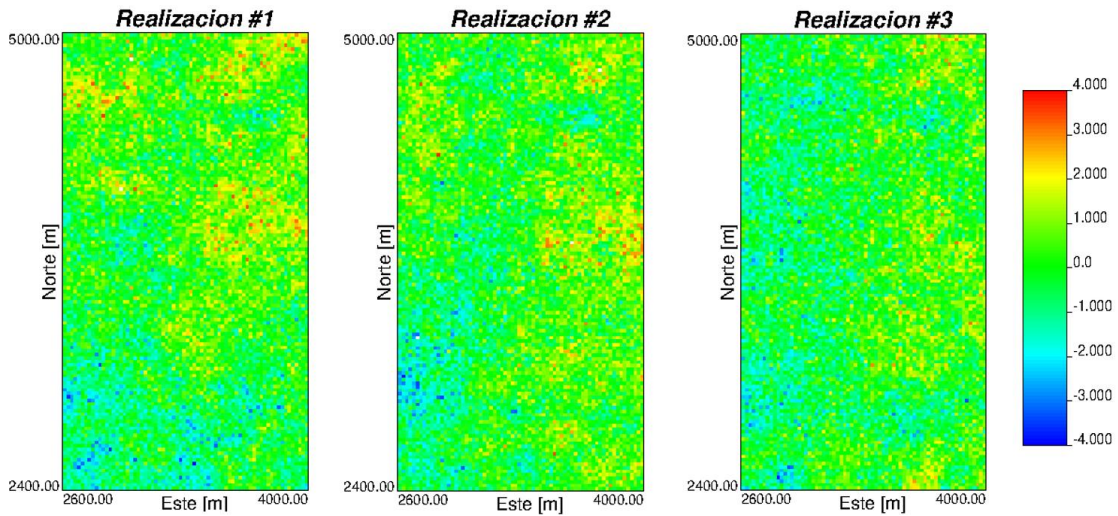


Figura 45: Tres de las doscientas simulaciones realizadas.

Posteriormente, utilizando la función “*Processing of Multiple Realizations*” perteneciente a *WinGSlib* se realizó un promedio local de las 200 realizaciones para obtener una simulación promediada, proporcionando una estimación de la tendencia central del campo aleatorio (figura 46). Además de entregar una medida de la incertidumbre asociada a la predicción del campo aleatorio en cada celda.

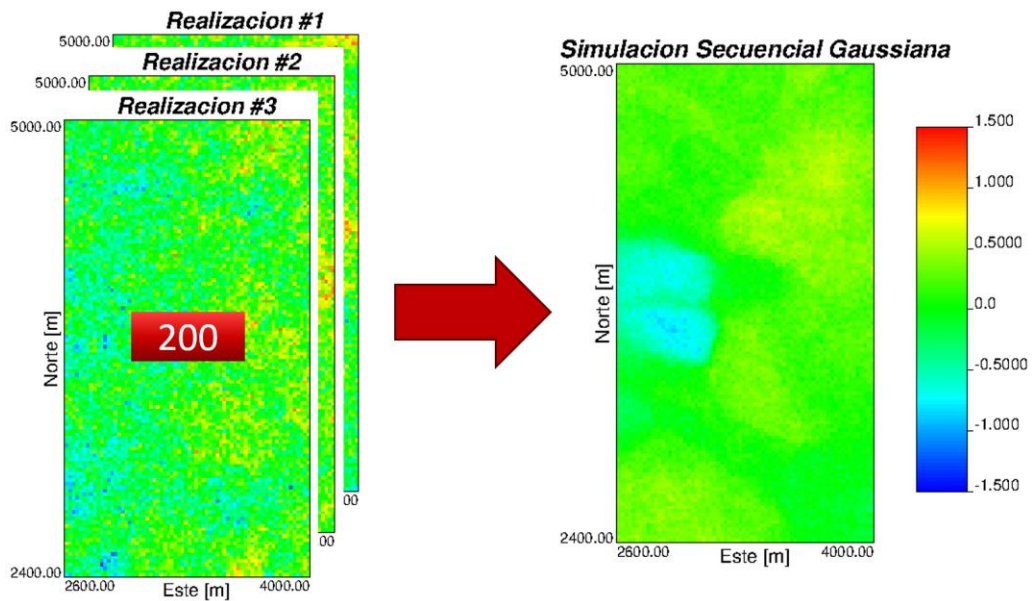


Figura 46: Promediación de las doscientas simulaciones realizadas, obteniendo una simulación final promediada.

#### 4.4.3.1. Anamorfosis gaussiana inversa

La simulación resultante fue generada a partir de la variable normalizada, la cual fue convertida a la variable original mediante una anamorfosis gaussiana inversa (figura 47). Obteniendo un modelo estimado de la predicción del campo aleatorio de la variable original (Is50).

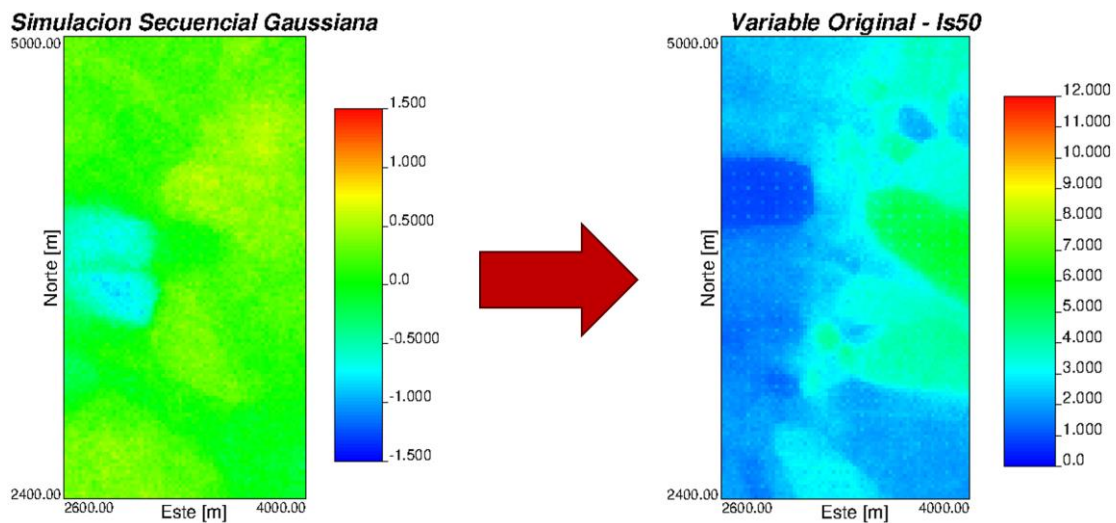


Figura 47: Simulación final promediada sometida a una anamorfosis inversa, para volver a la variable original.

#### 4.5. Modelo de bloques

Finalmente se cargó en *Maptek Vulcan 12*, el modelo de bloque de los valores de Is50 obtenidos mediante la simulación, la cual comprende un modelo de dimensiones 1400 x 2600 x 1040 metros (tabla 16), junto a sus respectivos valores de Is50, varianza y desviación estándar (figura 48).

Tabla 16: Dimensiones del modelo de bloque.

Dirección	Min	Max	Largo	Nº bloques
Eje x	2600E	4000E	1400 m.	70
Eje y	2400N	5000N	2600 m.	130
Eje z	1180L	2220L	1040 m.	52

Por inspección visual de la figura 48, se indica que el modelo presenta zonas horizontales con valores excepcionalmente altos en los modelos de varianza y desviación estándar. En este método, cada estimación se basa en datos previamente calculados de celdas adyacentes, lo que puede llevar a acumular errores significativos en áreas extensas del modelo.

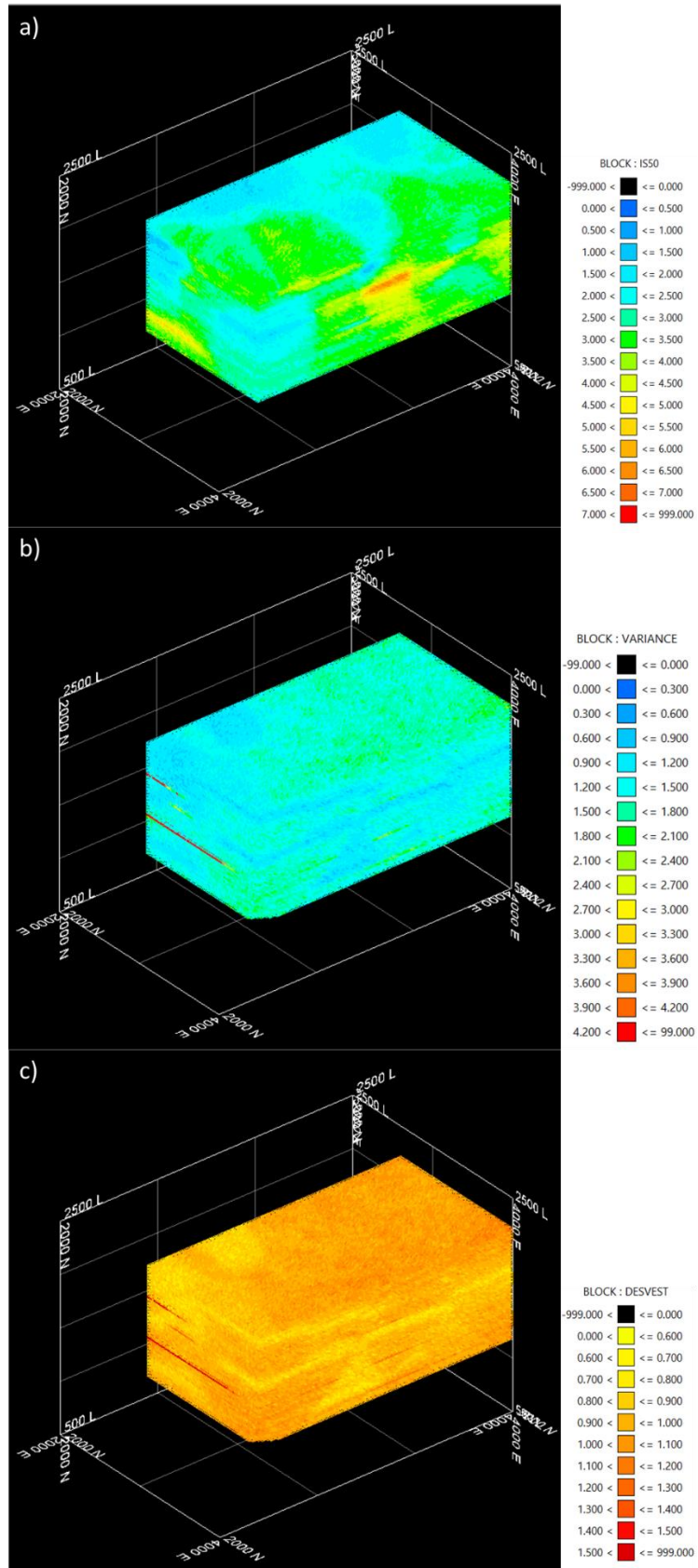


Figura 48: Modelo de bloque 3D, de las variables a) Is50, b) Varianza y c) Desviación estándar.

En el contexto específico de este estudio, los valores elevados se concentran en áreas donde el modelo abarca tanto la Granodiorita Fortuna y los Metasedimentos – Granodiorita Elena Sur. La inclusión de estas unidades geológicas diversas introduce una variabilidad considerable en las propiedades estimadas, contribuyendo así al incremento de la varianza y la desviación estándar en el modelo (figura 49).

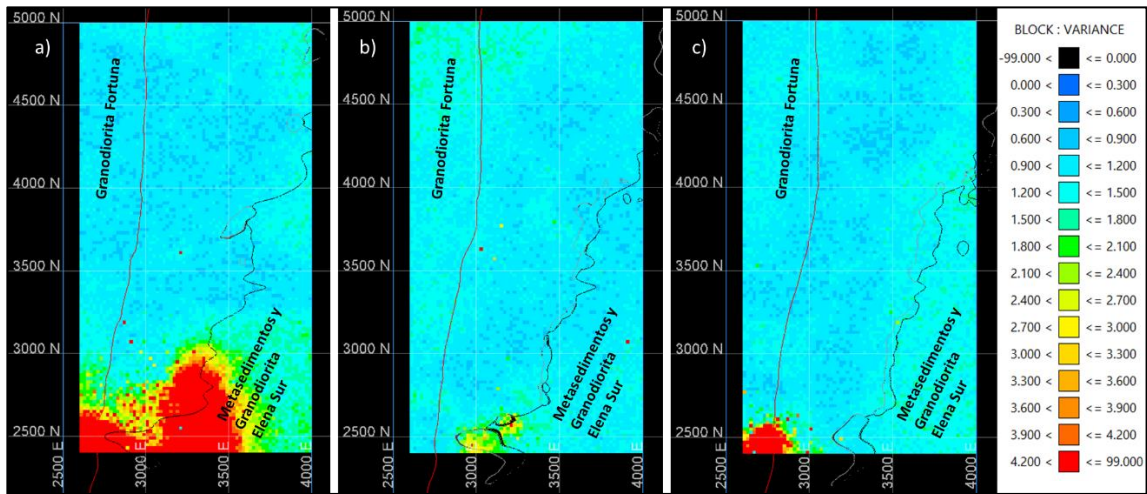


Figura 49: Modelo de bloque de la varianza asociada: cota a) 1540, b) 1780, y c) 1920.

#### 4.5.1. Definición de límites del Pórfido Chuquicamata

Debido que se necesita modelar solamente el pórfido, se procedió a interceptar los sólidos de la Falla Oeste dejando a la Granodiorita Fortuna a su extremo oeste, y los sólidos de los Metasedimentos-Granodiorita Elena Sur. Para luego realizar el proceso de *flag* e identificar los cuerpos no relevantes dentro del modelo y centrarse solo en el Pórfido Chuquicamata (figura 50).

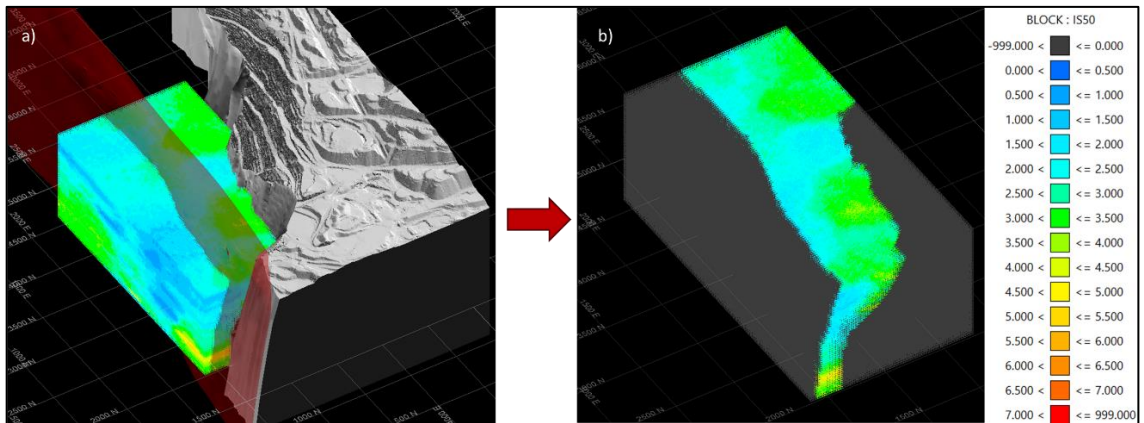


Figura 50: Proceso para acotar modelo solamente al Pórfido Este. a) Modelo de bloque junto la Falla Oeste y triangulación de Metasedimentos-Granodiorita Elena Sur; y b) modelo final.

#### 4.5.2. Validación de modelo

- **Validación visual de sondajes – perfiles:**

Se observó que las secciones transversales seleccionadas (cota: 1620, 1760 y 1960) mostraron una clara coincidencia entre los sondajes que atravesaban estas secciones y las celdas correspondientes del modelo de bloque. Esto indica que el modelo de bloque desarrollado respeta de manera precisa y consistente las muestras reales. La visualización de la figura 51 reveló que las muestras de sondajes se alinearon correctamente con las predicciones del modelo.

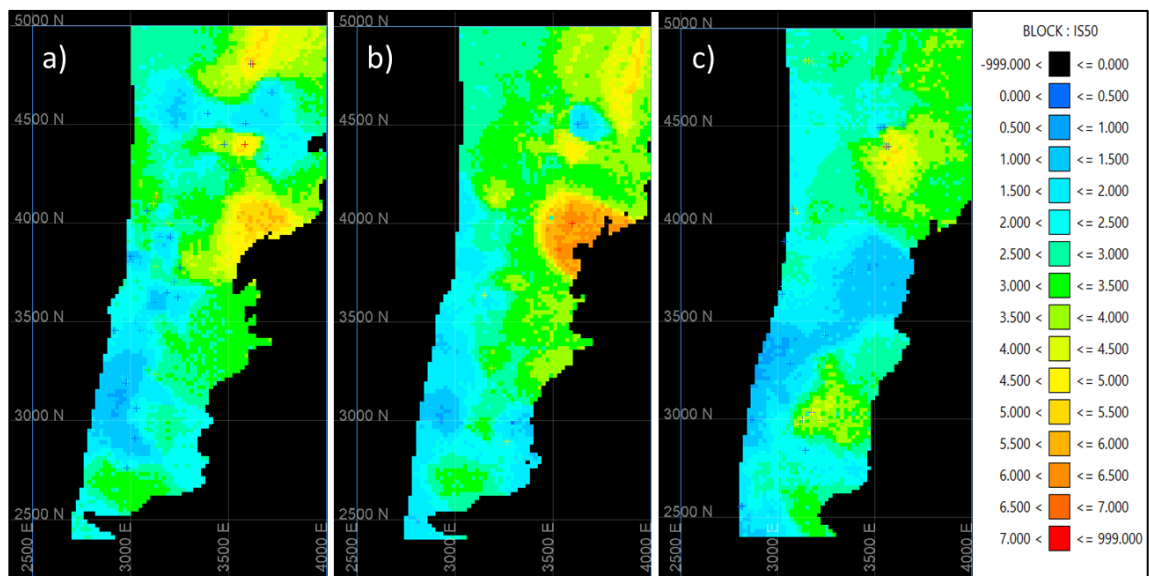


Figura 51: Planos XY con sondajes compositados. Plano cota: a) 1620Z; b) 1760Z; y c) 1960Z.

- **Validación por coincidencia de estructuras:**

El modelo de bloque mostrado en la figura 52(a) exhibe una notable correspondencia con la estructura geológica de la Falla Americana, evidenciando un cambio significativo en la resistencia del macizo rocoso. Al oeste de la falla, se observan valores menores de Is50, mientras que al este se registran valores más altos, lo cual se puede corroborar con mayor detalle en las figuras 53(a), (b), y (c), las cuales muestran cortes transversales en las posiciones de 3000N, 3260N y 3860N, respectivamente. Estos cortes transversales reflejan claramente el contraste generado por la Falla Americana. Por otro lado, en la figura 52(b), se aprecia que las trazas de la Falla Arsénico también coinciden con el

modelo generado, provocando variaciones en la resistencia del macizo rocoso, con valores mayores al norte y menores al sur.

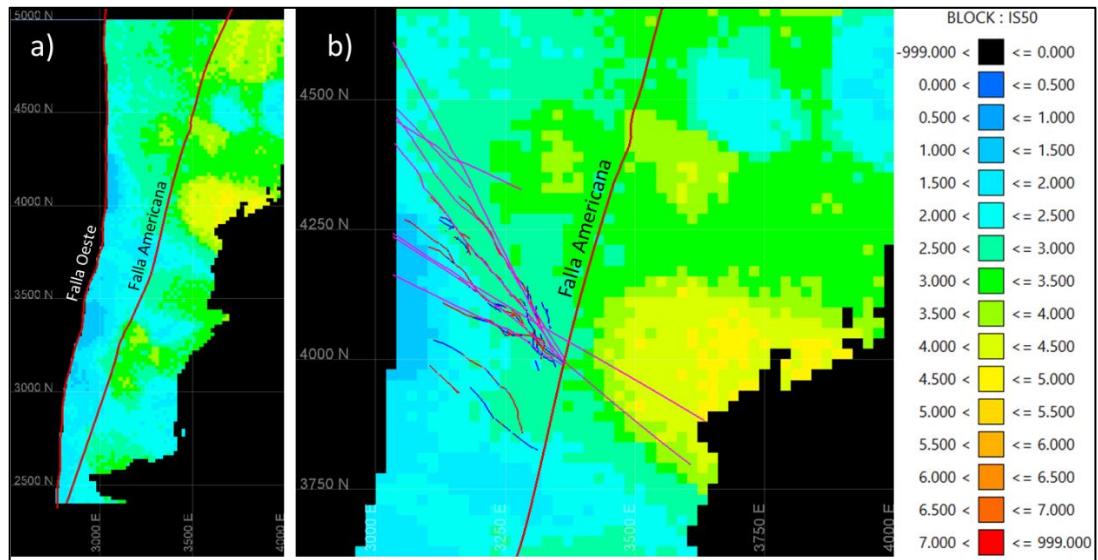


Figura 52: Secciones del modelo de bloque a cota 1823, a) junto a la Falla Oeste, Falla Americana, y b) Trazas de la Falla Arsenico.

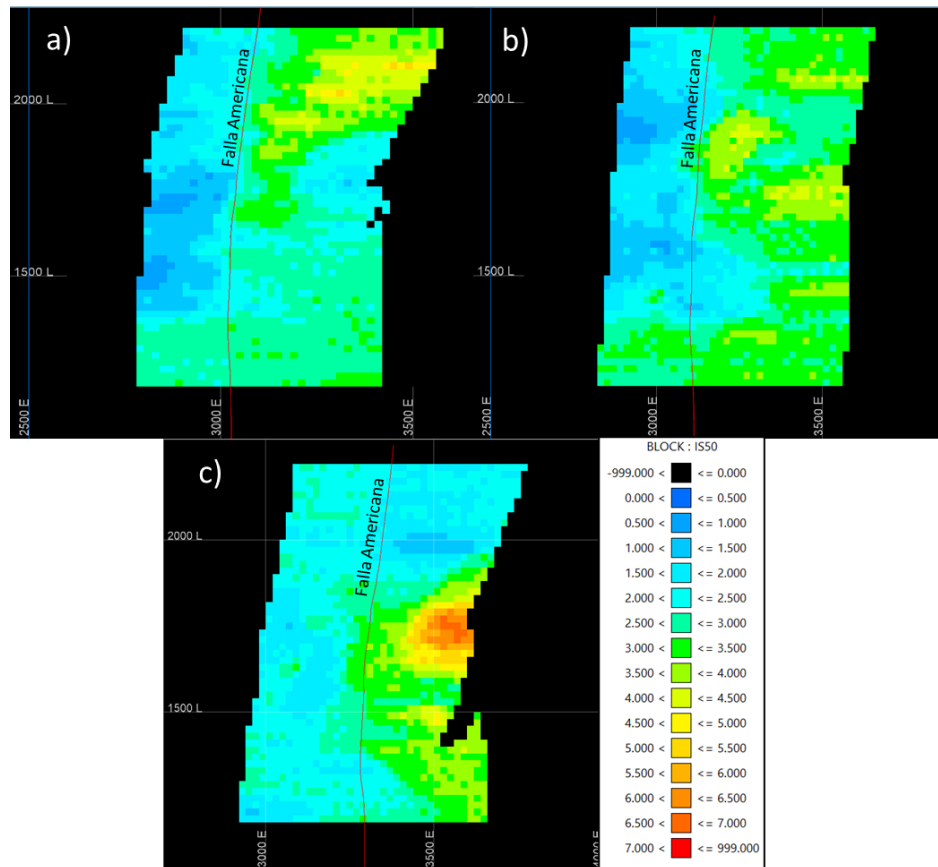


Figura 53: Planos XZ del modelo de bloques, junto la Falla Americana. a) 3000N; b) 3260N; y c) 3860N.

- **Consideración de la incertidumbre (varianza y desviación estándar):**

Se analizaron las medidas de varianza y desviación estándar del modelo de bloques para evaluar la dispersión de los valores estimados en relación con los datos observados y la variabilidad inherente del yacimiento. La consistencia entre las estimaciones del modelo y las características esperadas del depósito, así como la comparación con medidas de incertidumbre calculadas, proporciona una validación cuantitativa adicional.

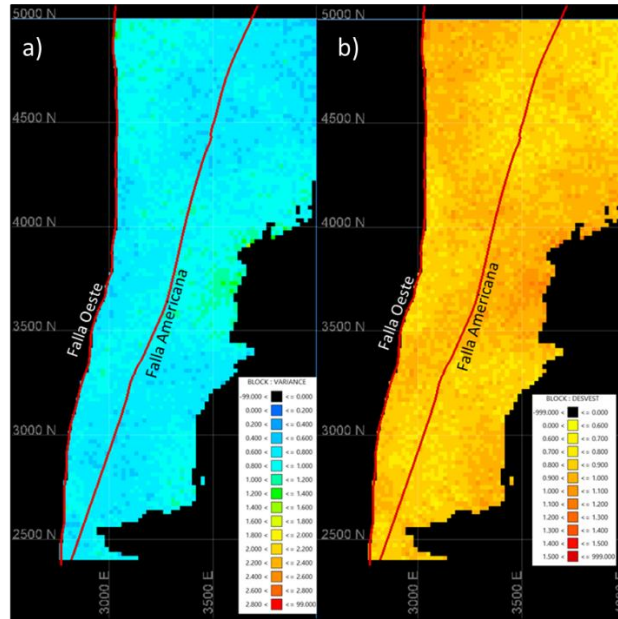


Figura 54: Modelo de bloque de la a) varianza y b) desviación estándar.

Al considerar la evaluación de la incertidumbre asociada a las estimaciones de  $I_{s50}$ . La varianza y la desviación estándar son medidas clave que reflejan la dispersión de los valores estimados alrededor de su media. En el modelo generado mediante simulación secuencial gaussiana, se observa una variabilidad significativa en estos parámetros, con valores de varianza (figura 54 a) que oscilan entre 0.36 hasta 1.21, y desviación estándar (figura 54 b) entre 0.6 y 1.1 en la cota 1823.

La consideración de esta incertidumbre permite realizar una validación más robusta del modelo de bloque. Al comparar visualmente las distribuciones de varianza y desviación estándar con las estructuras geológicas conocidas y los datos de sondajes validados, se puede verificar la coherencia del modelo en capturar las variaciones espaciales reales de  $I_{s50}$ .

## VI CAPITULO 6: DISCUSIÓN

El análisis geoestadístico se llevó a cabo para comprender la distribución espacial del Is50, permitiendo caracterizar su variabilidad, predecir valores en zonas no muestreadas e identificar patrones espaciales. Se utilizó el *kriging* ordinario, una técnica robusta y precisa para modelar la dependencia espacial a través del variograma. Los análisis iniciales indicaron un comportamiento isotrópico del Is50, lo que justificó el uso de un variograma omnidireccional. El modelo resultante, que incluyó un efecto pepita y cuatro modelos esféricos [ $\gamma(h) = 2.2nug + 0.6sph(40) + 0.32sph(100) + 0.3sph(240) + 0.73sph(380)$ ], se ajustó adecuadamente y facilitó la identificación de variaciones en la resistencia del macizo rocoso.

Asimismo, se empleó la simulación secuencial gaussiana con datos normalizados del Is50, que también mostraron isotropía. Este enfoque generó un modelo de variograma óptimo [ $\gamma(h) = 0.54nug + 0.15sph(100) + 0.1sph(180) + 0.13sph(380) + 0.08sph(900)$ ] y permitió realizar 200 simulaciones, proporcionando una representación más realista de la variabilidad espacial. La metodología de estimación se consideró adecuada, dado que los datos no presentaban tendencias globales significativas, lo que requería una estimación local precisa, característica del *kriging* ordinario.

Las dimensiones del modelo de bloque (20 x 20 x 20 metros) fueron elegidas estratégicamente, siendo menores que la separación promedio entre calles y mayores que la separación entre zanjas, lo que aseguró su utilidad para el análisis.

El *kriging* ordinario demostró ser un estimador efectivo, minimizando el error cuadrático y considerando la incertidumbre del modelo de varianza espacial. Sin embargo, la calidad del variograma es crucial; un ajuste inadecuado puede llevar a estimaciones imprecisas, destacando la necesidad de un ajuste meticuloso.

Por otro lado, la simulación secuencial gaussiana presenta ventajas al capturar la variabilidad y los patrones heterogéneos de las variables. No obstante, su alta demanda computacional y la posible acumulación de errores en áreas extensas del modelo son desventajas a considerar. La identificación y corrección de estos errores puede ser compleja, especialmente si no se comprende su origen. Este análisis resalta la importancia

de elegir adecuadamente la metodología y de realizar un ajuste cuidadoso de los modelos utilizados.

El análisis se centró en el modelo de bloque final del nivel 1 de producción de la mina subterránea Chuquicamata, generando una sección en la cota 1823. Los resultados mostraron una desviación estándar entre 0.6 y 1.1 MPa, con una varianza que osciló entre 0.36 y 1.21. Se identificaron las Fallas Oeste y Americana para examinar los cambios en la resistencia a gran escala. Observamos un contraste significativo de resistencia a lo largo del yacimiento, con la Falla Americana actuando como una estructura barrera; en general, la resistencia fue mayor en el lado oriental en comparación con el occidental. Además, se detectó un notable contraste entre las dos principales fallas, específicamente en torno a los 4000N, donde los valores de resistencia fueron más altos al norte y más bajos al sur.

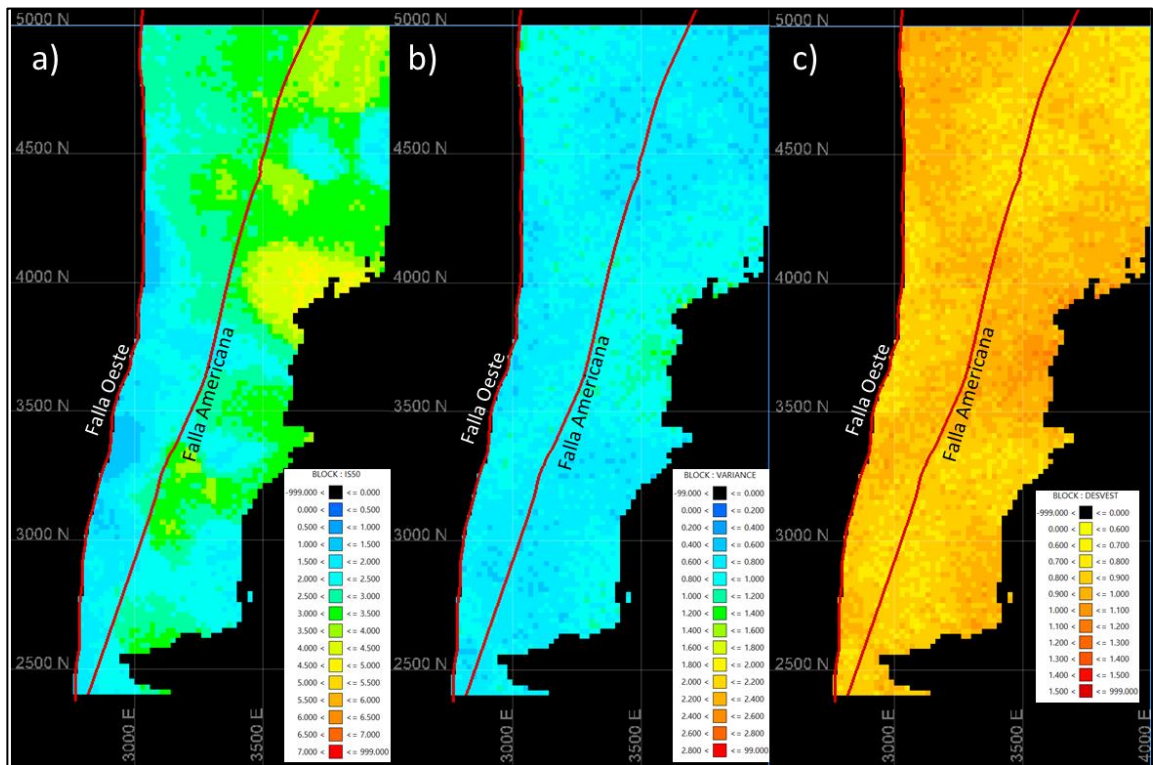


Figura 55: Modelo de bloque acotado a la cota 1823. a) resistencia a la carga puntual corregida ( $Is_{50}$ ), b) Varianza y c) Desviación estándar.

Al enfocarnos en los macrobloques N2/N3, N1/S1 y S2/S3, se pudo identificar con mayor claridad el cambio de resistencia en el macizo rocoso situado entre las dos fallas principales, como se muestra en la figura 56(a). Este análisis también incorporó el modelo estructural vigente, incluyendo las trazas de la Falla Arsénico y la familia de fallas NNW,

lo que permitió visualizar una relación entre estas estructuras y la resistencia del macizo rocoso, evidenciada en la figura 56(b).

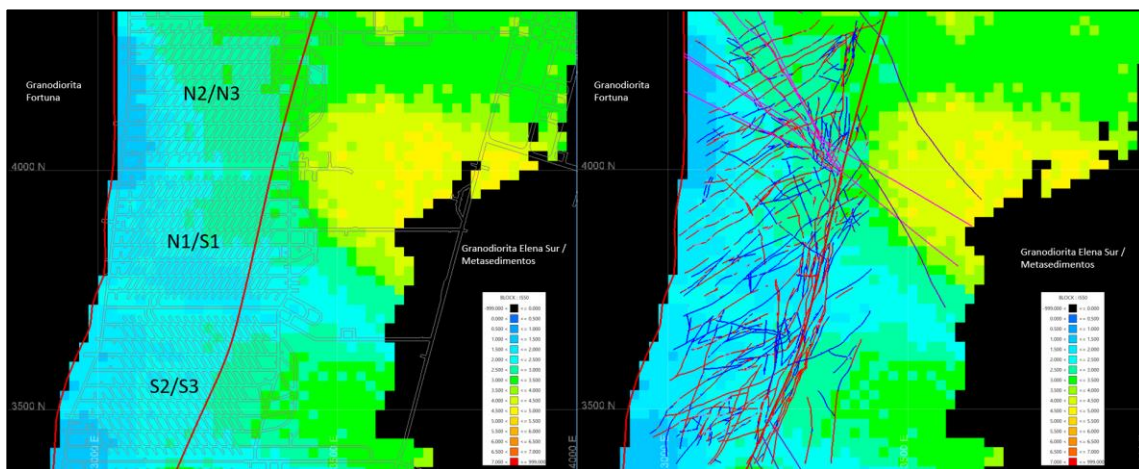


Figura 56: Modelo de bloque, Cota 1823 – Acotado a las coordenadas 3390N-4320N. a) Macrobloques del S2/S3 al N2/N3, b) Modelo estructural donde las estructuras rocas corresponden a VIF (Very Important Fault), las azules FT (Fault Trace), púrpura las trazas corres

En el nivel 1 de producción de la mina subterránea Chuquicamata, se identificaron tres zonas con contrastes significativos en los valores de  $I_{s50}$ , evidenciando cambios notables en la resistencia del material. Se observaron valores superiores en un lado de ciertas estructuras en comparación con el lado opuesto.

- 1) Se observa un cambio notable en la resistencia a lo largo de la Falla Americana, con valores significativamente más altos al este en comparación con el lado oeste. Este contraste se ilustra de manera más clara en el perfil de elevación este (figura 57).

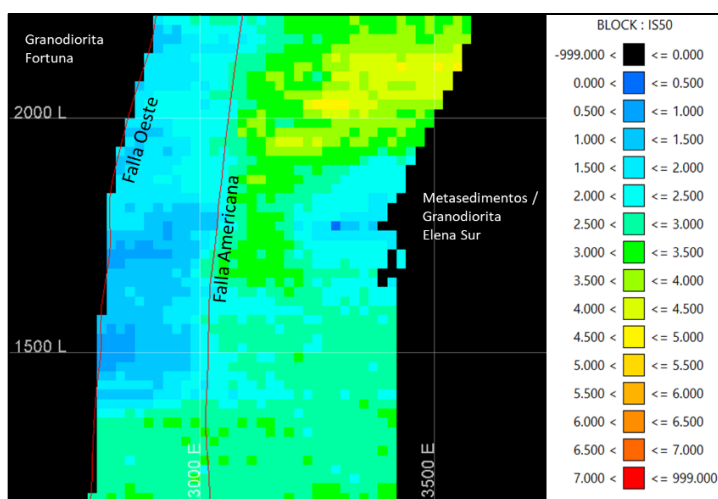


Figura 57: Sección transversal Elevación-Este del modelo de bloque.

- 2) Un segundo cambio significativo en la resistencia de la roca se observa entre las Fallas Oeste y Americana, desde su intersección hacia el norte, comenzando aproximadamente en la coordenada 3800N. En esta área, la familia de fallas WNW-ESE indica un notable contraste en la resistencia, con valores más altos hacia el norte y menores hacia el sur (figura 58).

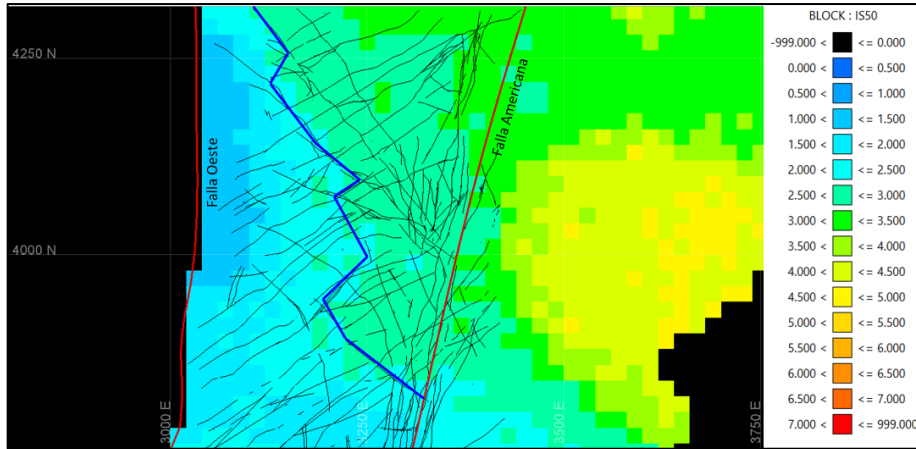


Figura 58: Zona de contraste de resistencia entre Falla Oeste y Americana. Expresada por las fallas WNW-ESE y Falla Arsénico (Azul).

- 3) Un tercer contraste en la resistencia se identifica al este de la Falla Americana, donde se extiende la Falla Arsénico y se intersecta con una falla NNW-SSE. Esta configuración podría actuar como una barrera, evidenciando un cambio significativo en la resistencia: hacia el norte, los valores de Is50 oscilan entre 3.0 y 5.5 MPa, mientras que hacia el sur se reducen a aproximadamente 1.5 a 3.0 MPa (figura 59).

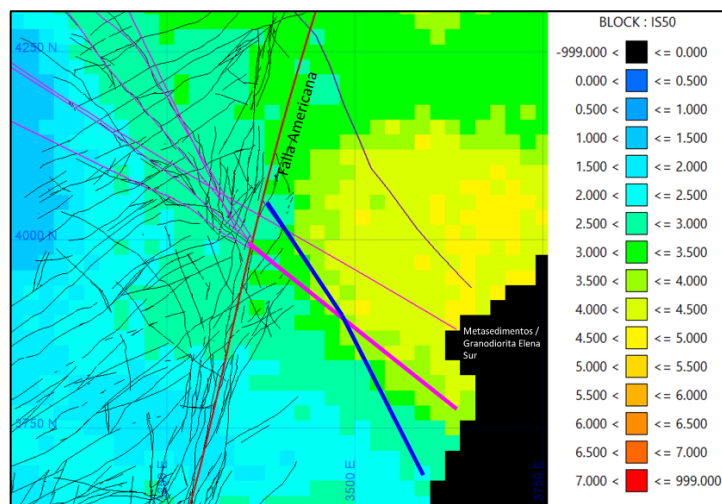


Figura 59: Zona de contraste de resistencia al Este de la Falla Americana. Generada por la Falla Arsénico (Purpura) y Falla NNW-SSE (Azul).

Finalmente se recomienda la realización de estudios geoestadísticos adicionales sobre variables geotécnicas clave como el Índice Q de Barton, el Índice de Resistencia a la Masa (RMR), el Índice de Resistencia Mínima del Macizo Rocoso (MRMR), y el Índice de Soporte Global (GSI). Estos estudios podrían complementarse con modelos de bloque para obtener una representación más completa de la variabilidad y heterogeneidad observada en la mina subterránea Chuquicamata.

## VII CAPITULO 7: CONCLUSIONES

La aplicación de técnicas estadísticas básicas ha revelado una tendencia general de aumento en la resistencia del macizo rocoso en las direcciones este, norte y hacia la superficie. Los análisis indicaron un incremento de resistencia de oeste a este y de sur a norte, destacando que las UGTB del Pórfido Este (QMeS, QIS, QMS, PES, PEK y PEC) mostraron un aumento en resistencia en dirección este.

El análisis variográfico del Is50 confirmó un comportamiento isotrópico, utilizando un modelo omnidireccional que incorporó un efecto pepita y cuatro modelos esféricos. Esto permitió generar un modelo de bloque preciso que reflejó la variabilidad espacial de la resistencia, identificando cambios significativos correlacionados con las estructuras geológicas presentes. La simulación secuencial gaussiana complementó este análisis, proporcionando un modelo que mostró buena concordancia con las estructuras mapeadas en la mina Chuquicamata.

Se identificaron tres zonas de contrastes significativos de resistencia, condicionadas por fallas estructurales que actúan como barreras a las alteraciones y mineralización del Pórfido Chuquicamata. Estas barreras resultan en menor resistencia en un lado de las estructuras debido a la propagación de alteraciones, mientras que el lado opuesto presenta mayor resistencia, asociado a una escasa percolación de fluidos hidrotermales.

Particularmente, se evidenció un cambio en el nivel 1 de producción, con mayor resistencia al este de la Falla Americana en comparación con el oeste. Las fallas Americana y Oeste controlan la génesis del Pórfido Chuquicamata, concentrando las alteraciones más abrasivas entre ellas, lo que resulta en rocas de menor resistencia. Además, la presencia de estructuras con orientación NW, junto con trazas de la Falla Arsénico, actúa como barrera para la diseminación de la alteración Fílica cuarzo-sericita.

Al este de la Falla Americana, las Unidades Pórfido Este Potásico (PEK) y Pórfido Este Clorítico (PEC) también presentan un contraste de resistencia, posiblemente influenciado por la Falla Arsénico y su interacción con otras estructuras.

En conclusión, la metodología empleada, incluyendo el *kriging* ordinario y la simulación secuencial gaussiana, ha demostrado ser adecuada y efectiva para proporcionar estimaciones precisas. Sin embargo, es fundamental reconocer sus limitaciones y gestionar adecuadamente los factores que pueden afectar la calidad de los resultados.

## VIII Referencias

- Aguilar Aguilera, J. (2008). CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y ESTRUCTURAL DE LA RAMPA DE EXPLORACIÓN Y DEL TÚNEL DE DRENAJE, MINA CHUQUICAMATA. *Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología.*
- Alcota, H., Anguita, P., Vargas, J., Ahumada, C., Blanco, N., Canales, A., & Wettke, E. (2009). *Marco geológico escala 1:50.000, geoquímica, geofísica y potencial de exploración del distrito Chuquicamata, distrito CODELCO Norte, Región de Antofagasta. Informe resultados del programa de mapeo y exploración, escala 1:5.000.*
- Alpaca López, Y. (2016). Caracterización geotécnica, estructural del macizo rocoso de los desarrollos subterráneos de la Fase V, Chuquicamata–Chile.
- Álvarez C., O., & Miranda M., J. (1991). *Primeras consideraciones geológicas del yacimiento Mansa Mina.* Viña del Mar, Chile: Congreso Geológico Chileno No. 6.
- Ambrus, J. (1979). *Emplazamiento y mineralización de los pórfidos cupríferos de Chile.* Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Universidad de Salamanca, España.
- American Society for Testing and Materials . (2016). Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications. West Conshohocken, PA, D5731-16.
- Aracena, I. (1981). Geología y Alteración del Complejo Plutónico del Sector Norte del Yacimiento de Chuquicamata. *Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile, (pág. 83).*
- Ballard, J. R., Palin, J. M., Williams, I. S., Campbell, I., & Faunes, A. (2001). *Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquicamata copper deposit of northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP.* Geological Society of America.

- Barra, F., Alcota, H., Rivera, S., Valencia, V., Munizaga, F., & Maksaev, V. (2013). *Timing and formation of porphyry Cu–Mo mineralization in the Chuquicamata district, northern Chile: new constraints from the Toki cluster*. Mineralium Deposita.
- Blanco, N., & Tomlinson, A. (2006). *Fm. Sical: Sedimentación aluvial (Eoceno-Oligoceno) sintectónica al evento orogénico Incaico, Región de Antofagasta, Chile*. Congreso Geológico Chileno.
- Boric P, R., Diaz F, F., & Maksaev J, V. (1990). *Geología y yacimientos metalíferos de la región de Antofagasta: Servicio Nacional de Geología y Minería*. Santiago.
- Cabrera, J. (2011). Estudio petrográfico y petrológico de los porfidos alimentadores del distrito mina Radomiro Tomic II Region, Chile. *Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra* .
- Campbell, I., Ballard, J., Palin, M., Allen, C., & Faunes, A. (2006). U-Pb Zircon Geochronology of Granitic Rocks from the Chuquicamata-El Abra Porphyry Copper Belt of Northern Chile: Excimer Laser Ablation ICP-MS Analysis. *Economic Geology*, v.101, (págs. 1327-1344).
- Camus, F. (2003). Geología de los Sistemas Porfídicos en los Andes de Chile. *SENAGEOMIN, Santiago de Chile*, (pág. 267).
- Castelli, J. (2002). Geología del Distrito Chuquicamata, Fase I. Gerencia Corporativa de Exploraciones, Codelco Chile., (pág. 77).
- Chong , G., & Pardo , R. (1993). Geología del distrito de Chuquicamata, Segunda Región de Antofagasta. *Subgerencia de Geología, Superintendencia de Exploraciones y Desarrollo Geológico, CODELCO* (pág. 147). Inedito.
- CODELCO, División Chuquicamata. (2023). *Informe: Caracterización Geotécnica Macrobloque S05 Primer Nivel de Explotación Mina Chuquicamata subterránea*.
- CODELCO, División Codelco Norte. (2009). *CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA ESTRUCTURAL PROYECTO MINA SUBTERRÁNEA CHUQUICAMATA*.

- Córdova, S., Damané, E., Frott, L., órdenes, T., & Ramírez, F. (2010). Alteración y Mineralización Hipógena del yacimiento de Chuquicamata. *I Jornada de Geociencias. División Codelco Norte, Codelco Chile*, (págs. 11-22). Calama.
- Dilles, J. H., Tomlinson, A., Martin, M., & Blanco, N. (1997). El Abra and Fortuna Complexes: A Porphyry Copper Batholith Sinistrally Displaced by the Falla Oeste. *VIII Congreso Geológico Chileno, Vol. 3*, (págs. 1883-1887).
- Dilles, J., Tomlinson, A., García, M., & Alcota, H. (2011). The geology of the Fortuna granodiorite complex, Chuquicamata district, northern Chile Relation to porphyry copper deposits. *Society of Geology Applied to Mineral Deposits (SGA), Biennial Meeting, 11th*, (págs. 399-401). Antofagasta.
- Emery, X. (2012). Simulación estocástica y geoestadística no lineal. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago.
- Emery, X. (2013). Geoestaística. Facultad de Ingenierías, Universidad de Chile.
- Espinoza Ortega, R. (s.f.). Variabilidad Espacial de la Resistencia de la Roca intacta (Irs) y del índice geológico de resistencia (GSI) en las unidades geotécnicas básicas de mina Chuquicamata. Región de Antofagasta, Chile.
- Giraldo Henao, R. (2002). Introducción a la Geoestadística, Teoría y aplicación. Bogotá, Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística, Universidad Nacional de Colombia.
- Hoek, E., & Brown, E. (1997). Estimación de la Resistencia de Macizos Rocosos en la Práctica. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
- Langerfeldt, H. (1964). Preliminary survey of rock problems at Chuquicamata.
- Lindsay D, D., Zentilli, M., & Rojas de la Rivera, J. (1995). *Evolution of an active ductile to brittle shear system controlling mineralization at the Chuquicamata porphyry copper deposit, northern Chile*. International Geology Review.
- López Mendoza, P., & Rojas Mondaca, O. (2018). Calama: Algunas generalidades. En P. López Mendoza, O. Rojas Mondaca, V. Flores-Aqueveque, R. Loyola Muñoz, I.

- Martínez Rivera, & I. Cartajena Fasting, *El pleistoceno de la cuenca de Calama. Evidencias paleontológicas y arqueológicas* (pág. 19). Santiago de Chile.
- Maksaev J, V. (1990). *Metallogeny, geological evolution, and thermochronology of the Chilean Andes between latitudes 21° and 26° south and the origin of mayor porphyry copper deposits*. Halifax, Canada.
- Maksaev, V., & Zentilli, M. (1988). Marco metalogénico regional de los megadepósitos de tipo pórfido cuprífero del Norte Grande de Chile. *V Congreso Geológico Chileno*.
- Maksaev, V., & Zentilli, M. (1999). Fission track thermochronology of the Domeyko Cordillera, northern Chile: Implications for Andean tectonics and porphyry copper metallogenesis. *Exploration and Mining Geology*, (págs. 65-90).
- May, G., Hartley, A., Chong, G., Stuart, F., Turner, P., & Kape, S. (2005). *Eocene to Pleistocene lithostratigraphy, chronostratigraphy and tectono-sedimentary evolution of the Calama Basin, northern Chile*. *Revista Geológica de Chile*.
- Moreno Bizama, B. (2023). Geología y modelamiento del sector Carmen Este, División Radomiro Tomic, región de Antofagasta, Chile.
- Müller, G., & Quiroga, J. (2003). Geology of the MM copper deposit, Chuquicamata district-an update. *X Congreso Geológico Chileno*. Concepción, Chile.
- Ossandón C., G., Fréaut C., R., Gustafson, L., Lindsay, D., & Zentilli, M. (2001). Geology of the Chuquicamata Mine: A Progress Report. *Economic Geology*, v.96, (págs. 249-270).
- Ramírez Leyton, G., & Pincheira Donoso, D. (2005). *Fauna del Altiplano y Desierto de Atacama*. Calama, Chile: Phrynosaura Ediciones.
- Reutter, K., Scheuber, E., & Chong, G. (1996). The Precordilleran fault system of Chuquicamata, Northern Chile: evidence for reversals along arc-parallel strike-slip faults. *Tectonophysics*, v.259, (págs. 213-228).

- Rivera, S., & Pardo, R. (2004). Discovery and Geology of the Toki Porphyry Copper Deposit, Chuquicamata District, Northern Chile. *In: Sillitoe RH, Perello J, Vidal CE (eds) Andean metallogeny: new discoveries, concepts and updates. Society of Economic Geologists, Boulder*, (págs. 15-54).
- Rivera, S., Alcota, H., Fontecilla, C., & Kovacic, P. (2009). Supergene Modification of Porphyry Columns and the Application to Exploration with Special Reference to the Southern Part of the Chuquicamata District, Chile. *Supergene Environments, Processes, and Products* (págs. 1-14). Society of Economic Geologists, v.14.
- Rivera, S., Alcota, H., Proffett, J., Díaz, J., Leiva, G., & Vegara, M. (2012). *Update of the Geologic Setting and Porphyry Cu-Mo Deposits of the Chuquicamata District, Northern Chile*. Society of Economic Geologists.
- Sillitoe, R., & Perelló, J. (2005). Andean Copper Province: Tectonomagmatic Settings, Deposit Types, Metallogeny, Exploration, and Discovery. *Society of Economic Geologists, One Hundredth Anniversary Volume*, (págs. 845–890).
- Sillitoe, R., Marquardt, J., Ramírez, F., Becerra, H., & Gómez, M. (1998). *Geology of the Concealed MM Porphyry Copper Deposit, Chuquicamata District, Northern Chile*. Society of Economic Geologists.
- Siña, A. (2005). Modelo geológico y estimación de recursos cupríferos del depósito Chuquicamata. *Gerencia de Geología, División Codelco Norte* (pág. 170). Inedito.
- Skarmeta, J. (2021). *Structural Controls on Alteration Stages at the Chuquicamata Copper-Molybdenum Deposit, Northern Chile*. Santiago, Chile: Economic Geology.
- Tomlinson, A. J., & Blanco, N. (1997b). Structural Evolution and Displacement History of the West Fault System, Precordillera, Chile: Part2, Postmineral History. *VIII Congreso Geológico Chileno, Vol 3*, (págs. 1878-1882).
- Tomlinson, A. J., & Blanco, N. (2008). *Geología de la franja El Abra-Chuquicamata, II región [21°45'-22°30'S]*. Santiago: SERNAGEOMIN.

- Tomlinson, A., & Blanco, N. (1997a). Structural Evolution and Displacement History of the West Fault System, Precordillera, Chile: Part1, Synmineral History. *VIII Congreso Geológico Chileno, Vol. 3*, (págs. 1873-1877).
- Tomlinson, A., Blanco, N., Makshev, V., Dilles, J., Grunder, A., & Ladino, M. (2001). Geología de la Precordillera andina de Quebrada blanca-chuquicamata, regiones I y II (20 30'–22 30' S). *Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Informe Registrado IR-01-20*, (pág. 444).
- Valdés Muñoz, P. (2019). Modelos de sericita, caolinita y esmectita del primer nivel de hundimiento de Chuquicamata Subterránea y sus alcances geometalúrgicos.
- Véliz, H. (2009). Actualización Modelo Estructural Mayor, Yacimiento Chuquicamata . *Informe Interno de Vavel Earth, Inc. Proyecto Chuquicamata Subterráneo, División Codelco Norte, Codelco Chile* (pág. 77). Chuquicamata: Inedito.
- Waterman, G. (1951). Geology of the Chuquicamata drainage tunnel. *Internal report. Anaconda Copper Mining Company, Chuquicamata, Chile.*
- Yávar del Pino, Y. (2014). Estudio de robustez de la planificación minera del proyecto Mina Chuquicamata subterránea.
- Zentilli, M., Boric, R., Heaman, L., Mathur, R., & Hanley, J. (2015). New Developments on the Geology of MMH: is it the “missing half” of Chuquicamata? *XIV Chilean geological congress, symposium (Vol. 2)*.