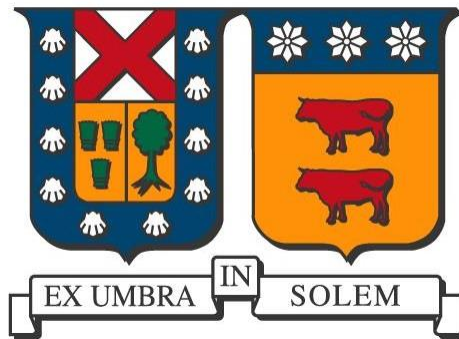


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



**“USO DE HERRAMIENTA GEOESTADÍSTICA PARA MEJORAR EL ENTENDIMIENTO DEL
ENTORNO GEOMECÁNICO”**

Jadol Andres Molina Vargas

Memoria de Título para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesoras guía:

Dra. Adeline Delonca

Dra. Nadia Mery

Octubre, 2025

Santiago, Chile



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: "USO DE HERRAMIENTA GEOESTADÍSTICA PARA MEJORAR EL ENTENDIMIENTO DEL ENTORNO GEOMECÁNICO".

Nombre del candidato(a): Jadol Andres Molina Vargas.

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas.

Campus: San Joaquín Departamento: Ingeniería de Minas, Metalurgia y Materiales.

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Adeline Delonca**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 20/03/2026 Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20/03/2026 Firma: _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen:

Este trabajo estima la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) en un yacimiento subterráneo mediante kriging ordinario (KO) y simulación Gaussiana secuencial (SGS) para caracterizar la variabilidad espacial y reducir la incertidumbre en el diseño. Además, por medio de la simulación y sus resultados se buscó mejorar la comprensión del entorno geomecánico enlazando esta con el cálculo del parámetro de profundidad de falla.

Tras la preparación y análisis de calidad de datos de sondajes (coordenadas, azimuth, plunge y UCS) inicialmente se separaron los análisis de continuidad espacial en dos sectores, zona norte y sur. Posteriormente se ejecutó un EDA con identificación de atípicos y análisis de continuidad, se modelaron variogramas aplicando compositado de 5 m para reducir la alta variabilidad espacial de los datos. La selección de vecindarios se apoyó en la herramienta KNA de *Isatis.neo* (criterios *slope* y correlación), y la validación se realizó por medio de validación cruzada. La SGS generó 100 realizaciones condicionales; a partir de ellas se construyeron mapas de probabilidad respecto de umbrales de interés basados en La Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (15, 50, 120 y 230 MPa).

Los resultados muestran que KO reproduce fielmente la media, pero como es esperable, suaviza la variabilidad. En Zona Sur, OK estimó un promedio en los datos de 158 MPa frente a 162 MPa reales (error 2.4%), con varianza reducida de 1424 a 358 y un ajuste entre valores reales y estimados de 0.85. La SGS entregó una media de 156.1 MPa y obtuvo una varianza de 303.1, las realizaciones mínimas y máximas lograron reproducir los valores mínimos y máximos reales de 50 y 286 MPa respectivamente. En Zona Norte, KO entregó 157 MPa versus 156 MPa reales (error 0.65%), la varianza fue reducida de 2001 en valores reales a 205 en estimados con un ajuste de 0.85 en la validación cruzada. La SGS obtuvo 156 MPa en el promedio de simulaciones, con una varianza de 145. Las simulaciones mínimas y máximas reprodujeron los valores mínimos y máximos reales de 3 y 267 MPa. Las realizaciones extremas permitieron ubicar áreas críticas de valores altos/bajos de UCS.

Adicionalmente como aplicación en los mapas de probabilidad en la determinación de otros parámetros geomecánicos, en un primer caso, se enlazaron estos con el cálculo de profundidad de falla por *spalling* usando el índice $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_c}$. Para excavaciones de 10 m de diámetro y alrededor de cota 2150 m, sectores con $Prob[UCS \geq 120 \text{ MPa}] = 100 \% \pm 1 \%$ presentaron $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} \approx 0.3$ (en el rango de no-falla), por lo que no se espera profundidad de falla, identificándose 3696 bloques que cumplen con dicha condición.

En el segundo caso, correspondiente a la cota 2080 m, se aplicó la misma lógica de la razón de esfuerzos $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} \approx 0.3$, generando mapas de estabilidad e inestabilidad bajo distintos escenarios de probabilidad. Este análisis permitió identificar y cuantificar las zonas con diferente grado de confianza en su comportamiento estructural, estableciendo una base objetiva para la toma de decisiones en el diseño y planificación de las excavaciones subterráneas, considerando la incertidumbre espacial del parámetro UCS.

En conjunto, el flujo OK + SGS + probabilidad y la relación de parámetros simulados con el cálculo del parámetro de profundidad de falla proporciona una estimación insesgada, cuantifica incertidumbre espacial y aporta una base trazable para diseño y soporte. Se recomienda, en trabajos futuros, vincular UCS con otras variables geológicas y geomecánicas (estructura, litología) para refinar zonas de riesgo y el dimensionamiento del sostenimiento.

Abstract

This study estimates the Uniaxial Compressive Strength (UCS) of a deep underground deposit using Ordinary Kriging (OK) and Sequential Gaussian Simulation (SGS) to characterize spatial variability and reduce uncertainty in geomechanical design. The simulation results were further integrated with the assessment of the *depth of failure* parameter to enhance understanding of the rock mass behavior around excavations.

After data preparation and quality control of borehole information (coordinates, azimuth, plunge, and UCS), the dataset was divided into northern and southern domains. An exploratory data analysis (EDA) was performed to identify outliers and assess spatial continuity. Experimental variograms were modeled using 5 m compositing to reduce short-scale variability. Neighborhood parameters were optimized using the KNA tool in Isatis.neo (slope and correlation criteria), and model performance was verified through cross-validation. The SGS produced 100 conditional realizations, from which probability maps were generated for critical UCS thresholds defined by the International Association for Engineering Geology (IAEG) at 15, 50, 120, and 230 MPa.

Results show that OK reproduced the global mean but, as expected, smoothed local variability. In the South Zone, OK estimated a mean UCS of 158 MPa versus 162 MPa measured (2.4 % error), with variance reduced from 1424 to 358 and a cross-validation correlation of 0.85. SGS achieved a mean of 156.1 MPa with variance 303.1, while its minimum and maximum realizations reproduced the actual extremes (50 and 286 MPa). In the North Zone, OK yielded 157 MPa against 156 MPa measured (0.65 % error), reducing variance from 2001 to 205 with a 0.85 validation correlation. SGS produced a mean of 156 MPa and variance of 145, successfully reproducing real extremes (3–267 MPa). The extreme realizations effectively delineated zones of high and low UCS, supporting risk identification.

Additionally, as an application, in the first case, probability maps for the determination of other geomechanical parameters were linked to the calculation of spalling depth using the stress ratio index $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_c}$. For excavations with a 10 m diameter and located around elevation 2150 m, sectors with $\text{Prob}[\text{UCS} \geq 120 \text{ MPa}] = 100 \% \pm 1 \%$ showed $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} \approx 0.3$ (within the non-failure range), therefore no spalling depth is expected. A total of 3696 blocks meeting this condition were identified. In the second case, corresponding to the 2080 m elevation, the same stress ratio criterion $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} \approx 0.3$ was applied to generate stability and instability probability maps under different scenarios. This analysis enabled the identification and quantification of zones with varying levels of confidence in their structural behavior, providing a quantitative basis for decision-making in the design and planning of underground excavations, while accounting for the spatial uncertainty of the UCS parameter.

The combined OK + SGS + probability workflow, coupled with the depth-of-failure analysis, provides an unbiased estimation framework, quantifies spatial uncertainty, and establishes a reproducible basis for rock-support design. Future work should integrate UCS with additional geological and geomechanical variables (e.g., structure, lithology) to refine risk mapping and optimize support requirements.

Contenido

1. Introducción.....	13
1.1. General.....	13
1.2. Motivación	13
1.3. Alcance	14
2. Objetivos	14
2.1. Objetivo general	14
2.2. Objetivos específicos.....	14
3. Marco teórico.....	15
3.1. Uniaxial compressive strength (UCS).....	15
3.2. Desafíos en la estimación de propiedades geomecánicas	15
3.3. Geoestadística	16
3.3.1 La variable regionalizada.....	16
3.3.2 El soporte	17
3.3.3 Estudio exploratorio de datos (EDA).....	17
3.3.4 La función aleatoria	18
3.3.5 Momentos de una función aleatoria	19
3.3.6 Hipótesis de estacionaridad	19
3.3.7 Variograma experimental	20
3.3.8 Variograma modelado	21
3.3.9 Kriging	23
3.3.10Kriging de media conocida o kriging simple (KS)	24
3.3.11Kriging de media desconocida u ordinario (KO).....	25
3.3.12Propiedades del Kriging	25
3.3.13Validación cruzada	25
3.3.14Simulación geoestadística condicional	25
3.3.15Algoritmo secuencial	27
4. Metodología.....	28

4.1. Preparación de datos	29
4.2. Análisis de datos.....	29
4.3. Análisis de continuidad espacial (Isatis.neo).....	29
4.4. Estimación por medio de Kriging Ordinario (Isatis.neo)	29
4.5. Simulación geoestadística condicional (Isatis.neo)	29
4.6. Comparación de métodos	30
4.7. Medición de incertidumbre y análisis de estabilidad.....	30
5. Caso de estudio.....	31
5.1. Base de datos	31
5.2. Zona Sur	33
5.2.1 Estudio exploratorio de datos.....	33
5.2.2 Análisis de continuidad espacial	38
5.2.3 Kriging Ordinario	40
5.2.4 Validación Kriging Ordinario	42
5.2.5 Simulación Gaussiana secuencial.....	43
5.2.6 Validación simulación	49
5.3. Zona Norte	51
5.3.1 Estudio exploratorio de datos.....	51
5.3.2 Análisis de continuidad espacial	56
5.3.3 Kriging Ordinario	58
5.3.4 Validación Kriging Ordinario	60
5.3.5 Simulación Gaussiana secuencial.....	61
5.3.6 Validación simulación	68
6. Resultados y análisis	70
6.1. Zona sur.....	70
6.1.1 Comparación de métodos en zona sur	70
6.1.2 Análisis de incertidumbre:	73

6.2. Zona norte	75
6.2.1 Comparación de métodos zona norte	75
6.2.2 Análisis de incertidumbre:	79
6.3. Aplicación: Relación entre mapas de probabilidad y profundidad de falla en túneles.....	82
6.3.1 Influencia de la probabilidad límite:	86
6.4. Estabilidad e inestabilidad en excavaciones.....	90
7. Discusión	94
8. Conclusiones	95
9. Referencias.....	97
10. Anexos	99
10.1. Iteraciones variograma y calidad de vecindad bajo distinto compositado y modelo variográfico..	99
10.1.1Zona Sur	99
10.1.2Zona Norte	102
10.2. Material complementario resultados	105
10.3. Varianza de kriging y simulación en cota 2150 msnm.	107
10.4. Parametros de cálculo profundidad de falla	108

Índice de figuras

Figura 1. Ensayo de compresión uniaxial.	15
Figura 2. Comparación de variables, a la derecha variable regionalizada.	17
Figura 3. Muestreo regular (izquierda) y muestreo preferencial (derecha).	17
Figura 4. Ejemplo de valores de la variable regionalizada.	19
Figura 5. Tolerancias angulares en el cálculo del variograma.	20
Figura 6. Mapa variográfico, realizado en Isatis.neo.	21
Figura 7. Meseta y alcance de un variograma.	22
Figura 8. Mapa variográfico y variograma con anisotropía geométrica.	23
Figura 9. Mapa variográfico y variogramas con anisotropía zonal (D1 vertical, D2 y D3 horizontal, Dθ oblicua).	23
Figura 10. Elipsoide de búsqueda con dos sectores angulares y de máximo 3 muestras por sector.	24
Figura 11. Anamorfosis de datos con comportamiento log-normal.	26
Figura 12. Anamorfosis por medio de igualdad $F(z) = G(y)$	26
Figura 13. Esquema de la metodología aplicada.	28
Figura 14. Vista de los datos. a) Planta. b) Perfil este. c) Perfil norte.	31
Figura 15. Vista de los datos en zona sur. a) Planta. b) Perfil este. c) Perfil norte.	33
Figura 16. Vista datos zona sur filtrados. a) Planta. b) Perfil este. c) Perfil norte.	34
Figura 17. Boxplot valores zona sur. a) UCS. b) Coordenada x. c) Coordenada y. d) Coordenada z.	35
Figura 18. Valores fuera límites zona sur. a) Valores sobre límite superior. b) Valores bajo límite inferior.	36
Figura 19. Mapa variográfico zona sur.	38
Figura 20. Resultado kriging ordinario zona sur.	41
Figura 21. Varianza kriging ordinario zona sur.	41
Figura 22. Validación datos estimados de la zona sur con a) histograma y swath plots b) este, c) norte y d) cota.	42
Figura 23. Anamorfosis e histograma zona sur.	43
Figura 24. Comparación variogramas omnidireccionales de indicadores a) Q10, b) Q25, c) Q50, d) Q75, e) Q90.	46
Figura 25. Promedio de valores UCS simulados zona sur.	47
Figura 26. Mínimo de valores UCS simulados zona sur.	47
Figura 27. Máximo de valores UCS simulados zona sur.	47
Figura 28. Probabilidad sobre límite UCS de 15 MPa zona sur.	48
Figura 29. Probabilidad sobre límite UCS de 50 MPa zona sur.	48
Figura 30. Probabilidad sobre límite UCS de 120 MPa zona sur.	48
Figura 31. Probabilidad sobre límite UCS de 230 MPa zona sur.	49
Figura 32. Varianza de simulación zona sur.	49
Figura 33. Validación datos simulados de la zona sur con a) histograma y swath plots b) N350, c) N260 y d) cota.	50
Figura 34. Vista de los datos en zona norte. a) Planta. b) Perfil este. c) Perfil norte.	51
Figura 35. Vista datos zona norte filtrados. a) Planta. b) Perfil este. c) Perfil norte.	51

Figura 36. Boxplot valores zona norte. a) UCS. b) Coordenada x. c) Coordenada y. d) Coordenada z.	53
Figura 37. Valores fuera límites zona norte. a) Valores sobre límite superior. b) Valores bajo límite inferior.	53
Figura 38. Valores bajo límite inferior en cota.	54
Figura 39. Mapa variográfico zona norte.	56
Figura 40. Resultado kriging ordinario zona norte.	59
Figura 41. Varianza kriging ordinario zona norte.	59
Figura 42. Validación datos estimados de la zona norte con a) histograma y swath plots b) este, c) norte y d) cota.	60
Figura 43. Anamorfosis e histograma zona norte.	61
Figura 44. Comparación variogramas de indicadores a) Q10, b) Q25, c) Q50, d) Q75, e) Q90.	64
Figura 45. Promedio de valores UCS simulados zona norte.	65
Figura 46. Mínimo de valores UCS simulados zona norte.	65
Figura 47. Máximo de valores UCS simulados zona norte.	66
Figura 48. Probabilidad sobre limite UCS de 15 MPa zona norte.	66
Figura 49. Probabilidad sobre limite UCS de 50 MPa zona norte.	66
Figura 50. Probabilidad sobre limite UCS de 120 MPa zona norte.	67
Figura 51. Probabilidad sobre limite UCS de 230 MPa zona norte.	67
Figura 52. Varianza de simulación zona norte.	67
Figura 53. Validación datos simulados de la zona norte con a) histograma y swath plots b) norte, c) este y d) cota.	68
Figura 54. Vistas estimación kriging ordinario zona sur.	71
Figura 55. Vistas promedio de simulaciones zona sur.	71
Figura 56. Vistas mínimo de simulaciones zona sur.	72
Figura 57. Vistas máximo de simulaciones zona sur.	73
Figura 58. Vistas probabilidad sobre límite de 50 MPa zona sur.	73
Figura 59. Vistas probabilidad sobre límite 120 MPa zona sur.	74
Figura 60. Vistas sobre límite 230 MPa zona sur.	75
Figura 61. Vistas estimación kriging ordinario zona norte.	76
Figura 62. Vistas simulación zona norte.	77
Figura 63. Vistas mínimo de simulaciones zona norte.	78
Figura 64. Vistas máximo de simulaciones zona norte.	79
Figura 65. Vistas probabilidad sobre 15 MPa zona norte.	79
Figura 66. Vistas probabilidad sobre 50 MPa zona norte.	80
Figura 67. Vistas sobre probabilidad 120 MPa zona norte.	81
Figura 68. Vistas sobre probabilidad 230 MPa zona norte.	82
Figura 69. Probabilidad de 100% +- 1% de encontrarse sobre el límite de 120 MPa. Zona sur.	83
Figura 70. Bloques en cota 2150 msnm con probabilidad 100 +-1% sobre límite de 120 MPa.	84
Figura 71. Bloques sobre cota 2150 con probabilidad 100+-1% sobre límite de 120 MPa.	86

Figura 72. Probabilidad sobre 80% de no poseer profundidad de falla. 199.879 bloques contabilizados (33.4% del dominio).	87
Figura 73. Probabilidad sobre 85% de no poseer profundidad de falla. 168.336 bloques contabilizados (28.1% del dominio).	87
Figura 74. Probabilidad sobre 90% de no poseer profundidad de falla. 92.530 bloques contabilizados (15.5% del dominio).	88
Figura 75. Probabilidad sobre 95% de no poseer profundidad de falla. 22.930 bloques contabilizados (3.8% del dominio).	88
Figura 76. Probabilidad de 100% de no poseer profundidad de falla. 3696 bloques contabilizados (0.6% del dominio).	89
Figura 77. Mapa de la simulación gaussiana secuencial promedio en cota 2080 msnm.	90
Figura 78. Vista Cota 2080 según probabilidad de estabilidad.	91
Figura 79. Vista Cota 2080 según probabilidad de inestabilidad.	92

Índice de gráficos

Gráfico 1. Histograma antes y después del compositado.	32
Gráfico 2. Histograma valores UCS zona sur.	35
Gráfico 3. Gráfico de probabilidad zona sur. a) Distribución normal. b) Distribución log-normal.	36
Gráfico 4. Nubes direccionales zona sur. a) Este. b) Norte. c) Cota.	37
Gráfico 5. Swath plot zona sur. a) Dirección este. b) Dirección norte. c) Cota.	37
Gráfico 6. Efecto desagrupamiento zona sur (rango 100 a 500 metros).	38
Gráfico 7. Variograma experimental zona sur. a) Horizontal. b) Vertical.	39
Gráfico 8. Variograma modelado zona sur.	40
Gráfico 9. Validación cruzada zona sur.	43
Gráfico 10. Nube de correlación diferida zona sur. a) 5 metros. b) 20 metros. c) 80 metros. d) 200 metros.	44
Gráfico 11. a) Variograma y b) madograma de valores Gaussianos zona sur.	44
Gráfico 12. Variograma omnidireccional Gaussiano zona sur.	45
Gráfico 13. Variograma direccional Gaussiano zona sur.	46
Gráfico 14. Histograma valores UCS zona norte.	52
Gráfico 15. Gráfico de probabilidad zona norte. a) Distribución normal. b) Distribución log-normal.	54
Gráfico 16. Nubes direccionales zona norte. a) Este. b) Norte. c) Cota.	55
Gráfico 17. Swath plot zona norte. a) Dirección este. b) Dirección norte. c) Cota.	55
Gráfico 18. Efecto desagrupamiento zona norte (rango 0 a 300 metros).	56
Gráfico 19. Variograma experimental zona norte. a) Horizontal. b) Vertical.	57
Gráfico 20. Variograma modelado zona norte.	58
Gráfico 21. Validación cruzada zona norte.	61
Gráfico 22. Nube de correlación diferida zona norte. a) 5 metros. b) 10 metros. c) 80 metros. d) 180 metros.	62
Gráfico 23. a) Variograma y b) madograma de valores Gaussianos zona norte.	62
Gráfico 24. Variograma omnidireccional Gaussiano zona norte.	63
Gráfico 25. Variograma direccional Gaussiano zona norte.	65
Gráfico 26. Profundidad de falla predicha por medio de profundidad de fallas medidas.	83
Gráfico 27. Determinación profundidad de falla en zona sur.	85
Gráfico 28. Influencia de la probabilidad de estabilidad en la cantidad de bloques simulados.	89

Índice de tablas

Tabla 1. Valores referenciales de UCS según GS, IAEG e ISRM.....	15
Tabla 2. Estadística antes y después del compositado.....	32
Tabla 3. Estadística descriptiva zona sur.....	34
Tabla 4. Cuantiles zona sur.....	34
Tabla 5. Parametros de confección variograma experimental zona sur.....	39
Tabla 6. Resultados prueba KNA zona sur en Isatis.neo.....	40
Tabla 7. Estadística antes y después de la estimación en zona sur.....	42
Tabla 8. Valores variograma, madograma y relación zona sur.....	45
Tabla 9. Cuantiles con anamorfosis zona sur.....	45
Tabla 10. Estadística antes y después de la simulación en zona sur.....	49
Tabla 11. Estadística descriptiva zona norte.....	52
Tabla 12. Cuantiles zona norte.....	52
Tabla 13. Parametros de confección variograma experimental zona norte.....	57
Tabla 14. Resultados prueba KNA zona norte en Isatis.neo.....	58
Tabla 15. Estadística antes y después de la estimación en zona norte.....	60
Tabla 16. Valores variograma, madograma y relación zona norte.....	63
Tabla 17. Cuantiles con anamorfosis zona norte.....	63
Tabla 18. Estadística antes y después de la simulación en zona norte.....	68
Tabla 19. Comparación estimación con simulación zona sur.....	70
Tabla 20. Comparación estimación con simulación zona norte.....	75
Tabla 21. Cálculo de razón de esfuerzos y profundidad de falla. Primer caso.....	85
Tabla 22. Determinación de esfuerzos y profundidad de falla. Segundo caso.....	90
Tabla 23. Influencia de la probabilidad de estabilidad en la cantidad de bloques seleccionados.....	92
Tabla 24. Influencia de la probabilidad de inestabilidad en la cantidad de bloques seleccionados.....	93

Dedicatoria

Dedicado a mis amados padre y madre, José Molina y Jacqueline Vargas, agradezco todos los días a Dios el habernos juntado y permitirme crecer en esta hermosa familia.

No me alcanzan las palabras para agradecer el apoyo y la confianza que me han dado, espero algún día lograr ser la inspiración de mis hijos tal cual como ustedes han sido la mía.

1. Introducción

1.1. General

La caracterización del macizo rocoso es una etapa fundamental en la minería subterránea, debido a su impacto directo en la estabilidad de las excavaciones y en la seguridad de las operaciones (Seguret & Guajardo, 2014). Entre los parámetros geomecánicos más relevantes destaca la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), utilizada para evaluar el comportamiento del macizo bajo diferentes condiciones de esfuerzo. Además, se ha identificado que valores elevados de UCS pueden contribuir a la profundidad de falla en eventos de estallido de roca, aumentando la complejidad de la planificación operativa (Dootsmohammadi et al., 2014; Ramírez, 2022).

El uso de valores promedio para caracterizar propiedades geomecánicas ha sido una práctica habitual, lo que genera estimaciones imprecisas y aumenta la incertidumbre en zonas no muestreadas, presentando riesgos significativos para la seguridad operativa y la planificación minera (Séguret et al., 2014; Ozturk & Simdi, 2013). Frente a esta problemática, los métodos geoestadísticos se presentan como una alternativa eficaz al permitir estimar variables en puntos no muestreados mediante análisis espaciales (Ozturk & Simdi, 2013). Herramientas como el kriging han demostrado su utilidad para interpolar parámetros como el UCS y el índice de calidad de la roca (RQD), pero con limitaciones, como el efecto de suavizado que puede subestimar valores altos y sobreestimar valores bajos (Séguret & Guajardo, 2015).

Para abordar estas limitaciones, se han desarrollado técnicas avanzadas como la simulación Gaussiana secuencial (SGS), que genera múltiples realizaciones de variables regionalizadas, manteniendo su variabilidad espacial y características estadísticas (Doostmohammadi et al., 2014). Estas técnicas han mostrado ser efectivas para caracterizar propiedades geomecánicas complejas, mejorar la planificación de túneles y aumentar la seguridad operativa al cuantificar la incertidumbre en las estimaciones (Hekmatnejad et al., 2017; Pinheiro et al., 2016).

Además del impacto técnico, el estudio tiene implicancias éticas y de responsabilidad social, dado que la correcta caracterización del macizo rocoso contribuye a minimizar riesgos laborales y prevenir accidentes. La integración de estas herramientas avanzadas no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también refuerza el cumplimiento de estándares éticos y legales en el diseño y ejecución de proyectos subterráneos.

1.2. Motivación

La motivación principal de este trabajo radica en la necesidad de abordar las limitaciones actuales en la caracterización geomecánica del macizo rocoso en minería subterránea. El uso de valores promedio y la falta de consideración de la variabilidad espacial en los parámetros geomecánicos han generado incertidumbre en zonas no muestreadas, incrementando los riesgos operativos y comprometiendo la seguridad de las excavaciones. La implementación de técnicas geoestadísticas como el kriging y la simulación Gaussiana secuencial (SGS) no solo ofrece una solución técnica avanzada, sino que también contribuye a mejorar la precisión de las evaluaciones geotécnicas, minimizando costos y reduciendo riesgos para los trabajadores. Este enfoque responde tanto a los desafíos técnicos como a los compromisos éticos y sociales asociados a la minería responsable.

1.3. Alcance

Este estudio tiene como alcance la estimación y simulación de los valores de resistencia a la compresión uniaxial (UCS) en una mina subterránea, utilizando herramientas geoestadísticas asociándolas al cálculo de parámetros útiles para determinar la estabilidad. A través del desarrollo de un modelo tridimensional del macizo rocoso, se busca representar de manera realista la variabilidad espacial del UCS y cuantificar la incertidumbre asociada a las estimaciones. Los resultados incluyen, mapas de valores estimados, realizaciones simuladas y análisis de incertidumbre enlazados con el cálculo del parámetro de profundidad de falla, los cuales serán fundamentales para la planificación y toma de decisiones en operaciones mineras subterráneas. Además, se enlaza el cálculo de mapas de probabilidad con el parámetro de profundidad de falla en túneles, siendo el enfoque metodológico replicable en proyectos similares, contribuyendo a la mejora de la seguridad y eficiencia en la industria minera.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- **Estimar y simular** valores de Resistencia a la compresión uniaxial incorporando la variabilidad espacial y la incertidumbre **para establecer mapas probabilísticos** que permitan determinar profundidad de falla y evaluando así la estabilidad asociada a excavaciones.

2.2. Objetivos específicos

- **Evidenciar** las limitaciones de la **caracterización** geomecánica **basada en valores promedio** y **justificar** la **necesidad** de **incorporar métodos geoestadísticos** que representen la variabilidad espacial del UCS (Kriging ordinario y Simulación Gaussiana Secuencial).
- **Analizar el aporte** de la **simulación** gaussiana secuencial **frente al kriging ordinario** para reproducir la variabilidad y los valores extremos del UCS relevantes en el diseño subterráneo.
- **Cuantificar la incertidumbre** espacial del UCS y **expresarla en términos probabilísticos** que **permitan identificar zonas con distintos niveles de confianza** geomecánica.
- **Integrar la información probabilística** del UCS **con** criterios como el parámetro de **profundidad de falla** para apoyar decisiones de diseño y fortificación de excavaciones.

3. Marco teórico

3.1. Uniaxial compressive strength (UCS)

La resistencia a la compresión uniaxial es un parámetro de vital importancia para el sistema de clasificación de macizo rocoso RMR (Bienawski, 1989) en excavaciones de túneles. Una mala determinación o caracterización de valores de UCS puede desembocar en un sobredimensionamiento del soporte necesario cuando se subestiman los valores reales, aumentando así los costos asociados a fortificación. En el caso contrario al sobreestimar los valores reales, aumentan los riesgos operacionales pudiendo incluso ocasionar accidentes fatales.

El procedimiento de medición de UCS se encuentra estandarizado por la sociedad internacional de mecánica de rocas e ingeniería de rocas ISRM (ISRM, 1977; ISRM, 1979).

Su valor indica la máxima resistencia que una muestra cilíndrica de roca puede soportar cuando se le aplica un esfuerzo unidireccional a lo largo de su eje, comprimiendo sus extremos. Es la máxima carga soportada dividida en el área de la sección transversal donde esta es aplicada.

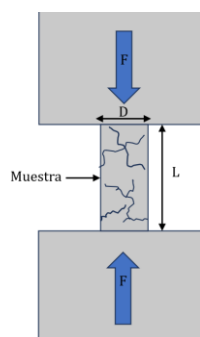


Figura 1. Ensayo de compresión uniaxial.

Fuente: Elaboración propia.

La razón de la longitud (L) / diámetro (D) idealmente debe ser de 2.5 (ver Figura 1), la tasa de carga debe ser de 0.5 a 1 MPa y los extremos de la muestra deben ser completamente perpendiculares al eje axial (Bell, 2005). De esta forma se provee a la muestra de una buena distribución de la carga.

Tabla 1. Valores referenciales de UCS según GS, IAEG e ISRM.

Fuente: Bell (2005).

Geological Society (1977)		IAEG (1979)		ISRM (1981)	
Term	Strength (MPa)	Term	Strength (MPa)	Term	Strength (MPa)
Very weak	< 1.25	Weak	< 15	Very low	< 6
Weak	1.25 – 5.00	Moderately strong	15 – 50	Low	6 – 10
Moderately weak	5.00 – 12.50	Strong	50 – 120	Moderate	20 – 60
Moderately strong	12.50 – 50	Very strong	120 – 230	High	60 – 200
Strong	50 – 100	Extremely strong	> 230	Very high	> 200
Very strong	100 – 200				
Extremely strong	> 200				

3.2. Desafíos en la estimación de propiedades geomecánicas

La estimación de propiedades geotécnicas como la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) en minería subterránea enfrenta múltiples desafíos debido a la naturaleza limitada y costosa de los datos

disponibles. La obtención de muestras representativas a partir de sondeos exploratorios implica altos costos y restricciones espaciales, dejando grandes áreas sin información directa (Ozturk & Simdi, 2013; Doostmohammadi et al., 2014). Este escenario se ve agravado por la práctica común de promediar valores geomecánicos dentro de dominios amplios, lo que ignora la variabilidad espacial intrínseca y genera incertidumbre en la caracterización del macizo rocoso (Séguret et al., 2014). Además, la falta de datos precisos puede comprometer la seguridad y efectividad de la planificación operativa, especialmente en zonas críticas como túneles o excavaciones profundas (Ramírez, 2022). Métodos geoestadísticos como el kriging han surgido como herramientas clave para abordar estas limitaciones, permitiendo estimar valores en áreas no muestreadas. Sin embargo, su tendencia a suavizar los datos genera una subestimación de los valores altos y una sobreestimación de los valores bajos, reduciendo la capacidad de representar con precisión la heterogeneidad espacial del macizo rocoso (Doostmohammadi et al., 2014; Séguret & Guajardo, 2015). Este efecto de suavizado subraya la necesidad de técnicas más avanzadas, como la simulación Gaussiana secuencial (SGS), que permite capturar con mayor realismo la variabilidad espacial de las propiedades geotécnicas, abordando así uno de los principales desafíos en este campo (Doostmohammadi et al., 2014; Pinheiro et al., 2016).

3.3. Geoestadística

La geoestadística es una ciencia basada en 4 expresiones (Emery & Seguret, 2020).

- Predecir o simular.
- Variables regionalizadas cuantitativas (como leyes de cobre) o categóricas (como facies en geología).

La geoestadística busca completar la información no disponible por medio de la estimación o simulación de las variables regionalizadas “equivocándose lo menos posible” (Emery & Seguret, 2020).

La principal referencia de la teoría y definiciones descritas en esta sección del marco teórico corresponden al Apunte de geoestadística de Xavier Emery del año 2007 y 2013.

3.3.1 La variable regionalizada

La geoestadística se enfoca en el estudio de fenómenos distribuidos espacialmente, como las propiedades geológicas o geotécnicas, que presentan **continuidad espacial** en su variabilidad y son conocidas como variables regionalizadas (ver Figura 2). Estas variables incluyen atributos como la ley de un mineral, la permeabilidad de una roca, el gradiente geotérmico, la densidad, el nivel de fracturamiento, y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS). Estos parámetros son fundamentales para la caracterización de los macizos rocosos y otras estructuras naturales, y se definen mediante una o más funciones desconocidas que representan fenómenos heterogéneos en el espacio (Doostmohammadi et al., 2014; Pinheiro et al., 2016).

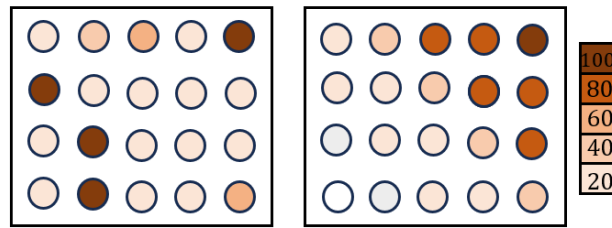


Figura 2. Comparación de variables, a la derecha variable regionalizada.
Fuente: Elaboración propia

3.3.2 El soporte

El soporte se refiere al espacio 2D o 3D sobre el cual se está considerando la variable regionalizada. Las modificaciones realizadas sobre este soporte generan efectos en la distribución estadística de los valores, dependiendo de si se aumenta o disminuye este. Al aumentar el soporte, los valores extremos tienden a disminuir, predominando los valores intermedios, mientras que cuando el soporte se disminuye, se observa un aumento de los valores extremos. Esto es un reflejo de cómo el soporte afecta la variabilidad de los datos: la varianza de una variable regionalizada depende del soporte en el que se defina.

Si se requiere combinar distintos soportes en un mismo estudio, es necesario que la variable regionalizada sea aditiva, es decir, que su valor en la unión de varios dominios sea igual a la media de sus valores sobre cada uno de esos dominios.

3.3.3 Estudio exploratorio de datos (EDA)

El Estudio Exploratorio de Datos (EDA) tiene como objetivo analizar la cantidad, calidad y distribución de los datos disponibles para identificar zonas de interés y detectar posibles valores atípicos que puedan afectar la precisión del análisis.

Parte de las herramientas utilizadas en el EDA incluyen:

Mapas de datos

Es la representación gráfica de los datos espaciales con sus valores asociados, para visualizar su distribución. Los mapas permiten identificar si el muestreo fue realizado de manera regular o irregular, facilitando la detección de zonas con mayor concentración de datos. El concepto de muestreo preferencial es relevante ya que las zonas con alta concentración de muestras pueden generar distorsiones estadísticas (ver Figura 3). Estas distorsiones pueden ser controladas mediante técnicas de desagrupamiento (*declustering*), utilizadas para reducir el impacto de la concentración de datos y asegurar que los resultados del análisis sean más representativos de la variabilidad espacial real del terreno.

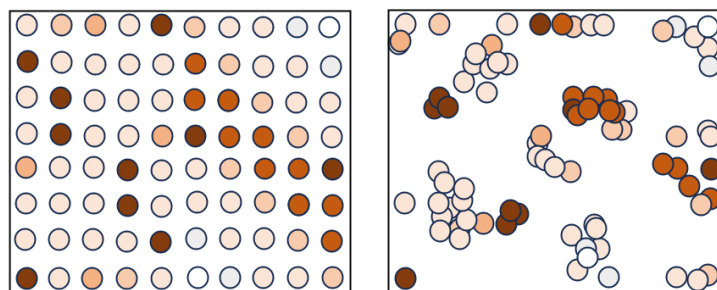


Figura 3. Muestreo regular (izquierda) y muestreo preferencial (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

Distribuciones estadísticas de los valores

- Histogramas (Gráficos de frecuencia): Permiten visualizar la distribución de los datos y facilitan la identificación de valores atípicos (outliers), que suelen ser valores con frecuencia 1 y distantes de la distribución principal.
- Estadísticas descriptivas: Involucra el uso de medidas como la media, los cuantiles, los valores mínimo y máximo, varianzas, desviaciones estándar, coeficientes de variación y rangos intercuartiles, entre otros.
- Desagrupamiento (*Declustering*): Se asignan pesos menores a los datos agrupados para evitar que distorsionen los resultados estadísticos. Estos pesos se determinan mediante el método de las celdas, un enfoque geométrico que no toma en cuenta la variabilidad espacial, solo las posiciones.
- Box plot: Representa los cuantiles 2.5%, 97.5% y los cuartiles 1 y 3. Es útil para identificar *outliers*, especialmente aquellos que se alejan significativamente del cuantil 2.5% o 97.5%.
- Gráficos de probabilidad: Permiten comparar la distribución de los datos experimentales con una distribución de referencia. Son útiles para detectar outliers cuando los datos siguen una línea recta en relación con la distribución de referencia, y un dato se desvía significativamente de esta.

Análisis multivariable

- Matriz de correlación: Esta herramienta permite evaluar el grado de relación entre varias variables regionalizadas. Se considera que existe una alta correlación cuando los valores son mayores a +0.7 o menores a -0.7, con 1 y -1 representando una correlación perfectamente positiva y negativa, respectivamente. Esta matriz facilita una interpretación rápida de las relaciones entre diferentes parámetros geotécnicos o geológicos.

Comportamiento espacial

- Se puede analizar el comportamiento espacial de una variable regionalizada graficando sus valores en función de una dirección específica. Generalmente, las comparaciones se realizan en relación con direcciones norte, este y la profundidad, ya que estas orientaciones permiten identificar patrones de anisotropía espacial que pueden influir en la distribución de los valores de la variable regionalizada.

3.3.4 La función aleatoria

En los modelos geoestadísticos, el valor $\mathbf{z(x)}$ de una variable regionalizada en un punto $\mathbf{x}$ del área $\mathbf{D}$ se considera una realización de una variable aleatoria $\mathbf{Z(x)}$. Cuando $\mathbf{x}$ recorre el área, se obtiene un conjunto de estas realizaciones, formando una función aleatoria. A diferencia de los modelos estadísticos tradicionales, las variables aleatorias en geoestadística no son independientes; están correlacionadas, lo que refleja cómo las variables cambian de manera continua en el espacio.

El valor que toma la variable en un punto se denota $\mathbf{z(x)}$, donde $\mathbf{x}$ corresponde a la ubicación de tal variable. $\mathbf{x}$ recorre el dominio de donde se estudia la variable regionalizada, en caso de la Figura 4, el cuadrado que encierra los valores del tipo $\mathbf{z(x)}$.

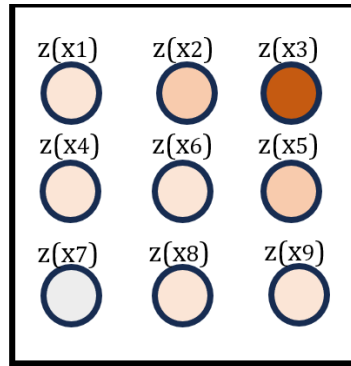


Figura 4. Ejemplo de valores de la variable regionalizada.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.5 Momentos de una función aleatoria

Para caracterizar una función aleatoria se hace uso de los momentos, estos permiten describir propiedades como la tendencia de los datos, su dispersión y dependencia espacial. Estos corresponden a:

- Momento de primer orden:

- Esperanza:

$$m(x) = E[Z(x)]$$

- Momentos de segundo orden:

- Varianza:

$$\sigma^2(x) = \text{Var}[Z(x)] = E\{[Z(x) - m(x)]^2\}$$

- Covarianza:

$$C(x_1, x_2) = E\{[Z(x_1) - m(x_1)][Z(x_2) - m(x_2)]\}$$

- Semi-variograma (Variograma):

$$\gamma(x_1, x_2) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x_1) - Z(x_2)]$$

3.3.6 Hipótesis de estacionaridad

Existen 2 desafíos al momento de realizar la inferencia estadística sobre la variable regionalizada:

1. Solo se dispone de una única realización de la función aleatoria.
2. Esta realización solo se conoce en algunas ubicaciones de muestreo.

Para abordar esta limitación, se plantea la hipótesis de estacionaridad, la cual permite sustituir la repetición sobre múltiples realizaciones (que no se tienen) por una repetición en el espacio. Esta hipótesis postula que la distribución de la función aleatoria es invariante bajo traslación. Es decir, las propiedades estadísticas (distribución espacial y momentos) no dependen de la posición absoluta en el espacio, sino únicamente de la posición relativa.

- La esperanza matemática $E[Z(x)]$ es constante en todo el dominio.
- La varianza $\text{Var}[Z(x)]$ también es constante en el espacio.
- La covarianza entre dos puntos x y $x + h$ depende solo del vector de separación h , no de las posiciones individuales.
- El variograma $\gamma(h)$ al igual que la covarianza es depende únicamente de la separación entre los puntos.

3.3.7 Variograma experimental

El variograma experimental es una herramienta clave para entender la continuidad espacial de una variable regionalizada, ya que refleja la relación entre los datos cercanos. A través de este, es posible analizar cómo interactúan los valores distribuidos en el espacio, proporcionando información valiosa sobre la dependencia espacial y la variabilidad de la variable estudiada.

Cálculo de variograma

Se considera una variable regionalizada z , que contiene un conjunto de datos conocidos. El cálculo del variograma se realiza mediante la sumatoria de la diferencia cuadrada de valores de z ubicados a una distancia h . Al graficar esta operación se ve reflejada la variabilidad espacial y permite entender cómo se correlacionan los valores de la variable en función de su separación espacial.

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

- $\hat{\gamma}(h)$ = Valor del variograma en la distancia h
- $N(h)$ = Hace alusión al número de h 's contados en la sumatoria, es decir, la cantidad de pares que participaron de la sumatoria.
- $z(x_\alpha)$ = Variable regionalizada en posición x_α
- $z(x_\beta)$ = Variable regionalizada en la posición x_β

Parámetros para construir el variograma:

1. Distancias (*lag*): Son los múltiplos de distancia a los que se calculará el variograma.
2. Dirección de interés: Es la inclinación o acimut a lo largo del cual se calculará el variograma. Por ejemplo, un acimut de 90° para calcular el variograma en la dirección Este.

Tolerancias en el calculo

Las mallas de muestreo suelen ser irregulares, lo que puede generar resultados erráticos en el cálculo del variograma para ciertas distancias h debido a la falta de suficientes valores que respeten esta distancia. Para solucionar este problema, se incorporan tolerancias en el cálculo, lo que mejora el cálculo de valores de variograma. Dependiendo de las dimensiones del estudio, se aplican tolerancias tanto en la distancia h como en los ángulos θ (ver Figura 5).

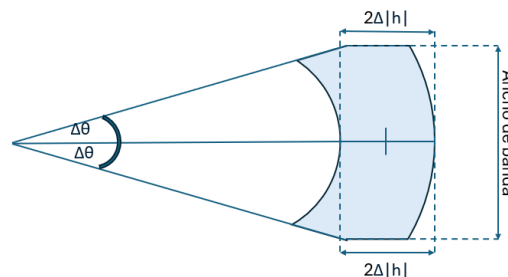


Figura 5. Tolerancias angulares en el cálculo del variograma.

Fuente: Elaboración propia.

Mapa Variográfico

El mapa variográfico es una herramienta que permite visualizar el variograma en todas las direcciones espaciales, facilitando la identificación de direcciones preferenciales, como anisotropías. Al analizar este mapa, se pueden determinar las direcciones en las que el variograma presenta una mayor estructura espacial, lo que permite realizar un análisis más detallado del comportamiento de la variable regionalizada en esas direcciones específicas (ver Figura 6).

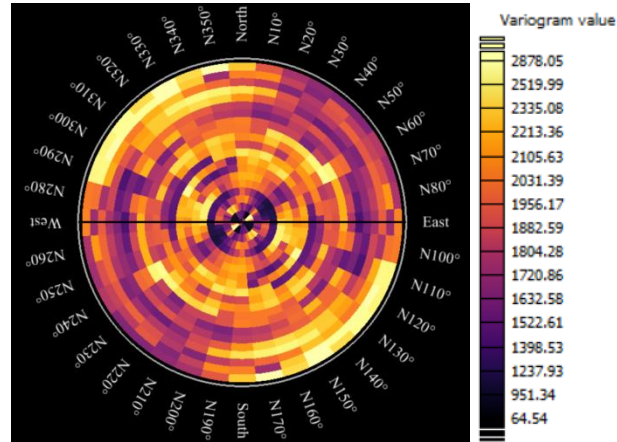


Figura 6. Mapa variográfico, realizado en Isatis.neo.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.8 Variograma modelado

El objetivo de obtener un variograma modelado es poder capturar de manera precisa el comportamiento espacial de la variable en todas las distancias de cálculo. Mientras que el variograma experimental solo ofrece información sobre las distancias observadas, su comportamiento no siempre es claro o coherente en todo el rango. El modelo de variograma, por su parte, permite una descripción más consistente y continua de la variabilidad espacial, facilitando una mejor interpretación y aplicación en la estimación geoestadística.

Propiedades:

- Nulidad en origen: $\gamma(0) = 0$.
- Positividad: $\gamma(h) \geq 0$.
- Paridad: $\gamma(h) = \gamma(-h)$.
- Comportamiento tendiendo al infinito: $\lim_{|h| \rightarrow \infty} \frac{\gamma(h)}{|h|^2} = 0$.
- Negativo condicional:

$$\forall k \in N^*, \forall \lambda_1, \dots, \lambda_k \in R \text{ tales que } \sum_{i=1}^k \lambda_i = 0, \forall \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_k \in D, \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \lambda_i \lambda_j \gamma(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) \leq 0$$

Para el modelamiento del variograma se debe comprender el comportamiento de las variables en cuanto a las distancias de cálculo. En distancias cortas lo esperable es que existan valores bajos de variograma, presentándose una alta correlación entre valores próximos pudiendo ser esta relación lineal (buena correlación) o parabólica (excelente correlación). También existen casos donde la variable puede ser errática,

los datos cambian en distancias muy cortas. Este efecto es conocido como “efecto pepita”, por las leyes de yacimientos de oro.

En cambio, para grandes distancias la correlación se pierde y se llega a un punto donde el valor de variograma no presenta más fluctuaciones, es decir, se estabiliza. Este valor se denomina meseta (C), el cual corresponde al valor de la varianza. La distancia a la cual se alcanza esta estabilidad se le llama alcance (a) (ver Figura 7). La meseta es igual a la varianza a priori:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \rightarrow (|h| \rightarrow \infty) \rightarrow \gamma(\infty) = C(0) = \sigma^2$$

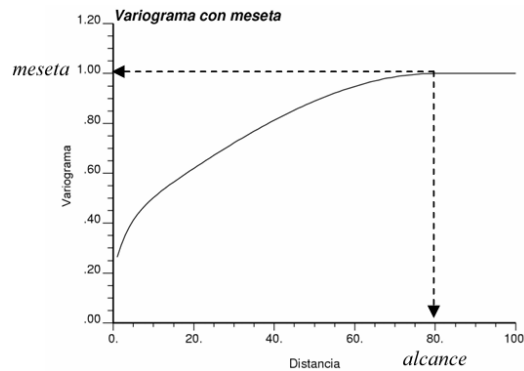


Figura 7. Meseta y alcance de un variograma.
Fuente: Apunte geoestadística (Emery, 2007).

Modelos típicos de variograma

1. Efecto pepita:

El variograma alcanza inmediatamente su meseta, ausencia total de correlación espacial. Considerar condición 0 en $h=0$ por definición de variograma.

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

2. Modelo esférico:

Modelo continuo espacialmente hasta alcanza la distancia “a”.

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

3. Modelo exponencial:

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

Este variograma modelado llega al 95% de su meseta, es asintótico a esta.

Modelos anidados

Consiste en el uso de distintos modelos empleados para ajustarse de la forma más cercana a la realidad a los datos experimentales, producto de cambios de pendiente, efectos pepita presentes en los datos u otros cambios espaciales. Un ejemplo sería:

$$\gamma(h) = \gamma_{1(h)} + \gamma_{2(h)} + \dots + \gamma_{S(h)}.$$

Detección de anisotropías

Las anisotropías se deben a cambios del comportamiento espacial de las variables respecto del cálculo del variograma en diferentes direcciones, existen dos tipos:

1. **Geométricas:** Es cuando en dos direcciones existe una diferencia en los alcances de cada meseta (ver Figura 8).

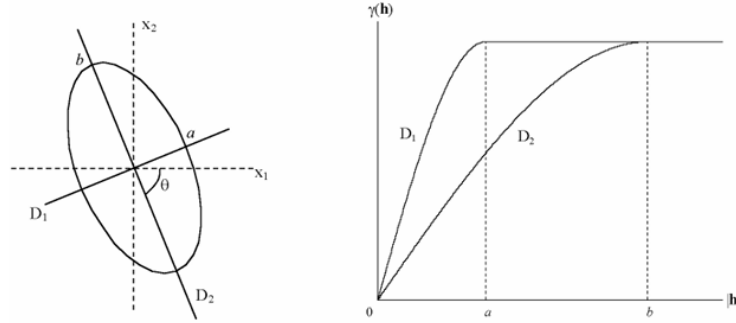


Figura 8. Mapa variográfico y variograma con anisotropía geométrica.

Fuente: Apunte de geoestadística (Emery, 2007).

2. **Zonales:** Es cuando existe una diferencia en los valores en la meseta de los datos (ver Figura 9).

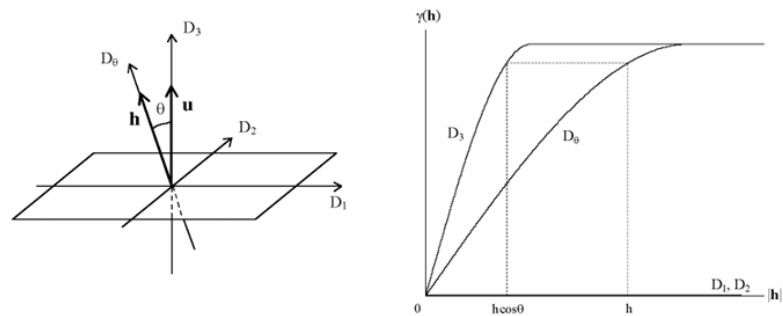


Figura 9. Mapa variográfico y variogramas con anisotropía zonal (D1 vertical, D2 y D3 horizontal, D0 oblicua).

Fuente: Apunte de geoestadística (Emery, 2007).

3.3.9 Kriging

El kriging es un método geoestadístico de interpolación empleado para la estimación de valores en zonas no muestreadas. Es el mejor estimador lineal insesgado (BLUE) que considera la dependencia espacial de los datos para determinar valores desconocidos.

Restricciones

- **Linealidad:**

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

x_0 corresponde al lugar donde se realizará la estimación, a es una incógnita del kriging, λ hace alusión a los ponderadores y $Z(x_{\alpha})$ corresponde al valor de las variables en posiciones conocidas x_{α} .

Notar que cada $Z(x_\alpha)$ tiene un λ_α asociado. Cada valor de la variable tiene un ponderador asociado, dependiente de su posición respecto de x_0 .

- **Restricción de insesgo:**

El promedio de las diferencias entre el valor estimado y real son 0.

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

- **Restricción de optimalidad:**

Los ponderadores calculados minimizan la varianza del error de la estimación. El método minimiza el error cuadrático promedio.

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

Vecindad de kriging

La vecindad de kriging corresponde a el espacio sobre el cual se encuentran los datos empleados y donde también se realiza la estimación.

- Vecindad única: Cuando se efectúa el kriging con todos los datos de la vecindad de kriging.
- Vecindad móvil: Se usan solo una cantidad de datos cercanos, se determina un tamaño y forma de la vecindad (ver Figura 10).

Es ideal que al momento de definir la vecindad móvil se tome en cuenta, en caso de existir, la anisotropía de la variable regionalizada. De esta forma las dimensiones de la vecindad se relacionan con la orientación y alcances de estas anisotropías, en forma de elipsoide.

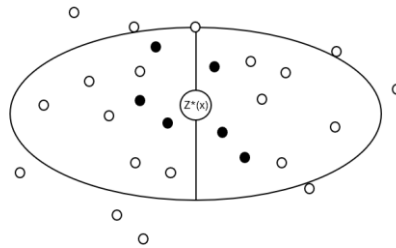


Figura 10. Elipsoide de búsqueda con dos sectores angulares y de máximo 3 muestras por sector.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.10 Kriging de media conocida o kriging simple (KS)

Al conocer la media e incluir las restricciones el estimador queda de la forma:

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

Donde:

- $Z^*(u)$: Estimación en la ubicación u .
- λ_i = Ponderador asignado al dato $Z(u_i)$.
- m : Media conocida de la variable.

- $\sum \lambda_i$: Suma de ponderadores de los datos.

Es importante notar que mientras más lejos está u de los datos, los ponderadores serán inferiores y mayor será la ponderación de la media, compensando así la falta de información.

3.3.11 Kriging de media desconocida u ordinario (KO)

No requiere conocer la media global.

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

Donde:

- $Z^*(u)$: Estimación en la ubicación u .
- λ_i = Ponderador asignado al dato $Z(u_i)$.

Es importante notar que, al ser la media desconocida, se impone por la condición de insesgo:

$$a = 0 \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

3.3.12 Propiedades del Kriging

- Interpolación exacta: La estimación de un valor conocido entrega el mismo valor, esto se debe a las restricciones (insesgado, error de varianza mínimo).
- Suavizamiento: Sobre estima valores bajos y subestima valores altos. Por este motivo no es bueno emplearlo para detectar valores sobre o bajo cierto umbral máximo o mínimo respectivamente.

3.3.13 Validación cruzada

Se comparan los valores reales con la estimación de estos mismos según valores vecinos, con el objetivo de verificar la calidad de la estimación. De esta forma se calcula un error de estimación. Se grafica y se analiza su correlación.

3.3.14 Simulación geoestadística condicional

La simulación geoestadística se basa en la construcción de variables regionalizadas similares a las de estudio por medio de realizaciones. Que la simulación sea condicional refiere a que la función aleatoria posea el mismo valor que los datos conocidos en sus respectivas posiciones. La ventaja de este método es que a diferencia del kriging, por medio de las realizaciones podemos obtener la misma variabilidad espacial que la de la variable regionalizada.

Propiedades:

- Interpolación exacta.
- Insesgada (error esperanza nulo).
- No suaviza (no sobreestima ni subestima valores).
- No es precisa (la diferencia entre el valor estimado y el real no tiene una varianza mínima).

Si bien la última corresponde a una debilidad, las múltiples realizaciones mitigan esta imprecisión, permitiendo la obtención de la variabilidad espacial real de la variable regionalizada.

Para realizar las simulaciones se vuelve necesario conocer todas las distribuciones de probabilidad multivariantes.

Anamorfosis (transformación Gaussiana)

Consiste en deformar el histograma dejando su media en 0 y su varianza 1 (ver Figura 11).

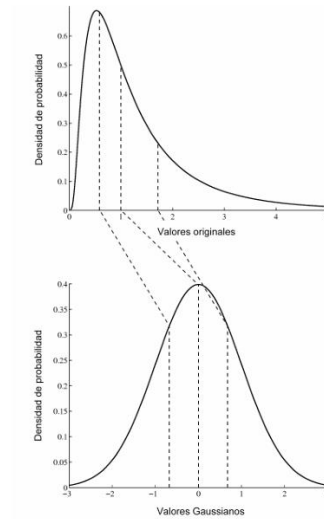


Figura 11. Anamorfosis de datos con comportamiento log-normal.
Fuente: Apunte geoestadística (Emery, 2007).

Se denota:

- Z: función aleatoria que representa a la variable original.
- Y: función aleatoria que representa a la variable transformada.
- F(z): función de distribución (histograma acumulado) de Z.
- G(y): función de distribución de Y (Gaussiana de media 0 y varianza 1).

Cada valor de la variable original se le asocia un valor Gaussiano $F(z) = G(y)$ (ver Figura 12).

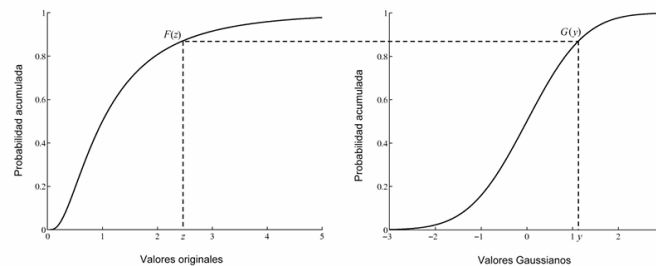


Figura 12. Anamorfosis por medio de igualdad $F(z) = G(y)$.
Fuente: Apunte geoestadística (Emery, 2007).

La función anamorfosis Gaussiana relaciona los valores Gaussianos con los originales según:

$$\phi = F^{-1} \circ G$$

$$\forall x \in D, \quad Z(x) = \phi[Y(x)]$$

Esto permite devolver los valores Gaussianos a los originales. Esto solo aplicable a variables continuas.

Modelo multi-Gaussiano

El conjunto de valores Gaussianos posee una distribución multivariable (de ahí su nombre):

$$g(y_1, \dots, y_n) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n \sqrt{\det(C)}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} y C^{-1} y' \right\}$$

y corresponde al vector, C corresponde a la matriz varianza – covarianza de los datos Gaussianos. De esta forma se caracteriza de forma completa la función aleatoria Gaussiana. Este modelo debe ser validado antes de iniciar las realizaciones (verificando las distribuciones de orden superior como bivariantes, trivariantes, etc.), esto se lleva a cabo con 3 pruebas:

1. Nubes de correlación diferida:

La densidad de probabilidad conjunta de los valores $Y(x)$ e $Y(x+h)$ separados por una distancia h , corresponde a:

$$g(y_1, y_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho(h)^2}} \exp \left\{ -\frac{y_1^2 - 2\rho(h)y_1y_2 + y_2^2}{2(1-\rho(h)^2)} \right\}$$

A menor h , la nube de correlación se agrupa en la bisectriz debido a la mayor correlación. Cuando h aumenta la nube toma forma circular, debido a la baja o nula correlación entre $y(x)$ e $y(x+h)$.

2. Comparación entre variograma y madograma:

El madograma se calcula según:

$$\gamma_1(h) = \frac{1}{2} E\{|Y(x+h) - Y(x)|\}$$

Este madograma debe cumplir con la siguiente relación respecto del variograma:

$$\frac{\sqrt{\gamma(h)}}{\gamma_1(h)} = \sqrt{\pi} \approx 1.77 \quad (\text{independiente de } h)$$

3. Variograma de indicadores:

Se determina un indicador según un umbral determinado y :

$$I_y(\mathbf{x}; y) = \begin{cases} 1 & \text{si } Y(\mathbf{x}) < y \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Existe una relación entre el variograma de la variable Gaussiana y el variograma del indicador:

$$\gamma_{I,y}(h) = G(y)[1 - G(y)] - \frac{1}{2\pi} \int_0^{\arcsin[1-\gamma(h)]} \exp \left[-\frac{y^2}{1 + \sin \theta} \right] d\theta$$

En la práctica se compara visualmente los variogramas de los indicadores con los de la variable Gaussiana revisando que los alcances sean similares.

Una vez validado el modelo se define el algoritmo para construir las realizaciones del modelo bajo la condición de la información disponible.

3.3.15 Algoritmo secuencial

Para simular la función aleatoria Gaussiana en los sitios $\{u_1, \dots, u_m\}$ condicionada a los valores Gaussianos $\{x_1, \dots, x_n\}$ el algoritmo funciona de la siguiente forma para cada sitio u_i ($i = 1, \dots, m$).

Se realiza el kriging de $Y(u_i)$ a partir de los valores condicionantes $\{Y(x_1), \dots, Y(x_n)\}$ y respecto de los valores previamente simulados $\{Y(u_1), \dots, Y(u_{i-1})\}$, obteniéndose así un valor estimado $Y^*(u_i)$ y una desviación estándar $\sigma^*(u_i)$.

Se simula un valor Gaussiano, cuya media es igual a $Y^*(u_i)$ y cuya desviación estándar es $\sigma^*(u_i)$.

$$Y(u_i) = Y^*(u_i) + \sigma^*(u_i)N_i$$

N_i corresponde a la variable aleatoria Gaussiana, con su respectiva media 0 y varianza 1, cada una independiente $N_1, \dots, N_{i-1}$ y de los datos originales $Y(x_1), \dots, Y(x_n)$.

Es de esta forma que se simulan los valores en las posiciones u_i , las cuales para la próxima simulación u_{i+1} son empleadas también como datos condicionantes. Los valores se estiman con kriging simple (ya que la media es conocida = 0).

Como se entiende, el método es acumulativo, por lo tanto, cada vez que se simula un valor, el siguiente tiene mayor cantidad de información que considerar para su nueva estimación. Esto lo vuelve un método lento, pero pueden considerarse vecindades móviles para mitigar este problema, se puede hacer uso de grillas múltiples o una aleatorización de la secuencia de simulación.

4. Metodología

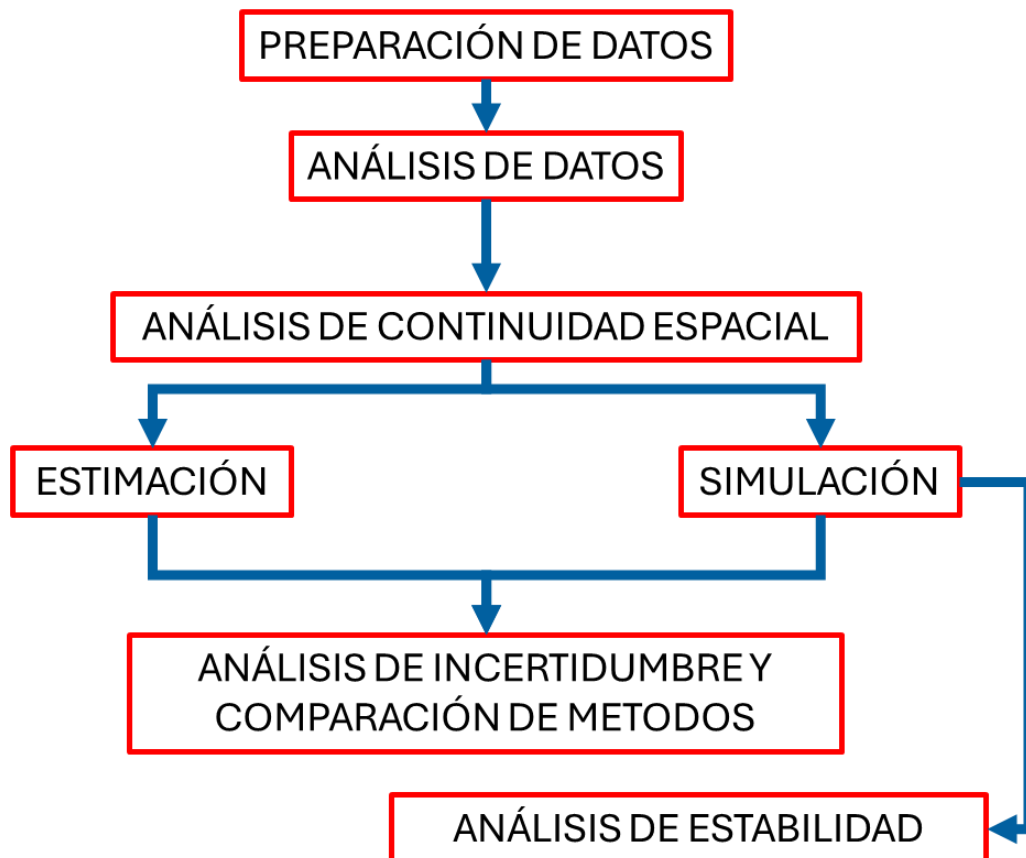


Figura 13. Esquema de la metodología aplicada.
Fuente: Elaboración propia.

4.1. Preparación de datos

La obtención y organización de la información disponible se realiza identificando claramente los datos relevantes, tales como ubicación, identificación de pozos, profundidad, acimut e inclinación, además de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), parámetro geomecánico de interés. Este proceso es clave para identificar la calidad y completitud de los datos, donde la caracterización es fundamental para establecer correlaciones espaciales confiables entre los parámetros del macizo rocoso (Aalianvari et al., 2018).

4.2. Análisis de datos

En esta etapa, se analizan la cantidad, calidad y distribución de los datos mediante herramientas gráficas y cálculos estadísticos. Se generan mapas de las variables de interés para identificar patrones espaciales y posibles anomalías. El cálculo de estadísticas básicas, como la media, mediana y desviación estándar, proporciona una descripción preliminar de las variables analizadas. Además, se desarrollan histogramas, boxplot y gráficos de probabilidad, lo que permite evaluar la distribución de los datos y compararla con distribuciones conocidas como la normal o log-normal. También se analiza el desagrupamiento de datos para la corrección de posibles sesgos en la malla de muestreo, reduciendo la redundancia causada por el agrupamiento de muestras. (Pinheiro et al., 2016).

4.3. Análisis de continuidad espacial (Isatis.neo)

El análisis de continuidad espacial se lleva a cabo mediante la elaboración de variogramas experimentales en diversas direcciones, lo que permite identificar anisotropías y evaluar la correlación espacial de las variables (Doostmohammadi et al.; 2014). Los mapas variográficos facilitan la interpretación de las estructuras de dependencia espacial en el área de estudio, como anisotropías geométricas o zonales. La modelación de variogramas ajusta modelos teóricos (como esférico, exponencial o Gaussiano) a los variogramas experimentales, asegurando que las estructuras espaciales se representen adecuadamente en los análisis posteriores.

4.4. Estimación por medio de Kriging Ordinario (Isatis.neo)

El método de kriging ordinario se utiliza para estimar valores en puntos no muestreados una vez que se han ajustado los variogramas modelados. Este enfoque, reconocido como el mejor estimador lineal insesgado (BLUE), minimiza la varianza de estimación y garantiza la ausencia de sesgos sistemáticos (Ozturk & Simdi, 2014). Para evaluar la precisión de las estimaciones, se realiza una validación cruzada comparando los valores estimados con los observados, utilizando gráficos de dispersión y análisis de error cuadrático.

4.5. Simulación geoestadística condicional (Isatis.neo)

Este proceso comienza con la transformación de los datos a una distribución Gaussiana estándar mediante anamorfosis, lo que asegura que las propiedades estadísticas sean consistentes con los supuestos de la simulación (Sánchez et al., 2021). Posteriormente, se genera un conjunto de realizaciones condicionales (generalmente ≥ 100), verificando que estas reproduzcan los histogramas y variogramas originales (Pinheiro et al., 2016). Este enfoque permite capturar la heterogeneidad espacial y reducir el efecto suavizante característico de las estimaciones basadas únicamente en kriging. Una vez completadas las simulaciones, se realiza la transformación inversa para devolver los datos simulados a su escala original, y se generan

mapas resumen como E-type y de incertidumbre para su interpretación final (Doostmohammadi et al., 2014).

4.6. Comparación de métodos

Se realiza una comparación entre los resultados obtenidos mediante kriging ordinario y simulación geoestadística secuencial, analizando similitudes y diferencias en la representación de las estructuras espaciales, valores extremos y suavizado de los resultados. Esto permite identificar las fortalezas y limitaciones de cada enfoque en el contexto del proyecto específico.

4.7. Medición de incertidumbre y análisis de estabilidad

Por último, se crean mapas de probabilidad basados en las realizaciones obtenidas de la simulación Gaussiana secuencial, lo que permite evaluar la probabilidad de que los valores superen o no ciertos umbrales críticos (Hekmatnejad et al., 2017). Este cálculo permite relacionar estos mapas con el cálculo del parámetro geomecánico profundidad de falla, con los cuales se puede determinar la probabilidad de que se produzca o no laminamiento en los bordes de las excavaciones, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones y planificación en proyectos geotécnicos.

5. Caso de estudio

5.1. Base de datos

La información recopilada y empleada para el desarrollo del caso correspondió a:

- Archivo *Collars*: Identificación y coordenadas de los sondajes.
- Archivo *Survey*: Identificación y buzamiento de los sondajes por medio de dirección e inclinación.
- Archivo *Assay*: Identificación y resistencia a la compresión uniaxial, incluyendo información de tramos de sondaje en los cuales el parámetro fue determinado.

Los archivos fueron importados a Isatis.neo, software con el cual se trabajó.

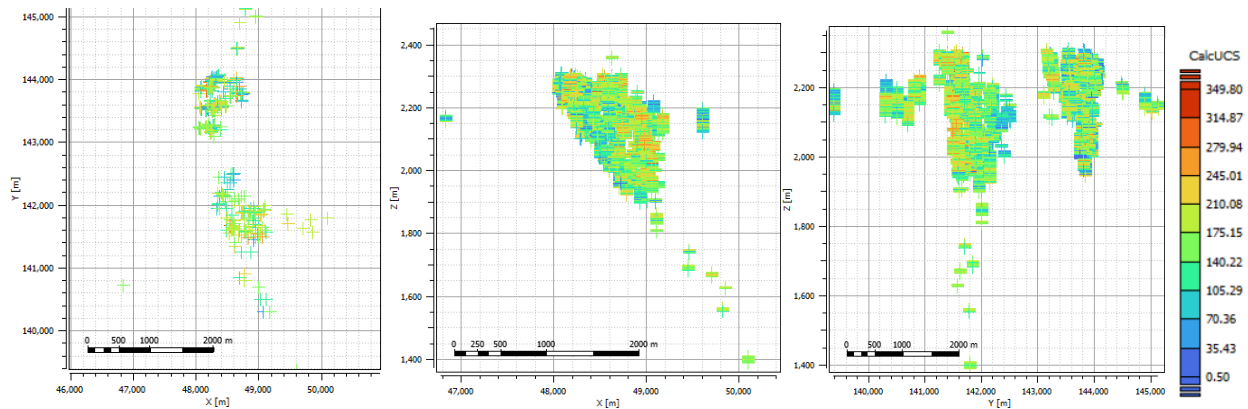


Figura 14. Vista de los datos. a) Planta. b) Perfil este. c) Perfil norte.

Fuente: Elaboración propia.

Se identificaron dos principales concentraciones de datos en los mapas (Figura 14.a), separados por la coordenada $Y = 143000$. En esta zona existió aproximadamente una distancia de 500 metros sin valores de UCS, lo que no aportó información de continuidad espacial. Por este motivo se decidió realizar el análisis de datos por separado en las zonas norte y sur con el fin de garantizar una interpretación representativa del parámetro geomecánico.

Previo a esta segmentación, se aplicó un compositado de los datos a intervalos de 5 metros (Gráfico 1 y Tabla 2). Esta decisión tuvo como objetivo mejorar la continuidad espacial y facilitar el análisis variográfico de la zona sur, de igual forma fue realizado en la zona norte. Se observó que el uso de intervalos menores complicaba el ajuste del modelo de variograma, dificultando etapas posteriores del modelamiento geoestadístico. Las pruebas se adjuntan en la sección 1 del anexo.

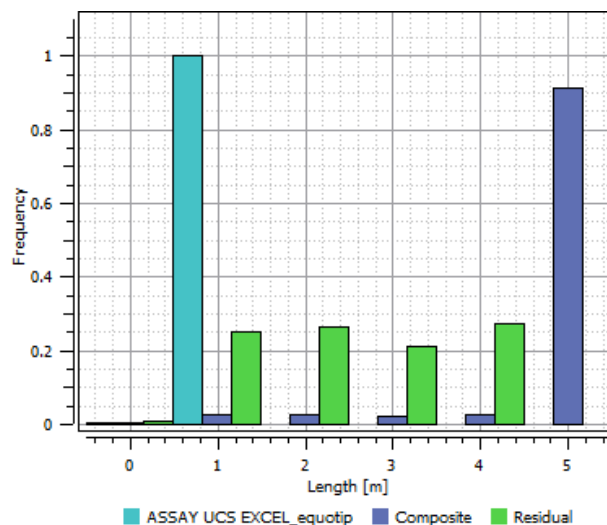


Gráfico 1. Histograma antes y después del compositado.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Estadística antes y después del compositado.
Fuente: Elaboración propia.

Variable	Table	Total Count	Defined Count	Mean	Variance	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Minimum	Maximum
CalcUCS	Raw	8784	8784	158.7	2738	52	0.330	0.5	350
	Composite	1839	1752	158.8	1683	41	0.258	3.3	286
	Residual	167	80	150.7	1555	39	0.262	25.6	243
Length [m]	Raw	8784	8784	1	6.39E-04	0.025	0.025	0.2	1.0
	Composite	1839	1839	4.77	0.65	0.807	0.169	0.3	5.0
	Residual	167	167	2.47	1.36	1.168	0.472	0.3	4.4

Los efectos del compositado fueron una reducción de la varianza de 2738 a 1683, reducción de la desviación estándar de 52 a 41 MPa, una reducción del coeficiente de variación de 0.330 a 0.258. Aumento del mínimo de 0.5 a 3.3 y reducción del máximo de 350 a 286. Esta reducción de la variabilidad si bien ayudó a una mejor estimación de valores tambien suaviza los resultados, por lo que fue importante la etapa de validación para verificar que el compositado no haya afectado la representatividad y estructura de los datos.

5.2. Zona Sur

5.2.1 Estudio exploratorio de datos

Mapas de datos

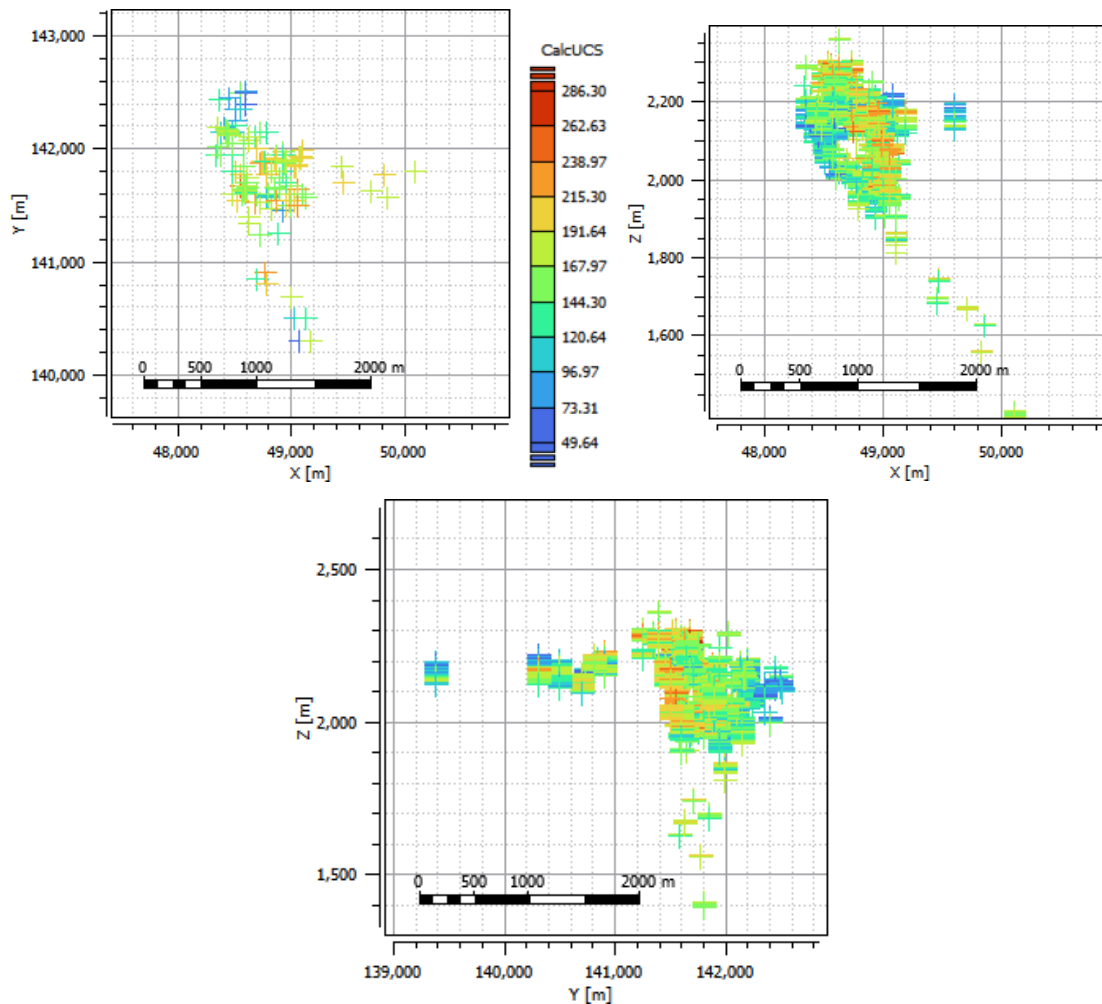


Figura 15. Vista de los datos en zona sur. a) Planta. b) Perfil este. c) Perfil norte.

Fuente: Elaboración propia.

En base a los mapas y sus distintas vistas (ver Figura 15), se observó una alta dispersión en los datos ubicados al Este, por sobre la coordenada 49.250. Además, la profundidad de estos puntos también influyó negativamente en la estimación, ya que correspondieron a pequeños tramos de sondajes sin datos cercanos. De manera similar, hacia el Norte, los datos situados bajo la coordenada 141000 se encontraron igualmente dispersos y provinieron de una cantidad reducida de sondajes. En promedio, la distancia entre los sondajes dispersos y aquellos pertenecientes a la concentración principal fue de aproximadamente 200 metros. Por lo tanto, estos sondajes no resultaron óptimos para caracterizar la continuidad espacial del parámetro en estudio.

Los mapas filtrados se presentan en la Figura 16.

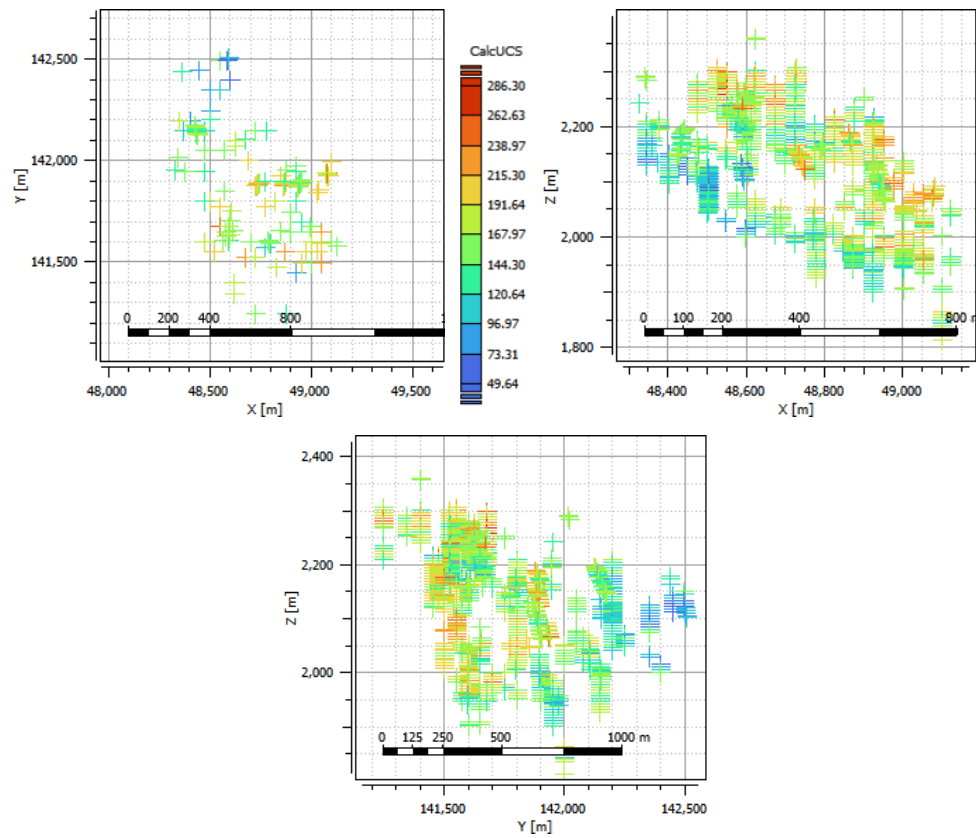


Figura 16. Vista datos zona sur filtrados. a) Planta. b) Perfil este. c) Perfil norte.

Fuente: Elaboración propia.

Estadística descriptiva y cuantiles

Tabla 3. Estadística descriptiva zona sur.

Fuente: Elaboración propia.

	Total	Defined	Mean	Variance	Standard	Coefficient	Min	Max
	Count	Count			Deviation	of Variation		
UCS[MPa]	883	836	161.5	1424	37.7	0.2337	49.6	286.3
X [m]	883	883	48737	41839	205	4.20E-03	48326	49123
Y [m]	883	883	141780	76160	276	1.95E-03	141247	142506
Z [m]	883	883	2117	11255	106	0.050	1809	2361

Tabla 4. Cuantiles zona sur.

Fuente: Elaboración propia.

	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Geometric	Harmonic	Skewness	Kurtosis
	5.00%	10.00%	25.00%	50.00%	75.00%	90.00%	95.00%	Mean	Mean		
UCS[MPa]	97	113	135	162	188	208	222	157	151	-0.118	2.87
X [m]	48403	48475	48575	48724	48922	49002	49052	48737	48736.12	0.021	1.92
Y [m]	141450	141497	141573	141675	141950	142198	142248	141780	141779.4	0.593	2.59
Z [m]	1947	1967	2032	2131	2200	2253	2275	2114	2111.2	-0.273	2.26

La estadística descriptiva (ver Tabla 3) indicó un total de 883 muestras de UCS, con un promedio de 157 MPa, una desviación estándar de 37.7 MPa y una varianza de 1424. En base a los cuantiles (ver Tabla 4) se apreció que la media es muy cercana a la mediana. El mínimo fue de 49.6 MPa, mientras que el máximo fue de 286.3 MPa, alejados de los cuantiles 5% y 95%. Se realizaron análisis posteriores para identificar posible presencia de datos atípicos o heterogeneidades locales.

Histograma

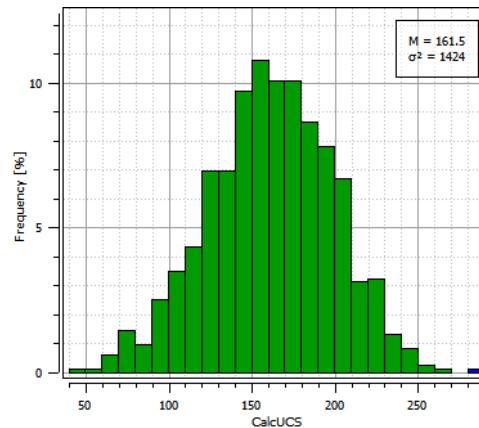


Gráfico 2. Histograma valores UCS zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

Se apreció una distribución de los datos similar a la normal (ver Gráfico 2). No se identificaron valores extremos alejados de la concentración principal de valores. La moda de los datos se encuentra entre los valores 150 – 160.

Boxplot

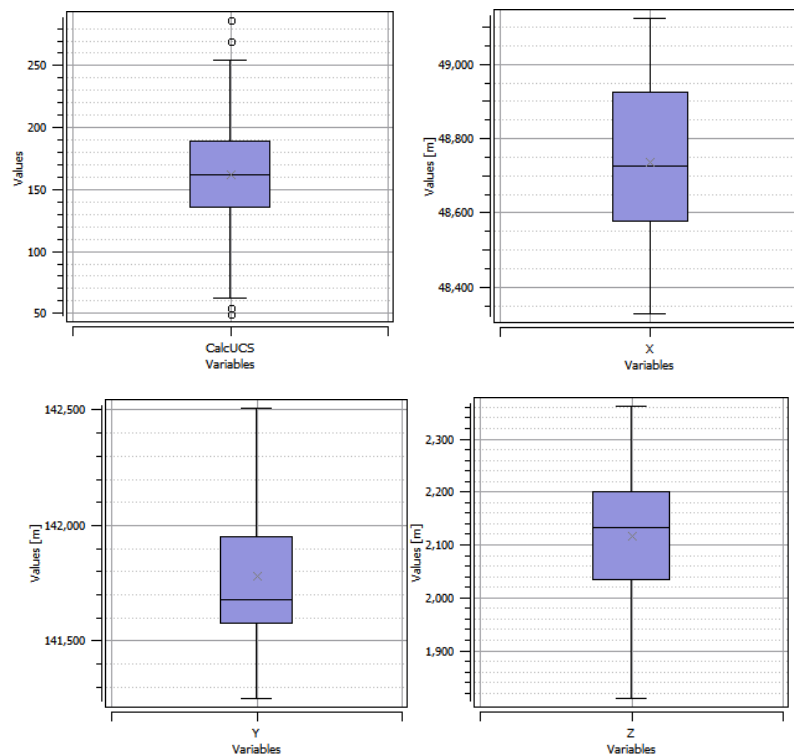


Figura 17. Boxplot valores zona sur. a) UCS. b) Coordenada x. c) Coordenada y. d) Coordenada z.
Fuente: Elaboración propia.

El boxplot de UCS presentó una distribución simétrica con una mediana cercana a 160 MPa, los datos principalmente se agrupan entre los valores 130 y 190 MPa. Como ya se había contemplado en el análisis previo de cuantiles se obtuvieron posibles atípicos por debajo de los 75 MPa y por sobre los 250 MPa (ver Figura 17.a).

En la Figura 18 se analiza la ubicación de los valores que se encuentran fuera de los límites del boxplot, se concluyó que estos no corresponden a valores atípicos ya que se encuentran en zonas de bajos y altos valores respectivamente.

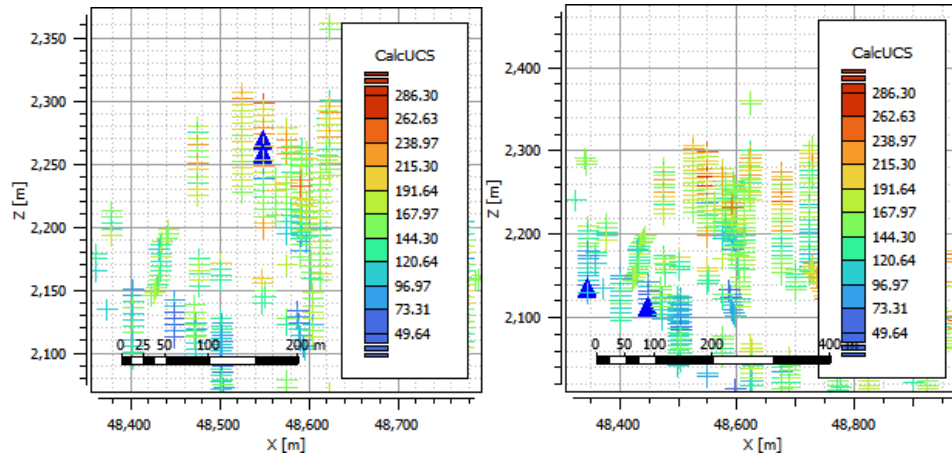


Figura 18. Valores fuera límites zona sur. a) Valores sobre límite superior. b) Valores bajo límite inferior.
Fuente: Elaboración propia.

Gráficos de probabilidad

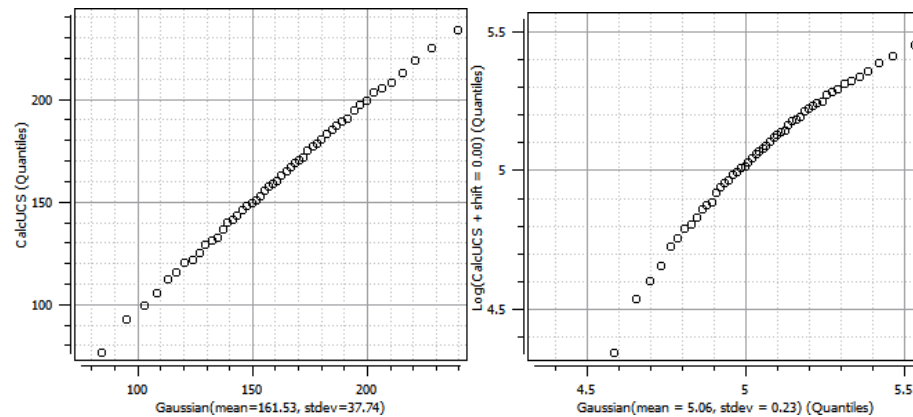


Gráfico 3. Gráfico de probabilidad zona sur. a) Distribución normal. b) Distribución log-normal.
Fuente: Elaboración propia.

Se apreció en el Gráfico 3.a que los datos se ajustaron adecuadamente a la diagonal de este, lo que indicó que estos presentan un comportamiento similar a la distribución normal. Por el contrario, el Gráfico 3.b presentó una notoria curvatura, indicando un menor ajuste.

Comportamiento direccional

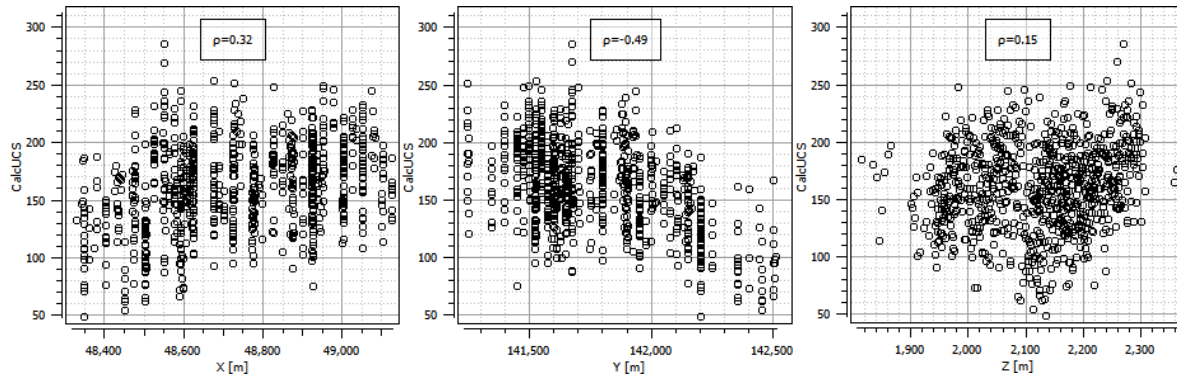


Gráfico 4. Nubes direccionales zona sur. a) Este. b) Norte. c) Cota.

Fuente: Elaboración propia.

Ninguna de las 3 direcciones indicó una correlación relevante, los valores presentan una ligera tendencia de aumento hacia el Este y una disminución hacia el Norte (ver Gráfico 5, a y b). En la Cota no se apreció tendencia alguna.

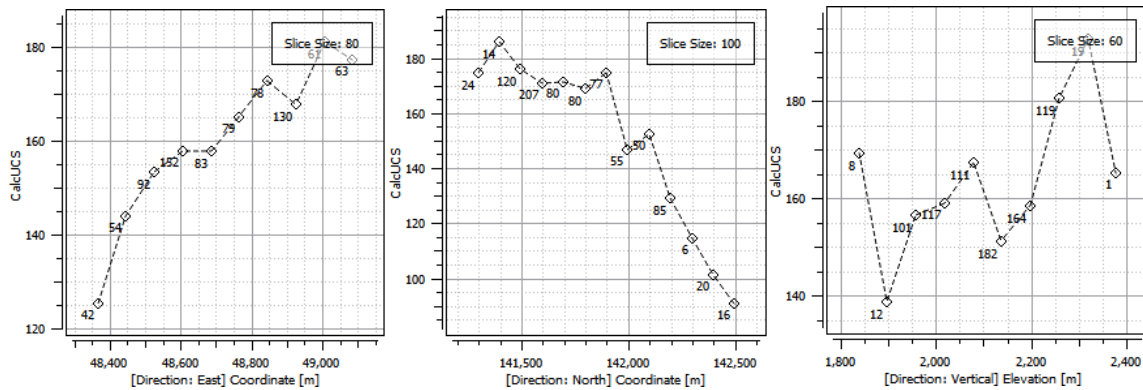


Gráfico 5. Swath plot zona sur. a) Dirección este. b) Dirección norte. c) Cota.

Fuente: Elaboración propia.

El Swath plot consisten en realizar cortes y calcular valores promedio de los datos que se encuentran dentro de este. En el Gráfico 5.a se apreció un aumento sostenido de los valores de UCS en la dirección este y una disminución de valores en la dirección norte en el Gráfico 5.b. En el Gráfico 5.c el comportamiento de la cota es poco continuo, presentando los máximos valores en la altura 2300.

La baja cantidad de datos en algunos cortes permitió comprender la baja correlación del UCS con las direcciones en los gráficos de nubes direccionales, por ejemplo, en los cortes posteriores a la coordenada 142200 en la coordenada norte.

Desagrupamiento

El desagrupamiento no fue realizado, esto debido a que los valores antes y después de este tuvieron leves variaciones, además de que la ventana de desagrupamiento recomendada por el software fue de dimensiones superiores a la mitad del dominio sobre el cual se encontraban los datos (ver Gráfico 6). Esto puede producir distorsión en las estructuras espaciales y en consecuencia un mal análisis de estas.

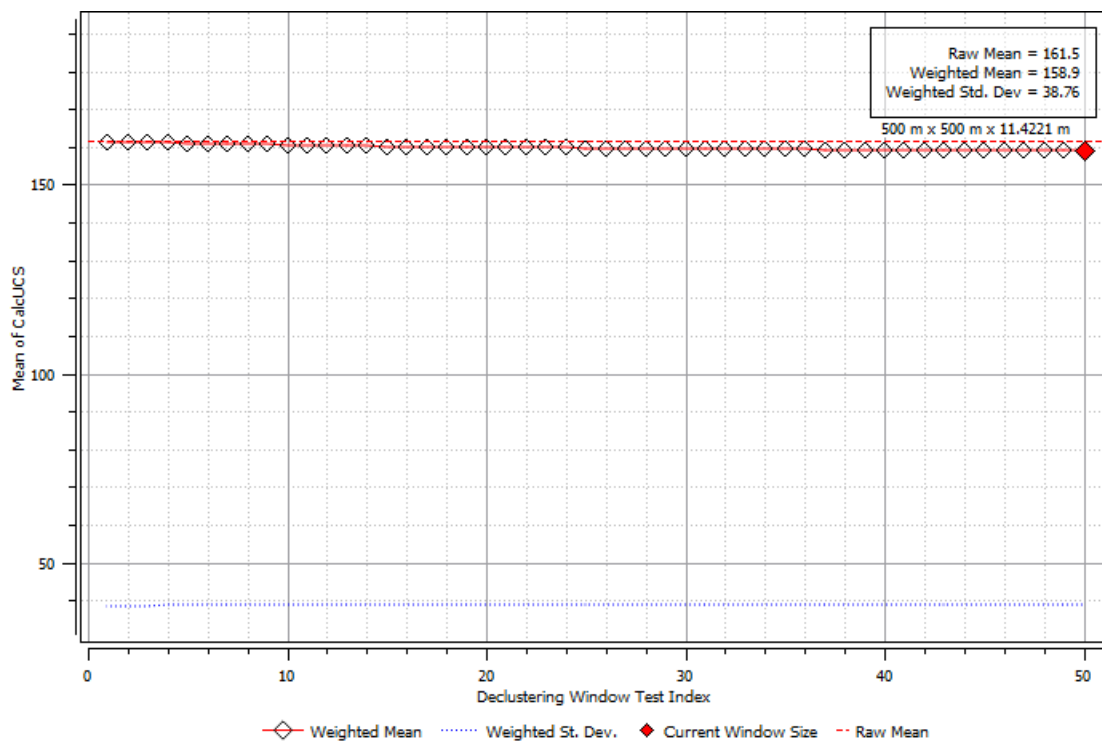


Gráfico 6. Efecto desagrupamiento zona sur (rango 100 a 500 metros).
Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Análisis de continuidad espacial

Construcción del variograma

Inicialmente se realizó el mapa variográfico para identificar direcciones de mayor continuidad espacial (ver Figura 19).

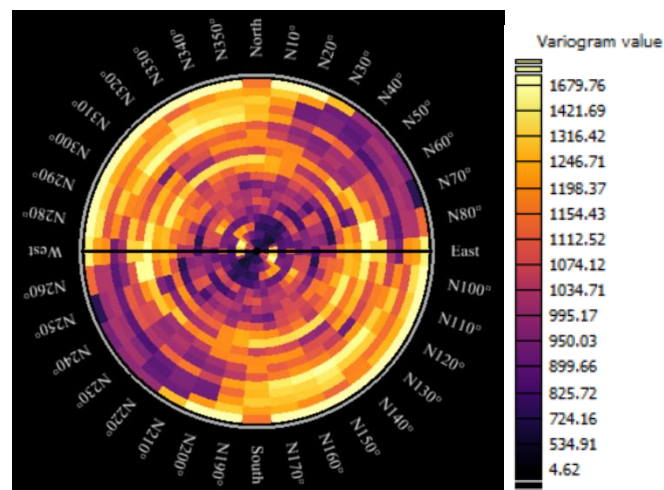


Figura 19. Mapa variográfico zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

Al no ser claras estas direcciones se optó por iterar en todas las direcciones calculando cada variograma y eligiendo el con mejor continuidad espacial (ver anexo 10.1.1, casos compósitos 5 metros). Se determinó la dirección N350° como la de mejor continuidad espacial.

Los parametros de cálculo del variograma se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5. Parametros de confección variograma experimental zona sur.

Fuente: Elaboración propia.

Parametros variograma			unidades
N350°	lag	76.5	m
	tol angular	45	°
	dist max	700	m
N260°	lag	76.5	m
	tol angular	45	°
	dist max	700	m
Profundidad	lag	19	m
	tol angular	45	°
	dist max	200	m

Los variogramas experimentales obtenidos se presentan en el gráfico Gráfico 7.a y Gráfico 7.b.

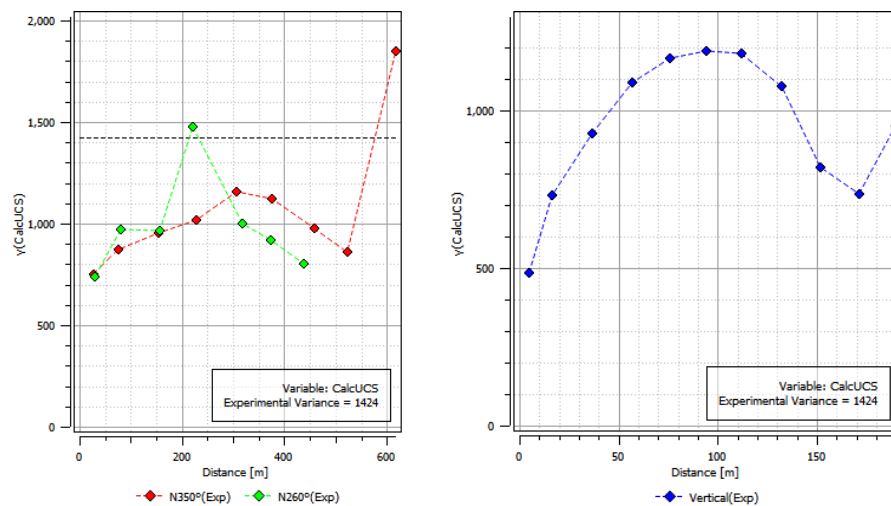


Gráfico 7. Variograma experimental zona sur. a) Horizontal. b) Vertical.

Fuente: Elaboración propia.

Variograma modelado

En base a los variogramas experimentales, distintos modelos fueron ajustados para representar la continuidad espacial de los datos, los modelos empleados fueron los siguientes:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \cdot \gamma_{\text{esf}}(h) + C_2 \cdot \gamma_{\text{exp}}(h)$$

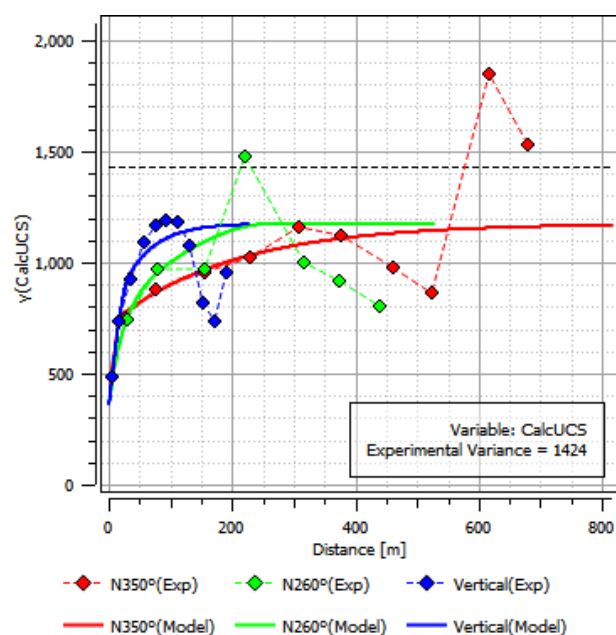


Gráfico 8. Variograma modelado zona sur.

Fuente: Elaboración propia.

Según el gráfico del variograma modelado se determinó el alcance en sus direcciones, siendo 450 metros en la dirección N350, 220 metros en N260 y 100 metros en profundidad. Estos valores correspondieron al caso base para la vecindad de kriging.

5.2.3 Kriging Ordinario

Para la estimación por kriging ordinario se hizo uso de la herramienta KNA de Isatis.neo la cual, por medio de iteraciones bajo distintas direcciones, factores de elipsoide, sectores angulares, mínimos y máximos de muestras consideradas permite determinar el mejor vecindario posible según combinaciones de estos parametros. Para este caso se hizo un total de 19 combinaciones, donde se seleccionaron las 5 con mejor resultado (ver Tabla 6).

Tabla 6. Resultados prueba KNA zona sur en Isatis.neo.

Fuente: Elaboración propia.

Test	Active	EllRot	EllFac	#Sect	#Max/Sect	Split	#Min	Slope mean	Corr mean
6	yes	D0° N350° p90°	2	4	8	yes	1	0.95	0.61
5	yes	D0° N350° p90°	1.5	4	8	yes	1	0.93	0.56
11	yes	D0° N350° p90°	1	4	64	yes	1	0.92	0.50
12	yes	D0° N350° p90°	1	4	96	yes	1	0.92	0.50
13	yes	D0° N350° p90°	1	4	128	yes	1	0.92	0.50

La prueba número 6 presentó los mejores resultados, con un *slope* de 0.95, valor cercano a 1 lo que indica que se logra capturar la variabilidad de los datos. Por otra parte, la correlación de 0.61 implica que los valores reales versus los estimados pueden presentar diferencias, pero siguen una correlación aceptable.

La información entregada por KNA permitió definir los nuevos parametros de vecindad, los cuales correspondieron a un elipsoide de búsqueda de dimensiones $U = 900$ metros, $V = 440$ metros y $W = 200$ metros (la original fue multiplicada por un factor de 2 según KNA), con 4 sectores angulares cada uno con un máximo 8 muestras y mínimo 1. La dirección se mantuvo igual a la original.

Finalmente, la estimación y varianza del kriging ordinario se presentan en la Figura 20 y Figura 21 respectivamente.

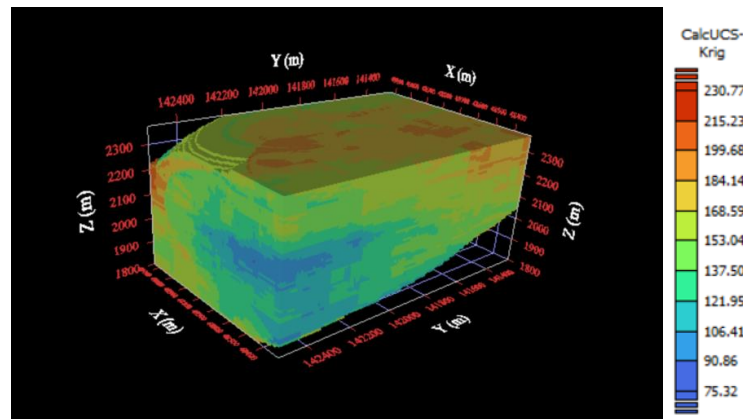


Figura 20. Resultado kriging ordinario zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

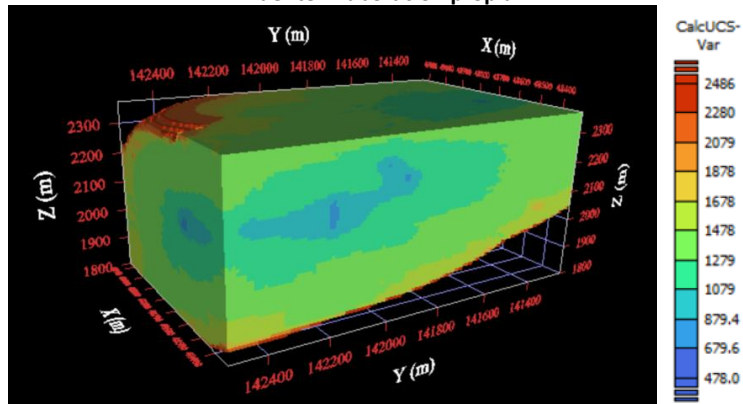


Figura 21. Varianza kriging ordinario zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.4 Validación Kriging Ordinario

Tabla 7. Estadística antes y después de la estimación en zona sur.

Fuente: Elaboración propia.

Variable	Defined count	Estimated proportion	Mean	Variance	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Minimum	Maximum	Difference with reference
UCS	836	94.68%	161.5	1424	37.74	0.23	49.64	286.3	N/A
UCS kriging	574574	96.04%	157.6	358	18.92	0.12	75.32	230.8	-2.41%

La media estimada fue menor que la real (161.5 MPa y 157.6 MPa). La varianza y desviación estándar disminuyó significativamente (varianza de 1424 a 358 y desviación estándar de 37.74 a 18.92). El valor mínimo estimado fue mayor al real (de 49.64 MPa a 75.32 MPa) y el máximo estimado menor al real (286.3 MPa a 230.8 MPa). El coeficiente de variación también disminuyó y la diferencia entre los datos de referencia con los estimados fue de 2.41% (análisis de Tabla 7).

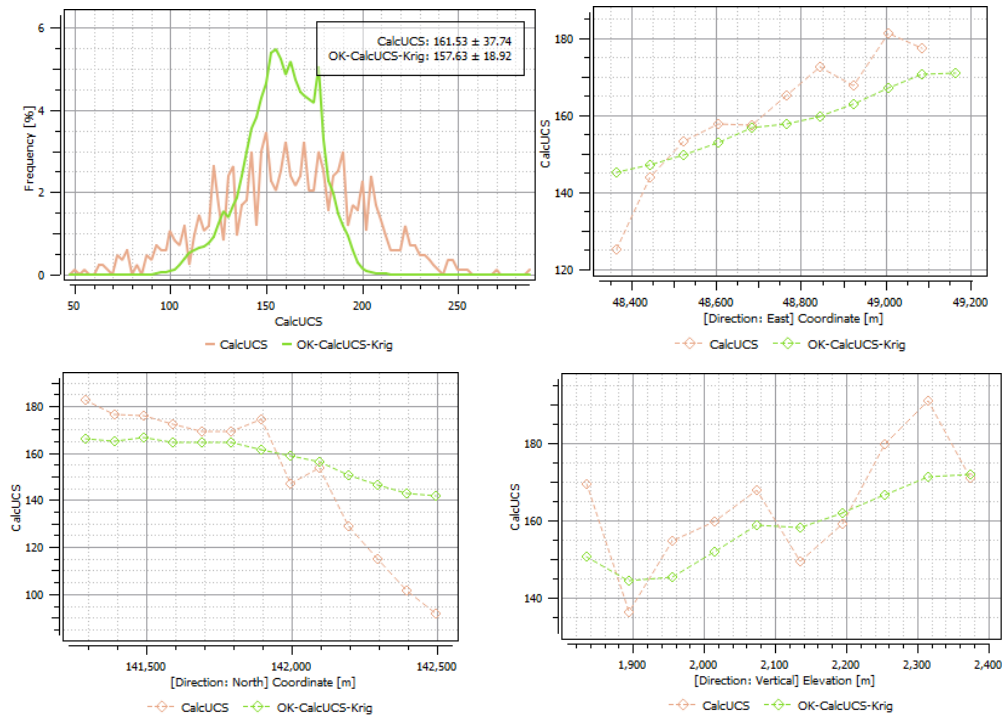


Figura 22. Validación datos estimados de la zona sur con a) histograma y swath plots b) este, c) norte y d) cota.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos mediante histogramas y *swath plots* en la Figura 22 evidencian el efecto de suavizamiento característico del kriging. Esto se aprecia en la tendencia que tienen los valores a concentrarse en rangos intermedios en comparación con los reales.

En el histograma se aprecia una notoria disminución de la desviación estándar, y una distribución más estrecha de los datos estimados. En los *swath plots* se aprecia relación en la reproducción de la estructura espacial, lo que confirma una buena estimación a pesar de que se atenúan los valores altos y bajos (suavizamiento).

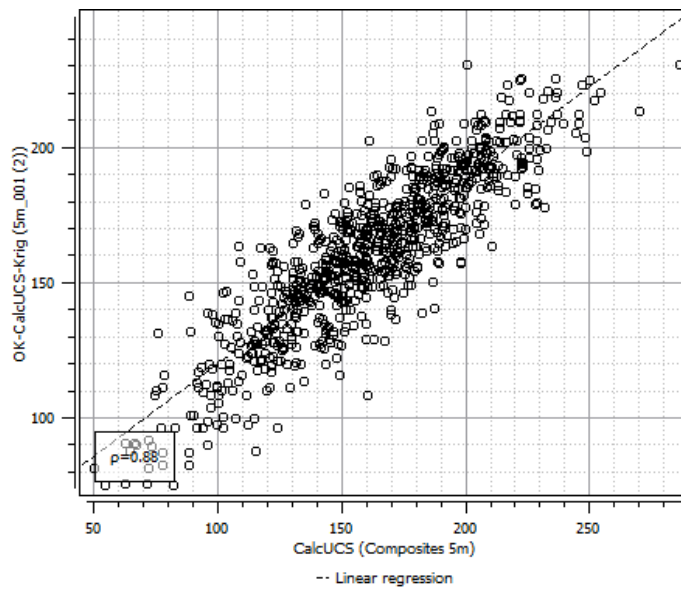


Gráfico 9. Validación cruzada zona sur.

Fuente: Elaboración propia.

En la validación cruzada (Gráfico 9) el coeficiente indica un buen nivel de ajuste, demostrando que el modelo es capaz de reproducir correctamente el comportamiento de los datos.

5.2.5 Simulación Gaussiana secuencial

Inicialmente se realizó la anamorfosis de los datos (ver Figura 23).

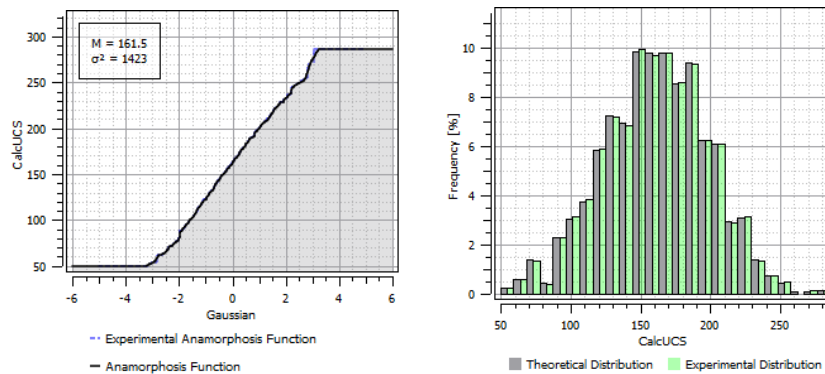


Figura 23. Anamorfosis e histograma zona sur.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se corroboró la hipótesis multi-Gaussiana por medio de las pruebas de nube de correlación, relación variograma – madograma y análisis de variograma de indicadores.

Nube de correlación diferida

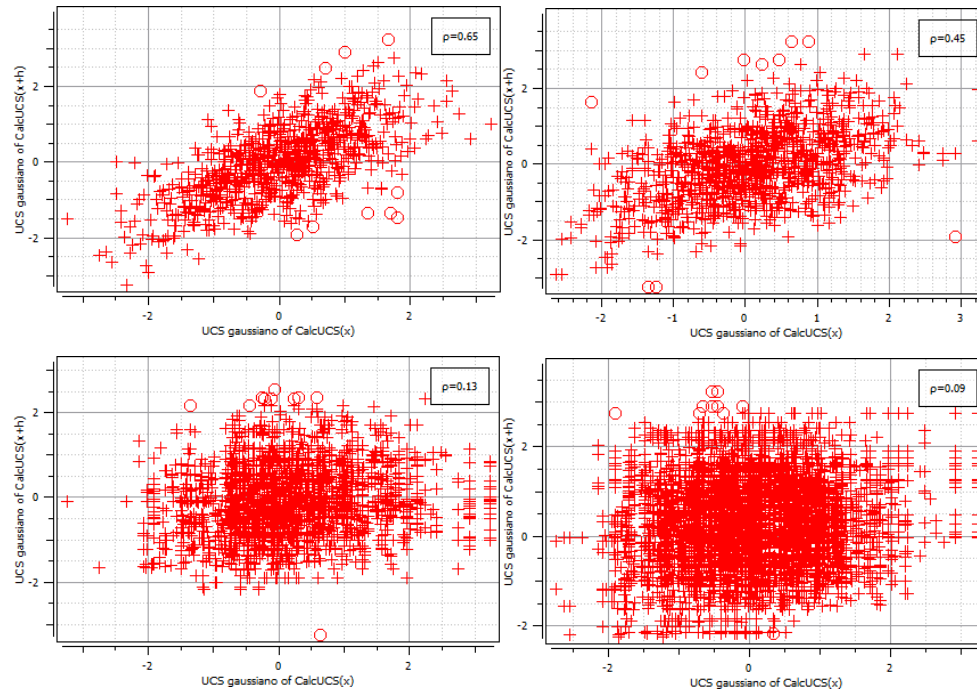


Gráfico 10. Nube de correlación diferida zona sur. a) 5 metros. b) 20 metros. c) 80 metros. d) 200 metros.

Fuente: Elaboración propia.

El Gráfico 10 a, b, c y d indicaron que, en cortos pasos los valores se agruparon en la bisectriz, a largos pasos existió una pérdida de toda correlación espacial presentando una forma circular. Los datos cumplieron la primera prueba.

Relación variograma-madograma

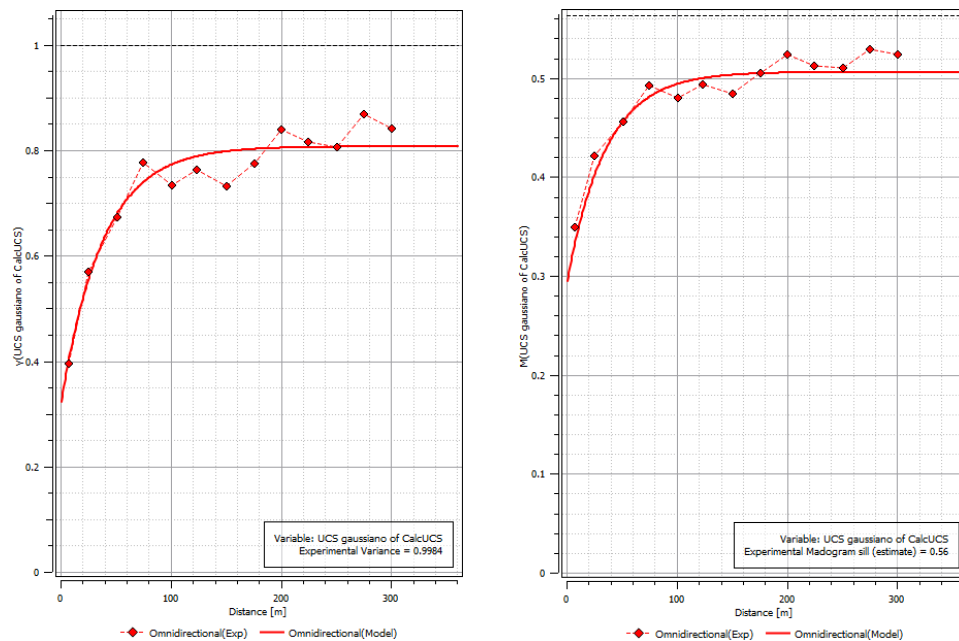


Gráfico 11. a) Variograma y b) madograma de valores Gaussianos zona sur.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Valores variograma, madograma y relación zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

	Valores por paso			
Variograma	0.394	0.568	0.673	0.776
Madograma	0.349	0.422	0.456	0.492
Relación	1.799	1.786	1.799	1.790

En base al Gráfico 11.a y b, por medio de la Tabla 8 se corroboró que los valores de la relación son cercanos a 1.77, por lo cual los datos cumplieron la segunda prueba.

Variograma de indicadores

Los indicadores determinados correspondieron a los cuantiles de los valores con anamorfosis (ver Tabla 9).

Tabla 9. Cuantiles con anamorfosis zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

	Mean	Q 10.00%	Q 25.00%	Q 50.00%	Q 75.00%	Q 90.00%
UCS Gaussiano	0	-1.28	-0.67	0	0.67	1.28

Se realizaron los variogramas respectivos según la condición teórica para el indicador y se compararon con el variograma de los datos Gaussianos.

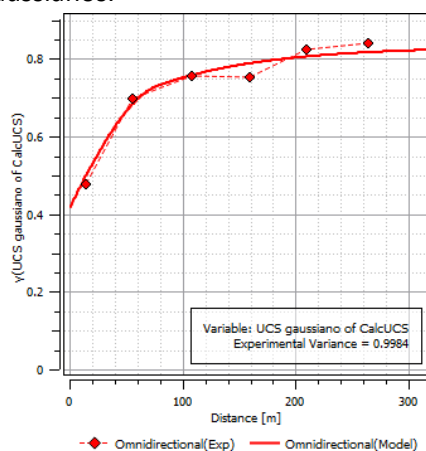


Gráfico 12. Variograma omnidireccional Gaussiano zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

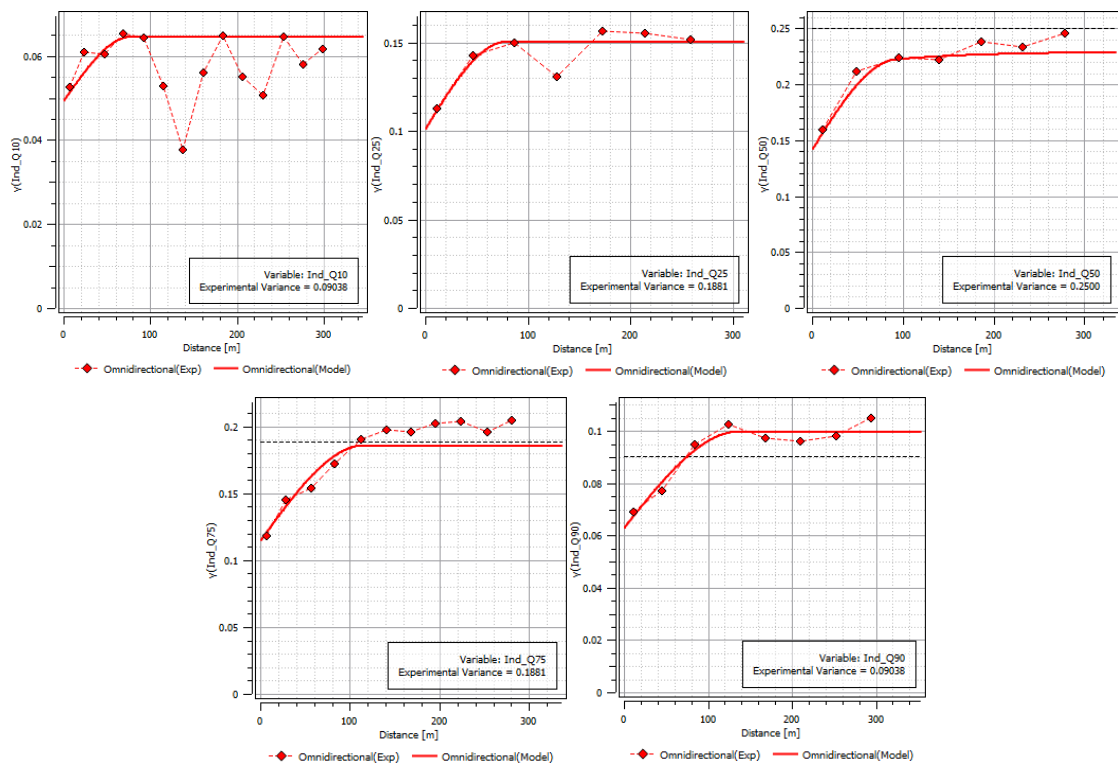


Figura 24. Comparación variogramas omnidireccionales de indicadores a) Q10, b) Q25, c) Q50, d) Q75, e) Q90.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando el variograma omnidireccional gaussiano del Gráfico 12 y los variogramas omnidireccionales de indicadores de la Figura 24 se identificaron alcances similares, por lo que la tercera prueba también fue cumplida.

Variograma direccional Gaussiano

Se determinó el variograma Gaussiano en las mismas direcciones de continuidad y parámetros que el variograma inicial de los datos (Tabla 5), se calculó para kriging simple, necesario para la simulación de valores que posteriormente serán condicionantes. El variograma resultante se presenta en el Gráfico 13.

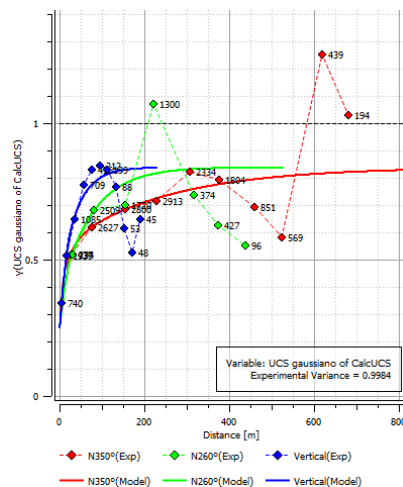


Gráfico 13. Variograma direccional Gaussiano zona sur.

Fuente: Elaboración propia.

Límites

Se realizaron 100 simulaciones, se ocuparon valores límite basados en la *International Association of Engineering Geologists* (IAEG) de la Tabla 1. Los límites se emplearon para el cálculo de mapas de probabilidad sobre límites definidos.

Simulaciones

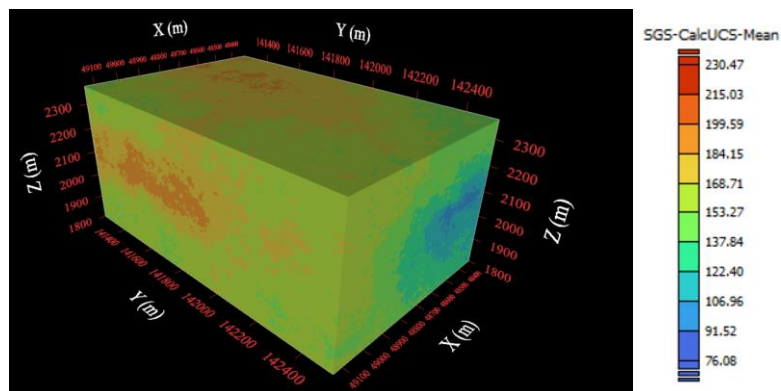


Figura 25. Promedio de valores UCS simulados zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

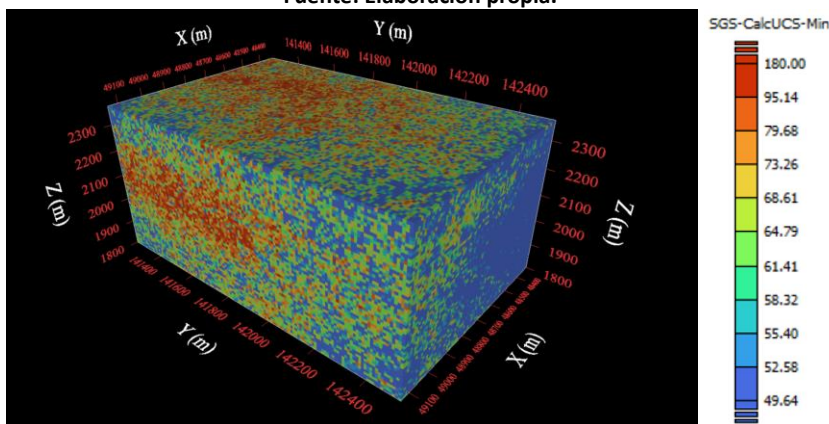


Figura 26. Mínimo de valores UCS simulados zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

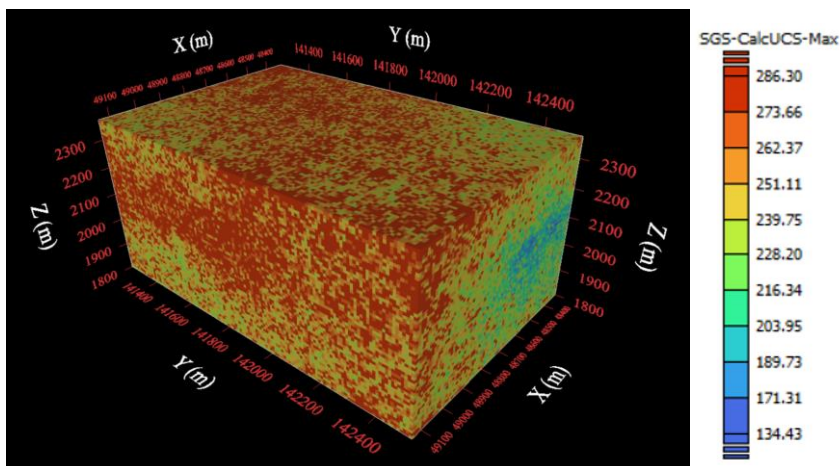


Figura 27. Máximo de valores UCS simulados zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

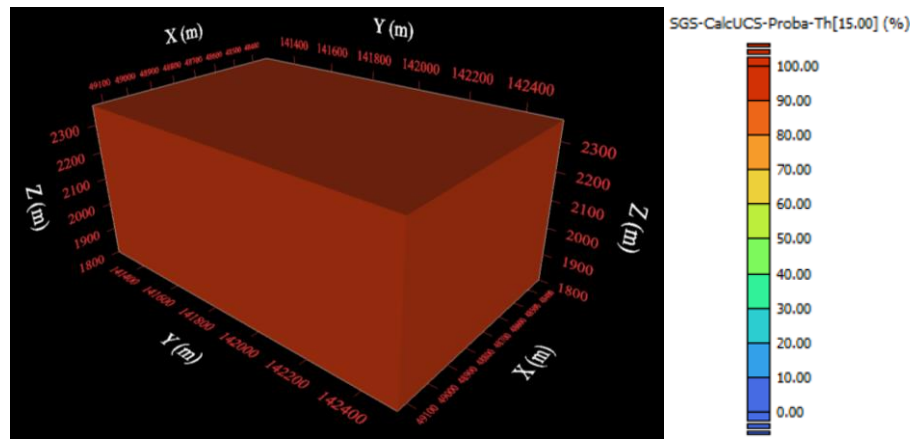


Figura 28. Probabilidad sobre límite UCS de 15 MPa zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

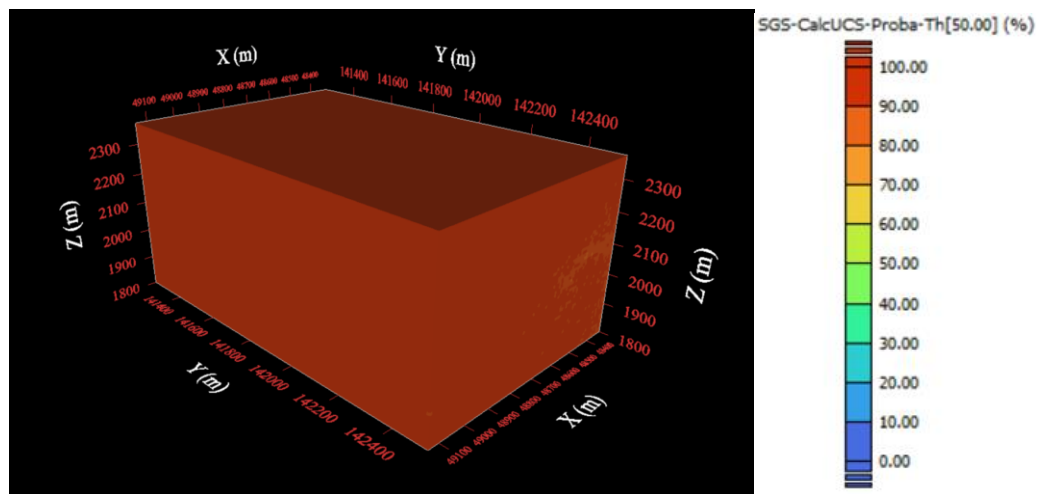


Figura 29. Probabilidad sobre límite UCS de 50 MPa zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

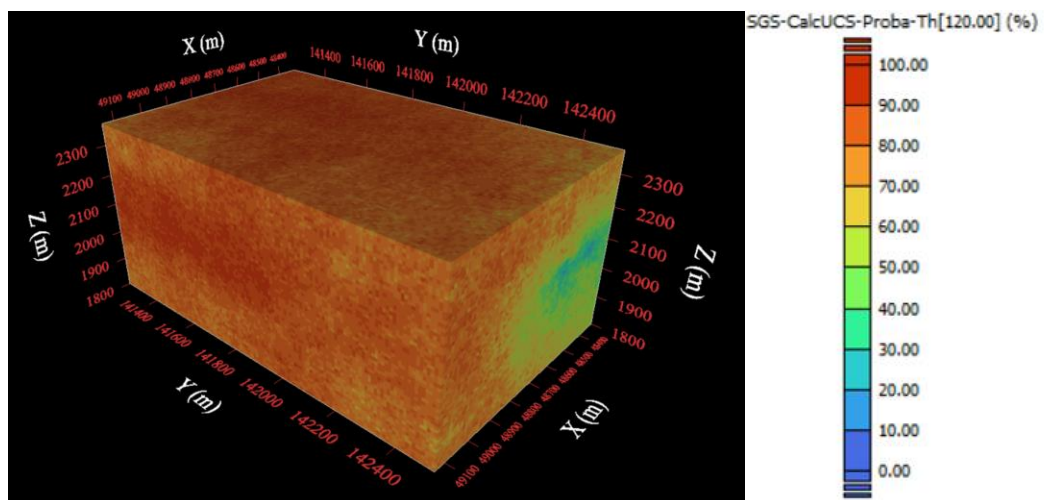


Figura 30. Probabilidad sobre límite UCS de 120 MPa zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

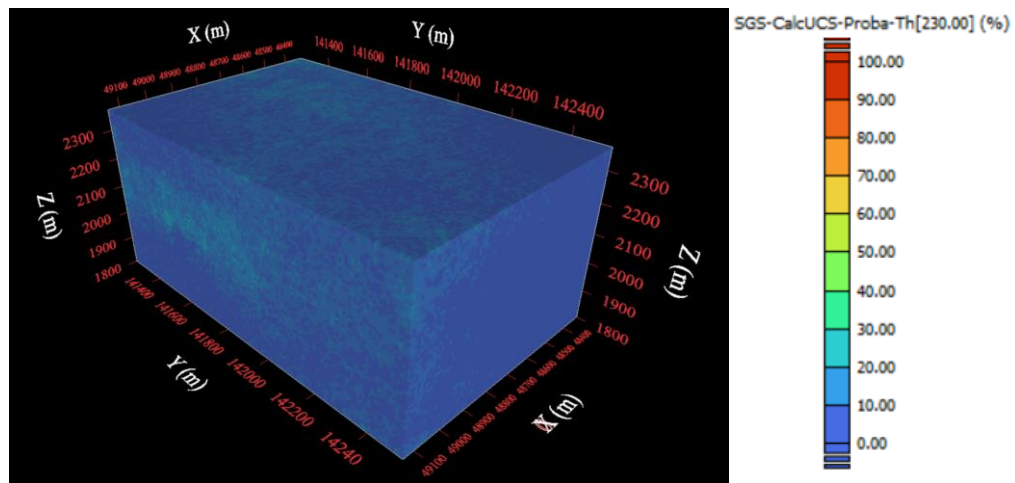


Figura 31. Probabilidad sobre límite UCS de 230 MPa zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

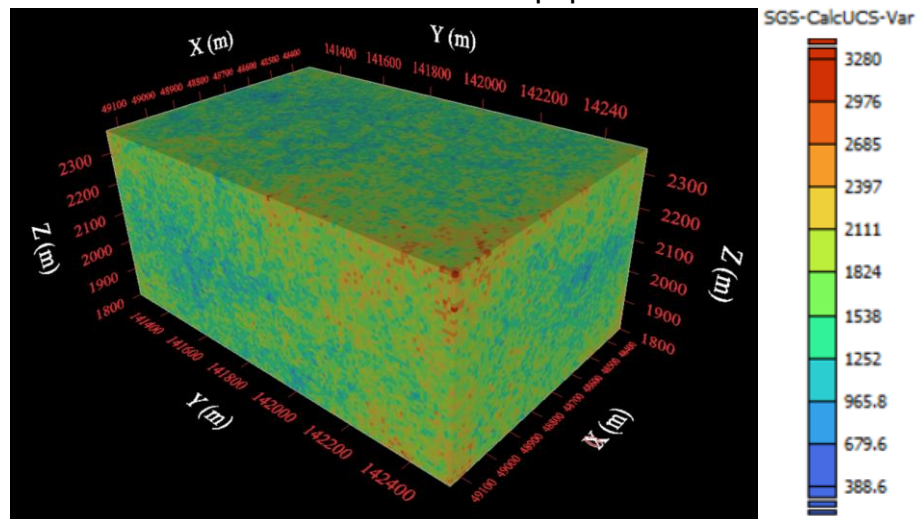


Figura 32. Varianza de simulación zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.6 Validación simulación

Tabla 10. Estadística antes y después de la simulación en zona sur.

Fuente: Elaboración propia.

Variable	Total Count	Defined Count	Mean	Variance	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Min	Max
CalcUCS	883	836	161.5	1424	37.74	0.234	49.6	286.3
SGS-UCS-Min	598272	598272	65.2	244.7	15.64	0.240	49.6	180
SGS-UCS-Max	598272	598272	248.15	504.6	22.46	0.091	134.4	286.3
Mean of SGS-UCS-Simu	598272	598272	156.1	303.1	17.41	0.112	76.1	230.5

La Tabla 10 entregó información de las simulaciones realizadas, en base al resultado del promedio de simulaciones se apreció un comportamiento similar al de los datos reales. Poseen ambos un promedio cercano, en cuanto a las medidas de dispersión de los valores, la varianza y desviación estándar de los

datos simulados fue considerablemente menor a la de los reales (efecto similar al kriging). Este comportamiento es esperable dado que corresponde al promedio de múltiples realizaciones. Los valores mínimos y máximos fueron relevantes para el análisis de casos críticos.

El histograma y swath plots del promedio de todas las simulaciones se presentan en la Figura 33:

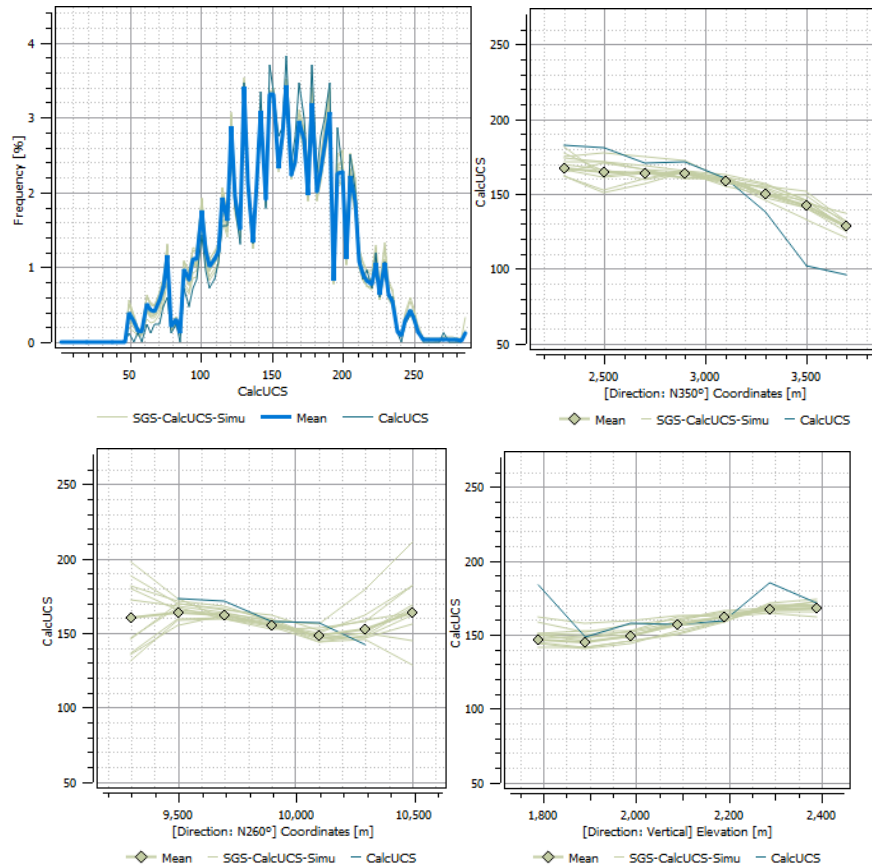


Figura 33. Validación datos simulados de la zona sur con a) histograma y swath plots b) N350, c) N260 y d) cota.
Fuente: Elaboración propia.

Los *swath plots* evidenciaron un buen ajuste espacial entre los valores simulados y reales. El promedio de las simulaciones (puntos verdes) se mantuvo cercano a los valores reales de UCS (curva azul). La incertidumbre asociada quedó reflejada en las múltiples curvas de simulación cercanas a los puntos promedio.

La simulación logró reproducir la estructura estadística y la continuidad espacial del parámetro UCS.

5.3. Zona Norte

5.3.1 Estudio exploratorio de datos

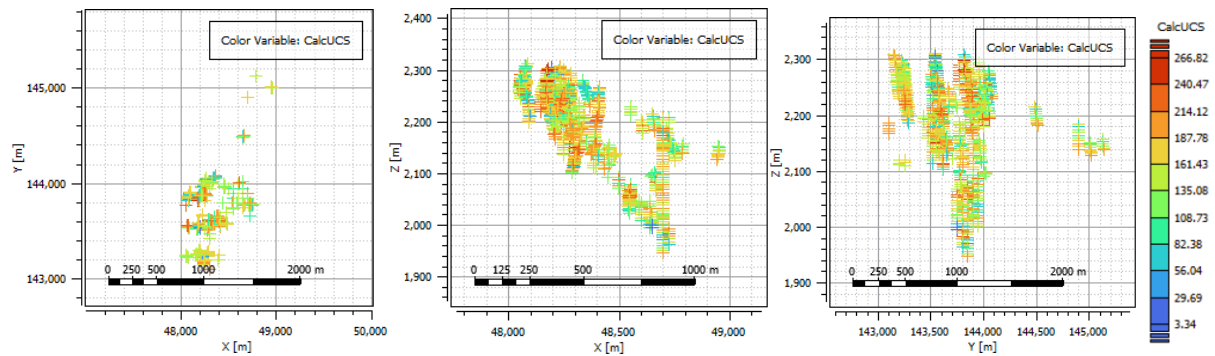


Figura 34. Vista de los datos en zona norte. a) Planta. b) Perfil este. c) Perfil norte.
Fuente: Elaboración propia.

Se apreció una gran dispersión de los datos que se ubican sobre la coordenada 144500 en la dirección norte y sobre la coordenada 48800 en la dirección este (ver Figura 34). En promedio la distancia presente entre estos datos dispersos y la concentración principal de valores es de 200 metros, por lo que se decidió no usar estos datos para la estimación. Esto debido a que grandes distancias sin datos no capturan la variabilidad espacial de la variable de estudio.

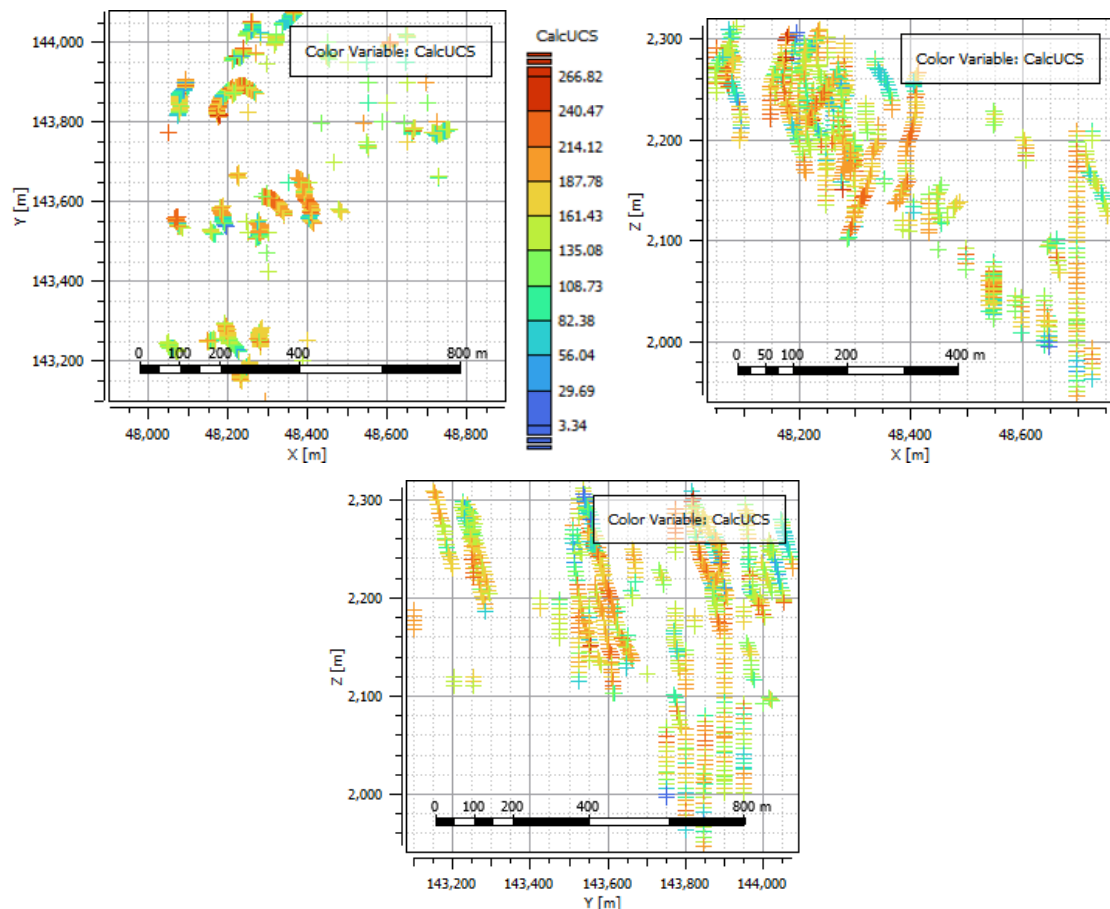


Figura 35. Vista datos zona norte filtrados. a) Planta. b) Perfil este. c) Perfil norte.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Estadística descriptiva zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

	Total Count	Defined Count	Mean	Variance	Deviation Deviation	Coefficient of Variation	Minimum	Maximum
CalcUCS	783	753	158	1989	45	0.2831	3.3	267
X [m]	783	783	48350	38944	197	0.0041	48047	48754
Y [m]	783	783	143692	63911	253	0.0018	143100	144076
Z [m]	783	783	2183	7508	87	0.0397	1947	2312

Tabla 12. Cuantiles zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

	Q 5.00%	Q 10.00%	Q 25.00%	Q 50.00%	Q 75.00%	Q 90.00%	Q 95.00%	Q Mean	Harmonic Mean	Skewness	Kurtosis
CalcUCS	72	91	133	164	191	210	219	149	130	-0.618	3.09
X [m]	48075	48146	48209	48283	48539	48697	48698	48350	48349	0.567	2.16
Y [m]	143232	143252	143540	143774	143896	143970	144021	143691	143691	-0.611	2.32
Z [m]	2014	2040	2133	2203	2251	2279	2290	2181	2179	-0.755	2.61

Se tuvieron un total de 783 muestras de UCS, con 753 valores definidos. El valor promedio fue de 158 MPa, con una desviación estándar de 45 MPa y una varianza de 1989 (ver Tabla 11). Según los cuantiles, la media es similar a la mediana (Q50 = 164 MPa), lo que sugiere una distribución simétrica. El mínimo fue de 3.3 MPa y el máximo de 267 MPa, valores significativamente alejados de los percentiles 5% y 95% (72 y 219 MPa, respectivamente) (ver Tabla 12). Esto motivó análisis posteriores para evaluar la posible presencia de valores atípicos.

Histograma

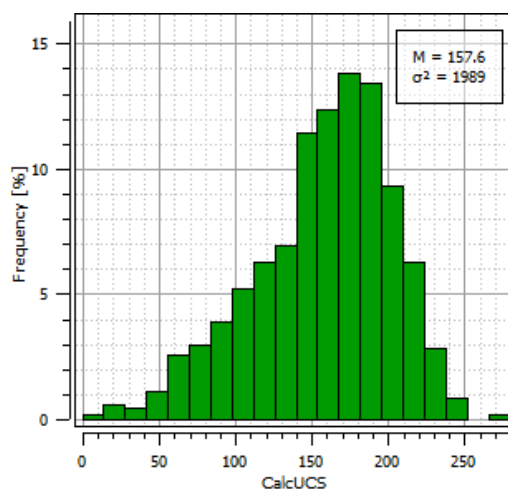


Gráfico 14. Histograma valores UCS zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

El histograma presentó una distribución asimétrica negativa con una moda entre los valores 170-180. No se apreciaron valores alejados de la distribución principal de datos.

Boxplot

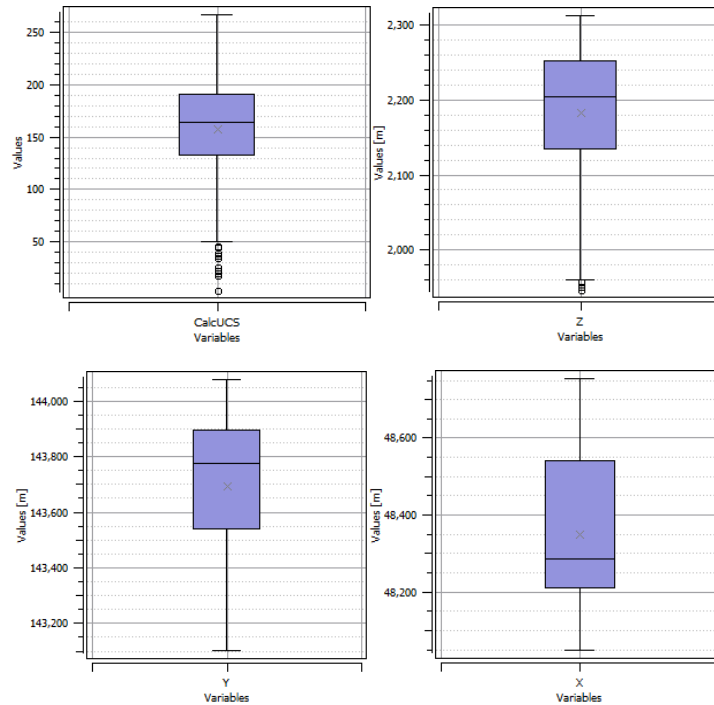


Figura 36. Boxplot valores zona norte. a) UCS. b) Coordenada x. c) Coordenada y. d) Coordenada z.

Fuente: Elaboración propia.

En los boxplot de la Figura 36.a se apreció una gran cantidad de posibles valores atípicos alejados del límite inferior de UCS. De la misma forma, en el boxplot de cota, se apreciaron valores bajo su límite inferior. Se procedió con un análisis visual de los posibles atípicos, en la Figura 37 para UCS y Figura 38 para la cota.

Se marcaron estos valores para su análisis y se determinó que estos se deben a condiciones locales. En el caso del UCS los datos se encuentran en tramos de sondajes de bajo UCS, mientras que en la cota se debe al último tramo de un sondaje de gran profundidad.

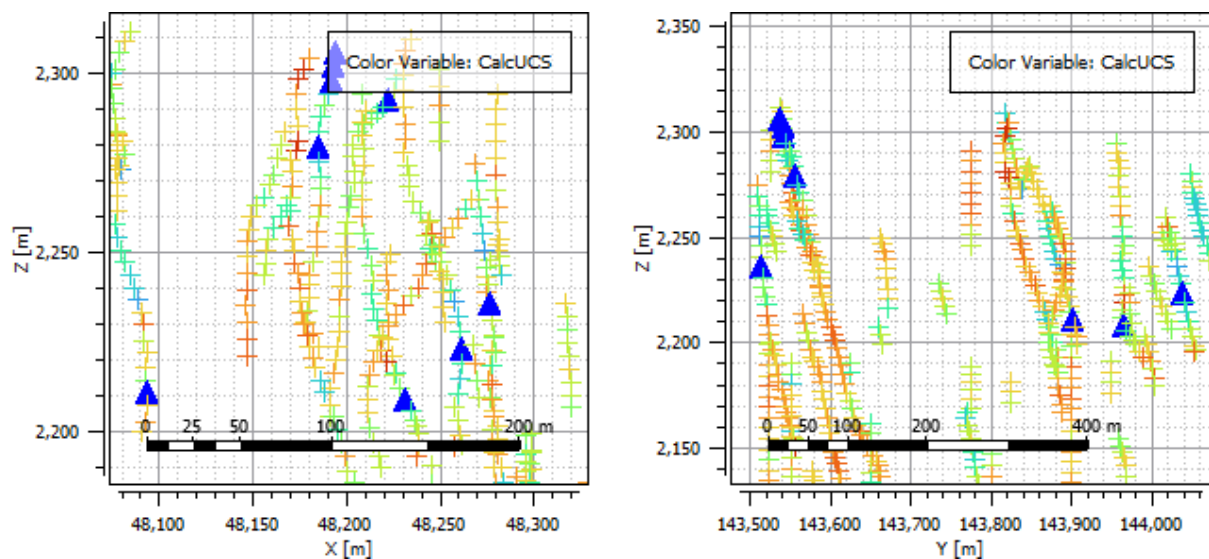


Figura 37. Valores fuera límites zona norte. a) Valores sobre límite superior. b) Valores bajo límite inferior.

Fuente: Elaboración propia.

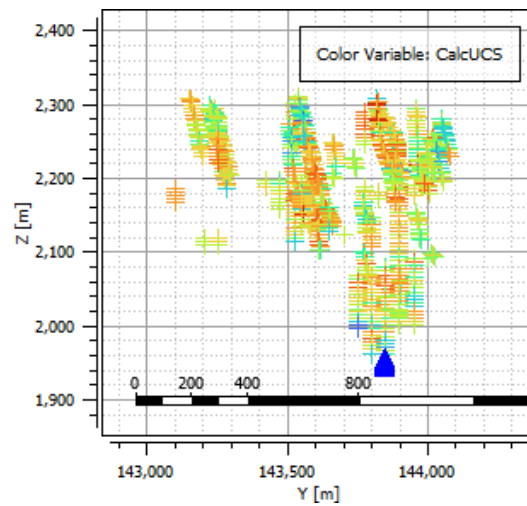


Figura 38. Valores bajo límite inferior en cota.
Fuente: Elaboración propia.

Gráficos de probabilidad

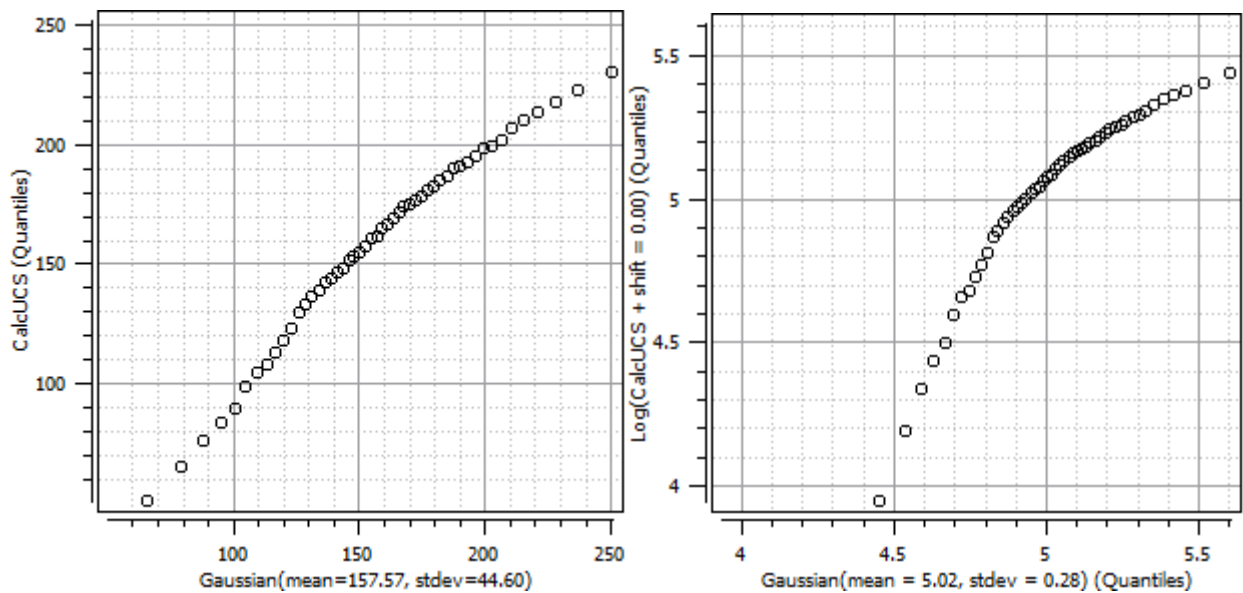


Gráfico 15. Gráfico de probabilidad zona norte. a) Distribución normal. b) Distribución log-normal.
Fuente: Elaboración propia.

El Gráfico 15.a presentó un buen ajuste a la diagonal, si bien existen desviaciones, estas son producidas por la asimetría de la distribución de valores. El Gráfico 15.b presentó una curvatura con un mal ajuste, por lo que se concluyó que el comportamiento de los datos se acerca más a una distribución normal.

Comportamiento direccional

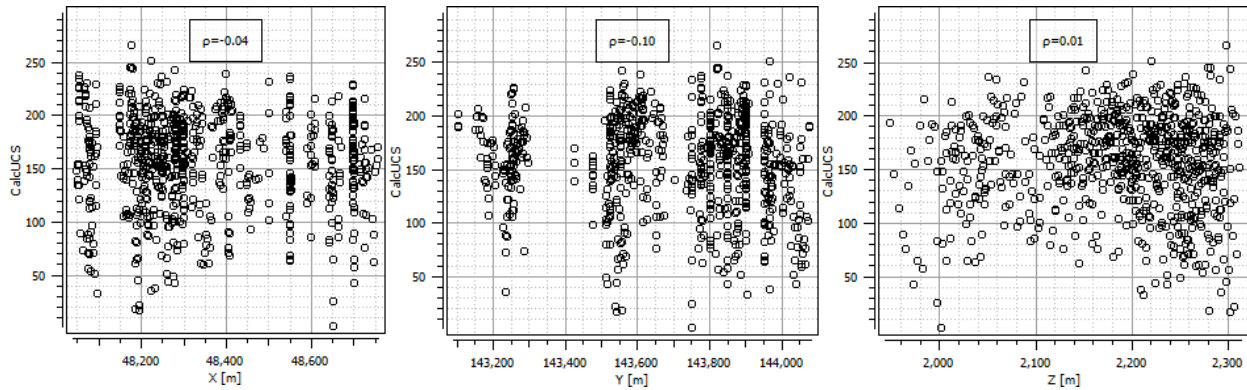


Gráfico 16. Nubes direccionales zona norte. a) Este. b) Norte. c) Cota.

Fuente: Elaboración propia

Ninguna de las 3 direcciones indicó una correlación relevante.

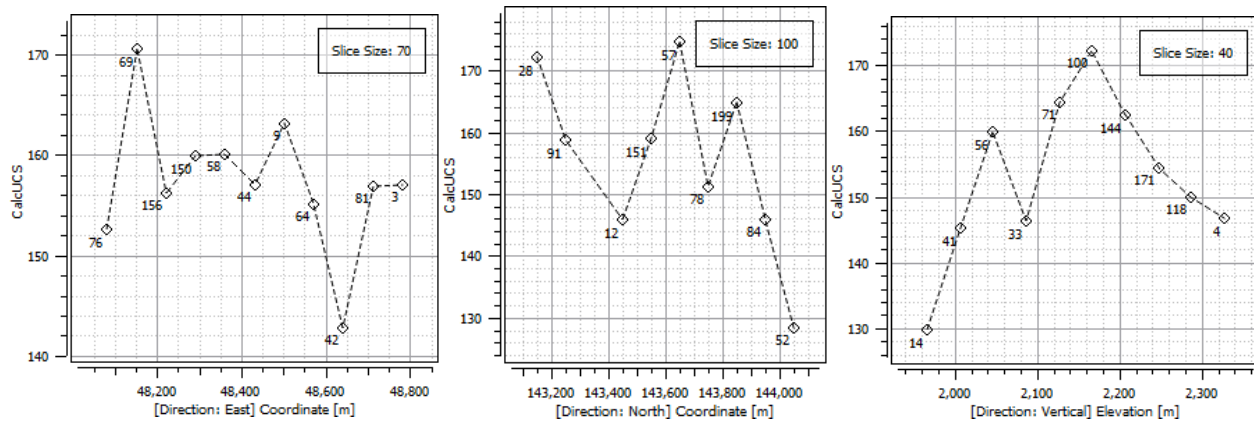


Gráfico 17. Swath plot zona norte. a) Dirección este. b) Dirección norte. c) Cota.

Fuente: Elaboración propia.

En el Gráfico 17.a del eje Este no se identificó una tendencia definida, aunque existe disminución puntual hacia los extremos. En la dirección Norte (Gráfico 17.b), el UCS tendió a disminuir progresivamente, especialmente más allá de la coordenada 143,800 m. Respecto a la elevación, el UCS aumentó en la cota hasta aproximadamente los 2,150 metros para luego disminuir, lo que indicó una posible zona de mayor resistencia en dicha cota (ver Gráfico 17.c).

Desagrupamiento

Si bien el efecto del aumento del tamaño de celda no es significativo para el rango definido de 0 a 300 metros, de igual forma se emplea. Esto debido a que de forma visual en el despliegue de datos se aprecian zonas con mayor concentración de datos (ver Figura 35). La ventana de desagrupamiento recomendada por el software corresponde a 170 metros (ver Gráfico 18).

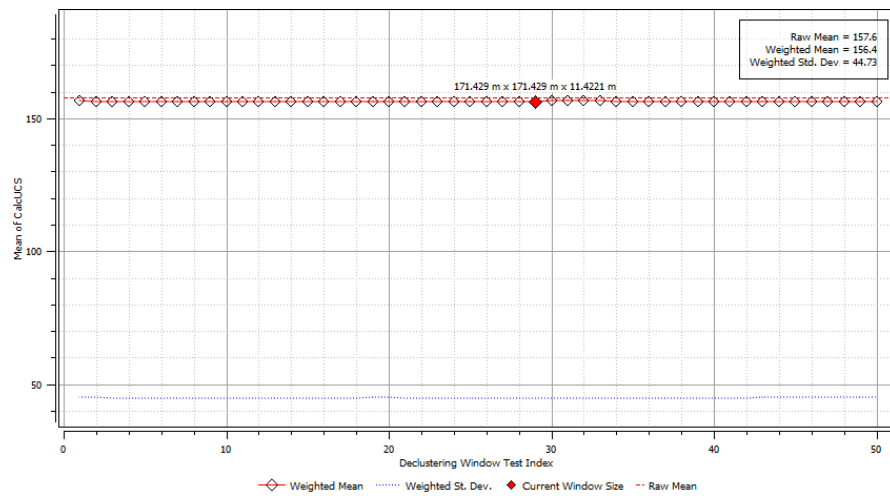


Gráfico 18. Efecto desagrupamiento zona norte (rango 0 a 300 metros).
Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 Análisis de continuidad espacial

Construcción del variograma

Inicialmente se realizó el mapa variográfico para identificar direcciones de mayor continuidad espacial (Figura 39).

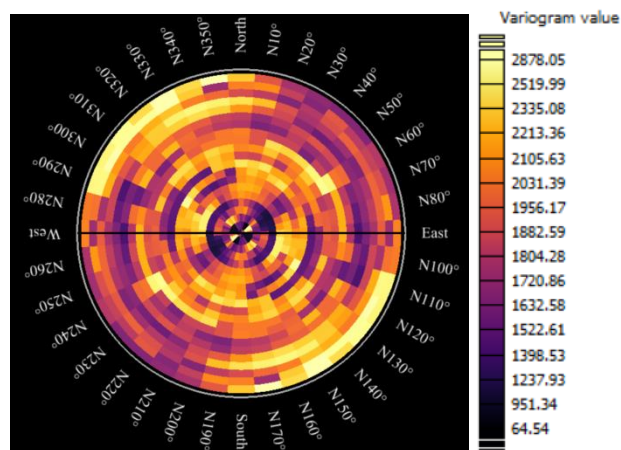


Figura 39. Mapa variográfico zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

Las direcciones no pudieron ser identificadas por medio del mapa, por lo que se optó por iterar en todas estas calculando cada variograma y eligiendo el con mejor continuidad espacial (ver anexo 10.1.2, casos compósitos 5 metros). Se determinó la dirección norte – este como la de mejor continuidad espacial.

Los parametros de cálculo del variograma fueron se presentan en la Tabla 13:

Tabla 13. Parametros de confección variograma experimental zona norte.

Fuente: Elaboración propia.

Parametros variograma			Unidades
Este	lag	56	m
	tol angular	45	°
	dist max	400	m
Norte	lag	48	m
	tol angular	29	°
	dist max	400	m
Profundidad	lag	11.9	m
	tol angular	45	°
	dist max	140	m

Los variogramas resultantes se presentan en los Gráfico 19.a y b:

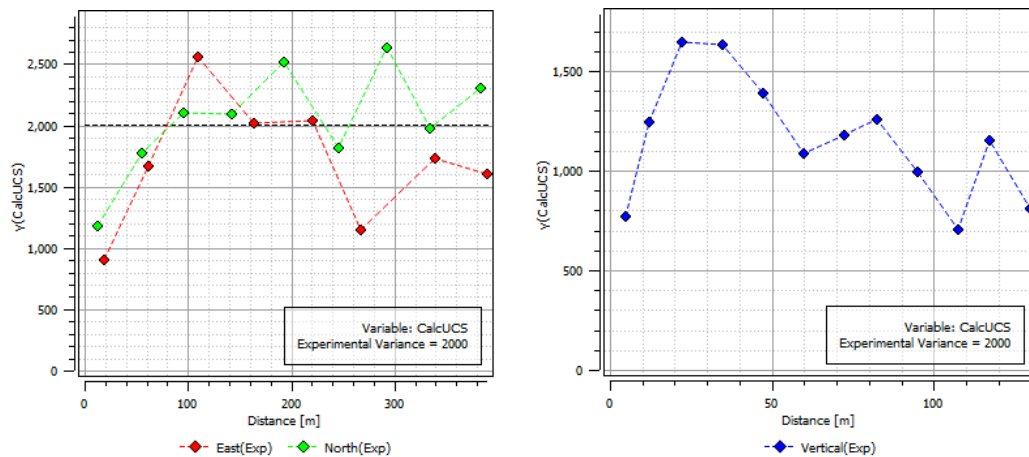


Gráfico 19. Variograma experimental zona norte. a) Horizontal. b) Vertical.

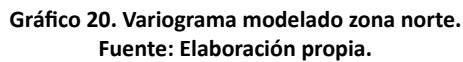
Fuente: Elaboración propia.

Variograma modelado

Tres modelos fueron ajustados para representar la continuidad espacial de los datos, los empleados fueron los siguientes:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \cdot \gamma_{\text{esf}}(h) + C_2 \cdot \gamma_{\text{exp}}(h)$$

Según el gráfico del variograma modelado se determinó el alcance en sus direcciones:



5.3.3 Kriging Ordinario

Tabla 14. Resultados prueba KNA zona norte en Isatis.neo.
Fuente: Elaboración propia.

El mejor *test* obtenido por KNA correspondió al 15, con un slope de 0.9, cercano a 1 demostrando una buena captura de la variabilidad espacial de los datos. La correlación fue de 0.6, siendo esta aceptable.

Finalmente se determinó un elipsoide de búsqueda multiplicada por un factor de 6, con 4 sectores angulares, un máximo de 8 y mínimo de 1 muestras por sector.

Las nuevas dimensiones del elipsoide de búsqueda correspondieron a $U = 600$, $V = 480$ y $W = 300$. La dirección se mantuvo.

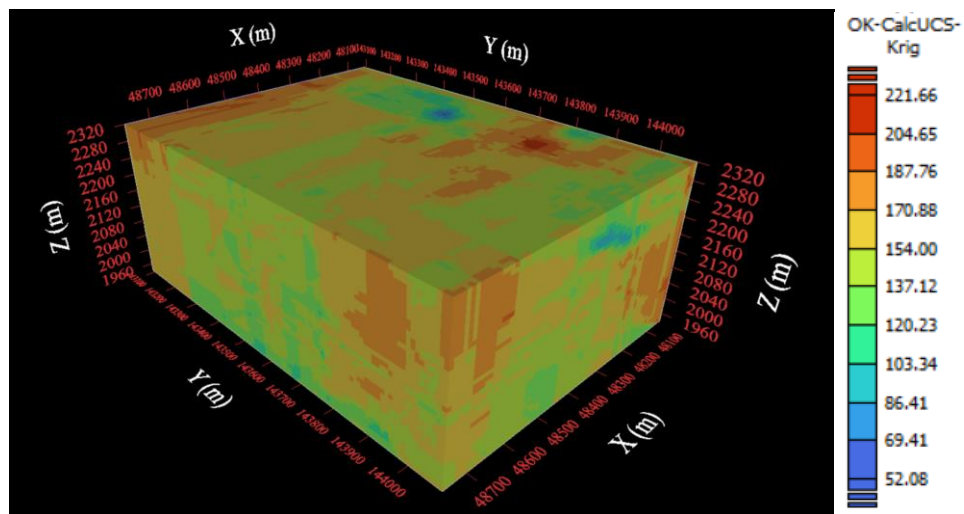


Figura 40. Resultado kriging ordinario zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

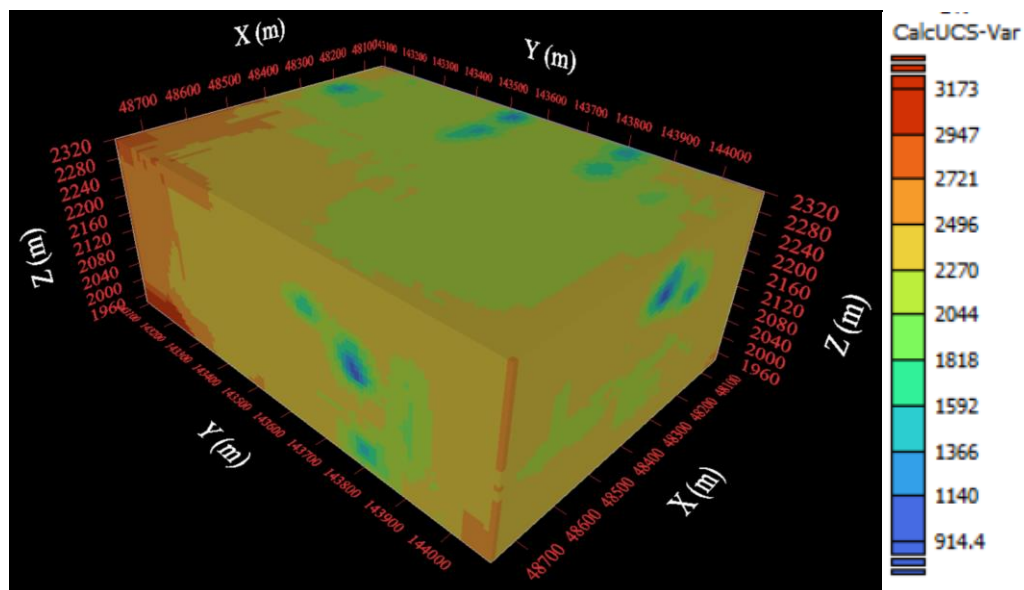


Figura 41. Varianza kriging ordinario zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

5.3.4 Validación Kriging Ordinario

Tabla 15. Estadística antes y después de la estimación en zona norte.

Fuente: Elaboración propia.

Variable	Defined count	Estimated proportion	Total weight	Mean	Variance	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Minimum	Maximum	Difference with reference
UCS	753	0.96	190	156	2001	45	0.286	3	267	N/A
UCS kriging	270864	1.00	270864	157	205	14	0.091	52	222	0.50%

La Tabla 15 de estadística antes y después de la estimación indicó que el valor medio estimado (157 MPa) es muy cercano al valor real (156 MPa), con una diferencia relativa de solo 0.50%, lo que sugiere un buen ajuste global del modelo. Sin embargo, se observa un suavizamiento característico del kriging: la varianza y la desviación estándar del modelo estimado son considerablemente menores (varianza de 2001 a 205 y desviación estándar de 45MPa a 14 MPa). Eso también se evidencia en el rango de los valores mínimos y máximos, el mínimo estimado fue mayor que el real (52 MPa frente a 3 MPa), mientras que el máximo estimado fue menor (222 MPa frente a 267 MPa).

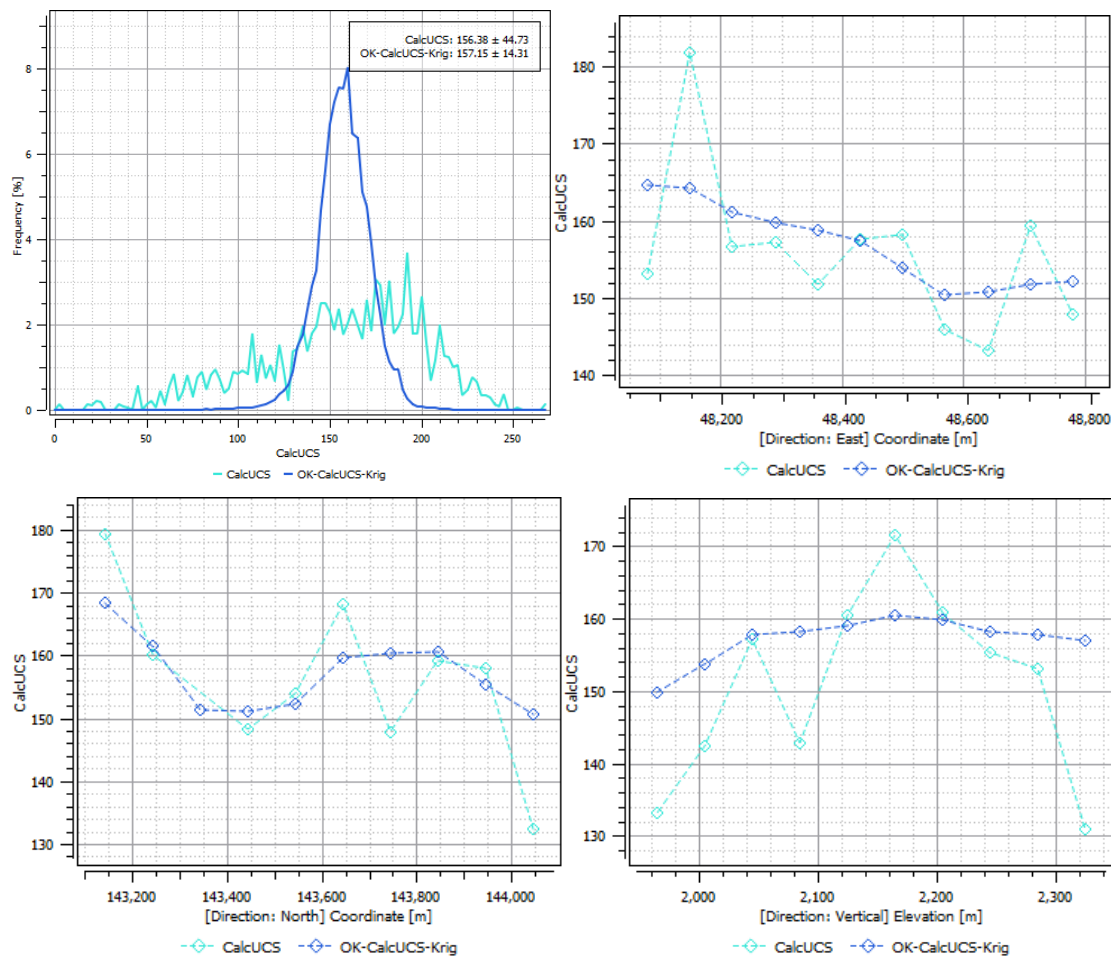


Figura 42. Validación datos estimados de la zona norte con a) histograma y swath plots b) este, c) norte y d) cota.

Fuente: Elaboración propia.

En las estimaciones por medio de kriging, los valores mínimos fueron mayores que los reales mientras que los máximos fueron menores que los reales. Esto corresponde al efecto de suavizamiento, donde los valores se concentran en rangos intermedios. El histograma de los valores estimados presentó una menor desviación estándar respecto de los datos reales. En los *swath plots* las curvas de valores estimados siguen la tendencia espacial real (ver Figura 42).

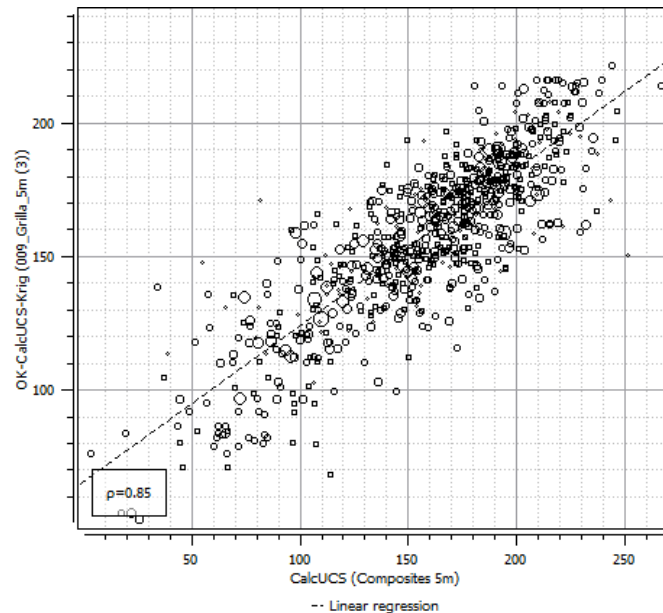


Gráfico 21. Validación cruzada zona norte.

Fuente: Elaboración propia.

El ajuste de la validación cruzada indica un valor de 0.85, lo cual representa una buena estimación de los valores reales a partir de los estimados (ver Gráfico 21). Esto quiere decir que, si bien se suavizan los valores, se logra representar la continuidad espacial de los valores de UCS.

5.3.5 Simulación Gaussiana secuencial

Inicialmente se realizó la anamorfosis de los datos de UCS (Figura 43).

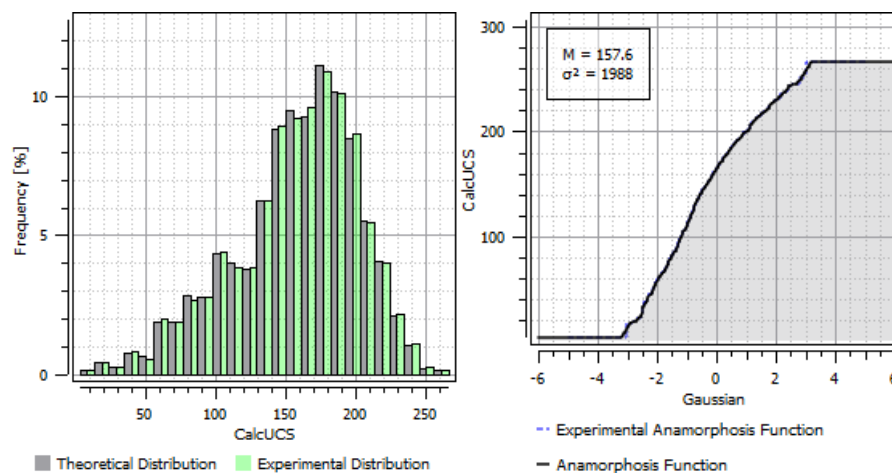


Figura 43. Anamorfosis e histograma zona norte.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se corroboró la hipótesis multi-Gaussiana por medio de las pruebas de nube de correlación, relación variograma – madograma y análisis de variograma de indicadores.

Nube de correlación diferida

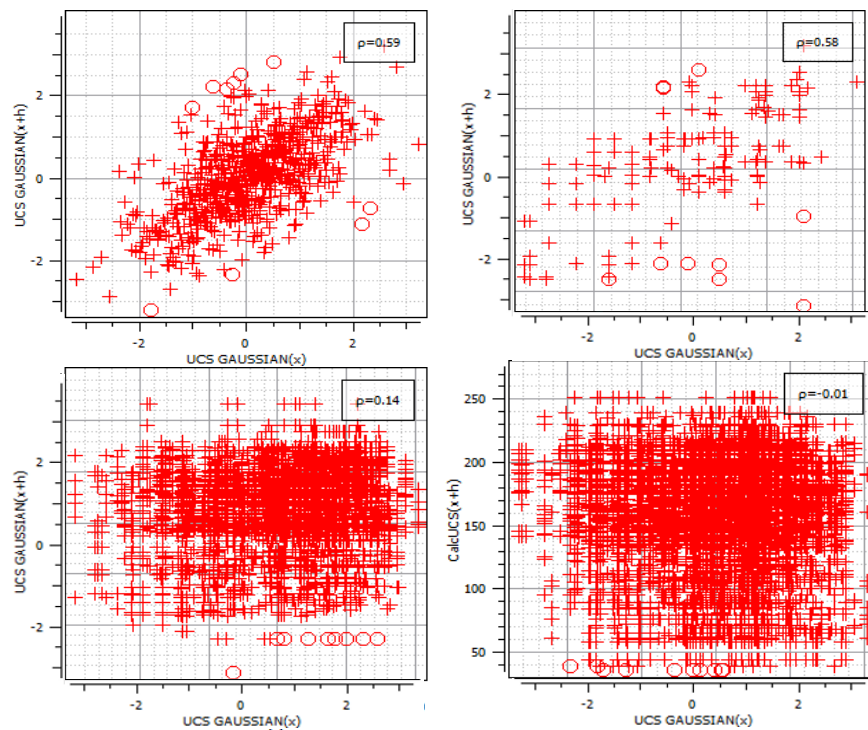


Gráfico 22. Nube de correlación diferida zona norte. a) 5 metros. b) 10 metros. c) 80 metros. d) 180 metros.
Fuente: Elaboración propia.

El Gráfico 22 indicó que a cortas distancias los valores se ajustan en la diagonal, a medida que la distancia aumenta los valores pierden toda correlación. Los datos cumplieron la primera prueba.

Relación variograma-madograma

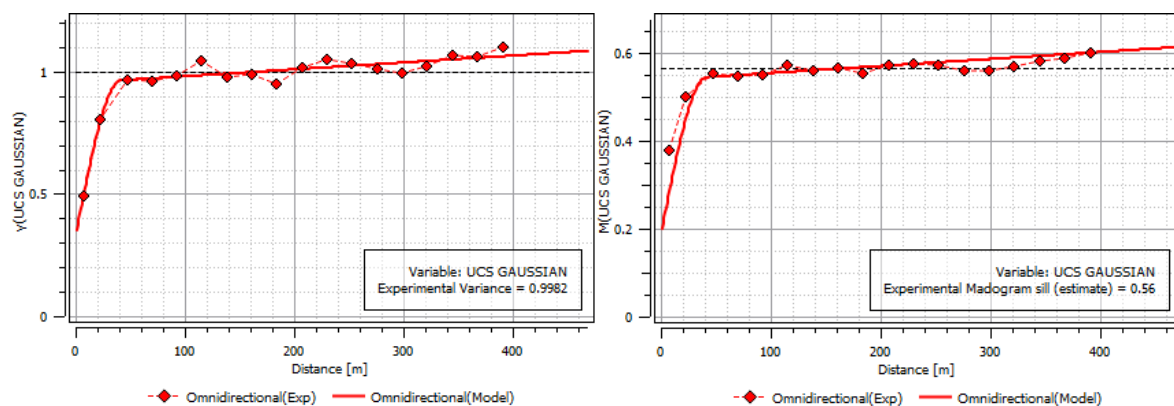


Gráfico 23. a) Variograma y b) madograma de valores Gaussianos zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Valores variograma, madograma y relación zona norte.

Fuente: Elaboración propia.

	Valores por paso			
Madograma	0.377	0.499	0.551	0.547
Variograma	0.493	0.805	0.964	0.960
Relación	1.863	1.797	1.782	1.793

En base al Gráfico 23a. y b y la Tabla 16 se obtuvo que los valores de la relación madograma - variograma fueron cercanos a 1.77. Los datos cumplieron la segunda prueba.

Variograma de indicadores

Los indicadores usados correspondieron a los cuantiles de los valores con anamorfosis (ver Tabla 17. Cuantiles con anamorfosis zona norte.).

Tabla 17. Cuantiles con anamorfosis zona norte.

Fuente: Elaboración propia

	Mean	Q	Q	Q	Q	Q
		10.00%	25.00%	50.00%	75.00%	90.00%
CalcUCS	0	-1.28	-0.67	0	0.67	1.29

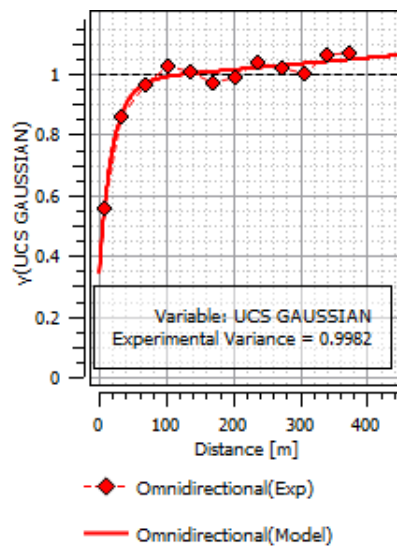


Gráfico 24. Variograma omnidireccional Gaussiano zona norte.

Fuente: Elaboración propia.

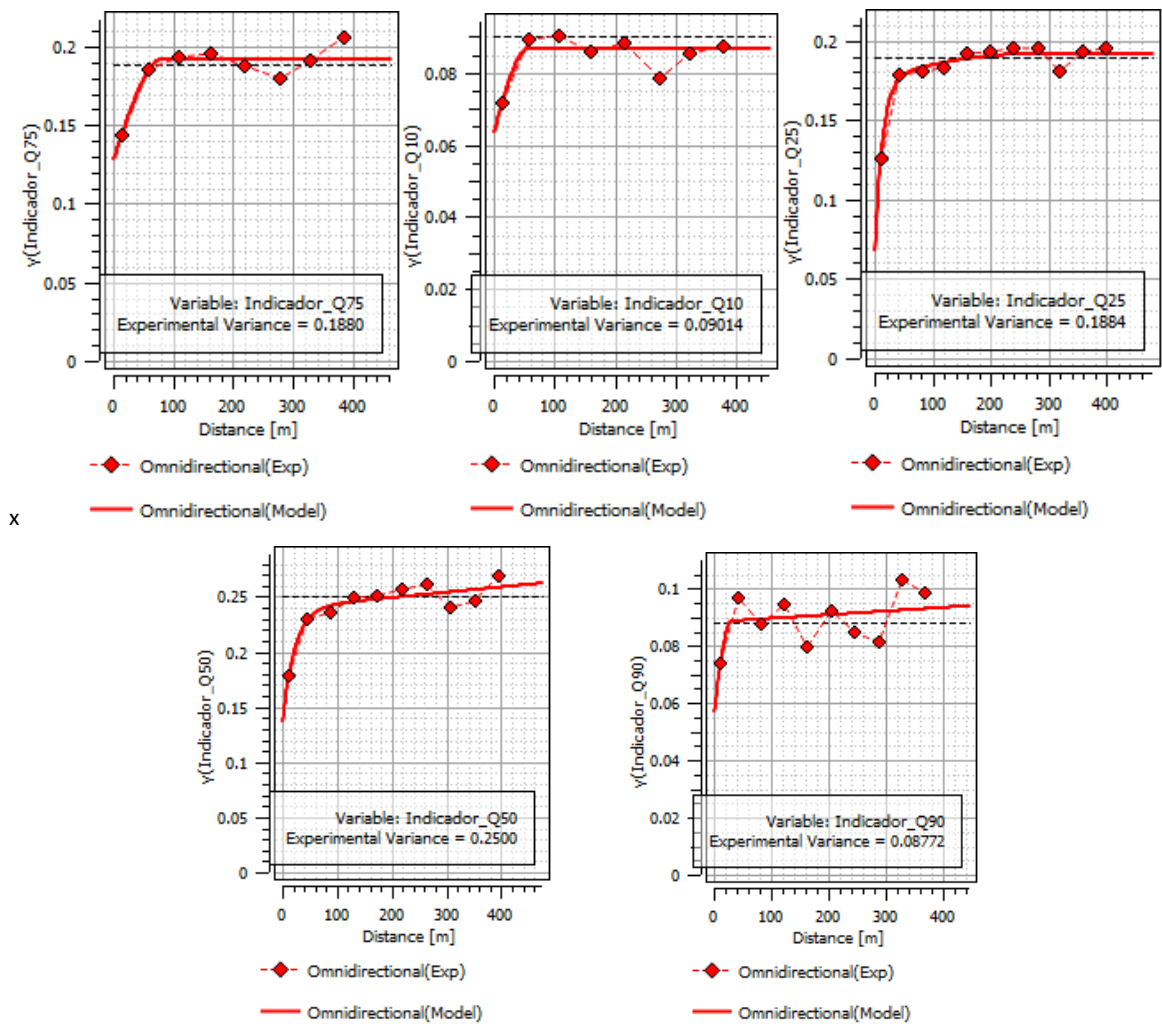


Figura 44. Comparación variogramas de indicadores a) Q10, b) Q25, c) Q50, d) Q75, e) Q90.

Fuente: Elaboración propia.

Se comparó el variograma omnidireccional gaussiano del Gráfico 24 con los variogramas omnidireccionales de indicadores de la Figura 44, donde se determinó que sus alcances fueron similares, por lo que la tercera prueba también fue cumplida.

Variograma direccional Gaussiano

El cálculo del variograma Gaussiano fue realizado en las mismas direcciones de continuidad y con los mismos parámetros que el variograma inicial de los datos antes de la anamorfosis, se calculó para kriging simple, necesario para la simulación de valores que posteriormente serán condicionantes. El variograma resultante se presenta en el Gráfico 25.

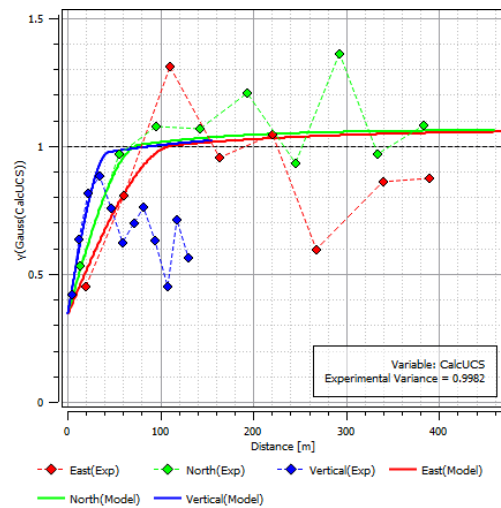


Gráfico 25. Variograma direccional Gaussiano zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

Límites

De la misma forma que en la zona sur se realizaron 100 simulaciones, se ocuparon valores límite basados en la *International Association of Engineering Geologists* (IAEG) de la Tabla 1. Los límites se emplearon para el cálculo de mapas de probabilidad sobre límites definidos.

Simulaciones

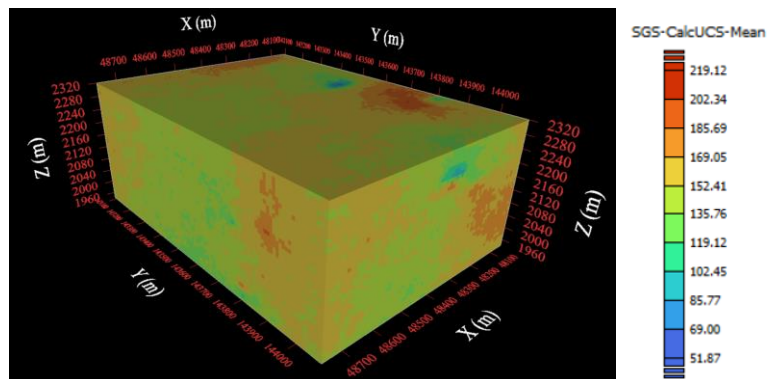


Figura 45. Promedio de valores UCS simulados zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

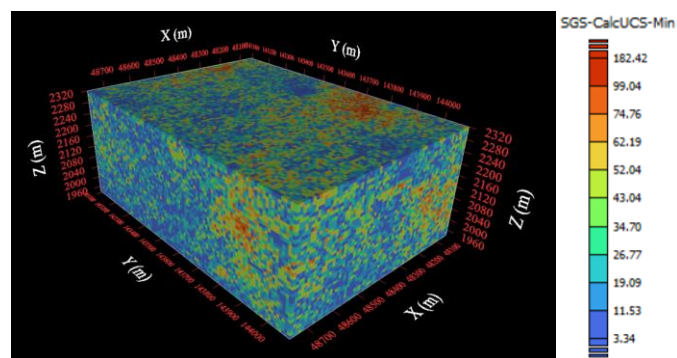


Figura 46. Mínimo de valores UCS simulados zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

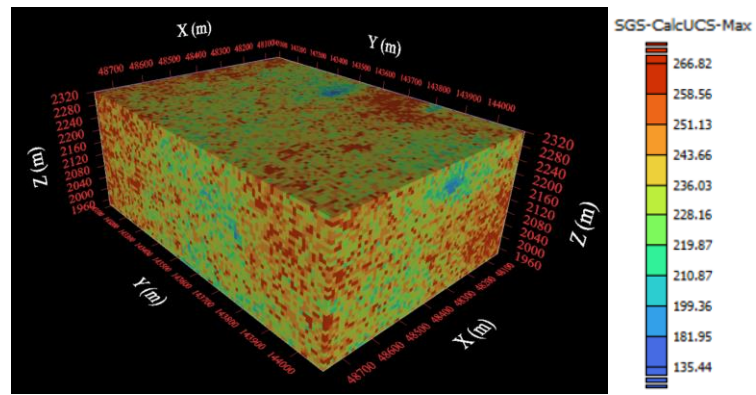


Figura 47. Máximo de valores UCS simulados zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

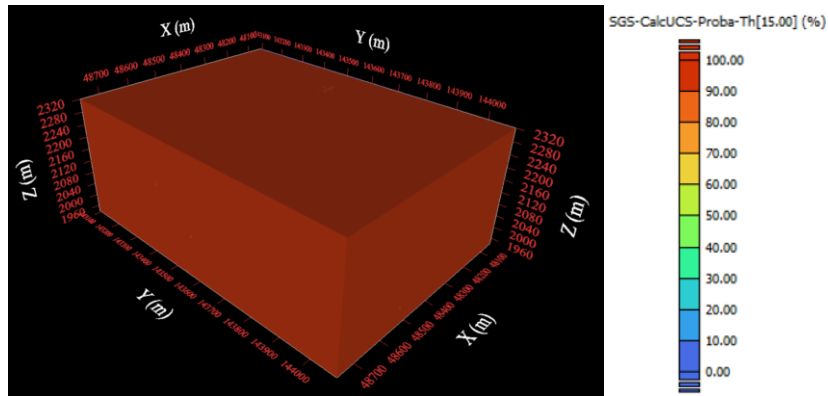


Figura 48. Probabilidad sobre limite UCS de 15 MPa zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

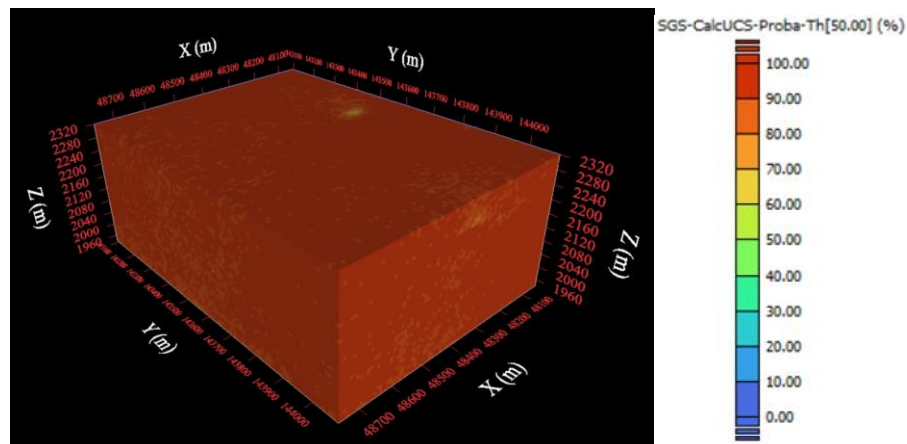


Figura 49. Probabilidad sobre limite UCS de 50 MPa zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

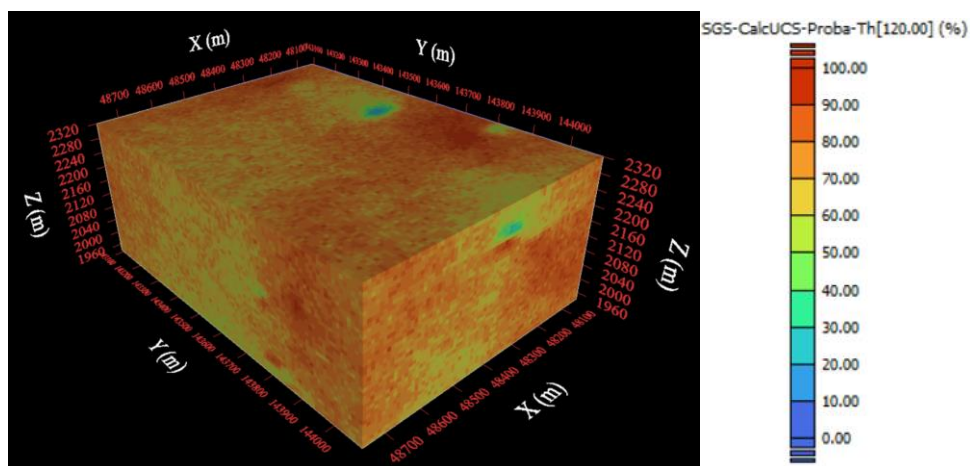


Figura 50. Probabilidad sobre limite UCS de 120 MPa zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

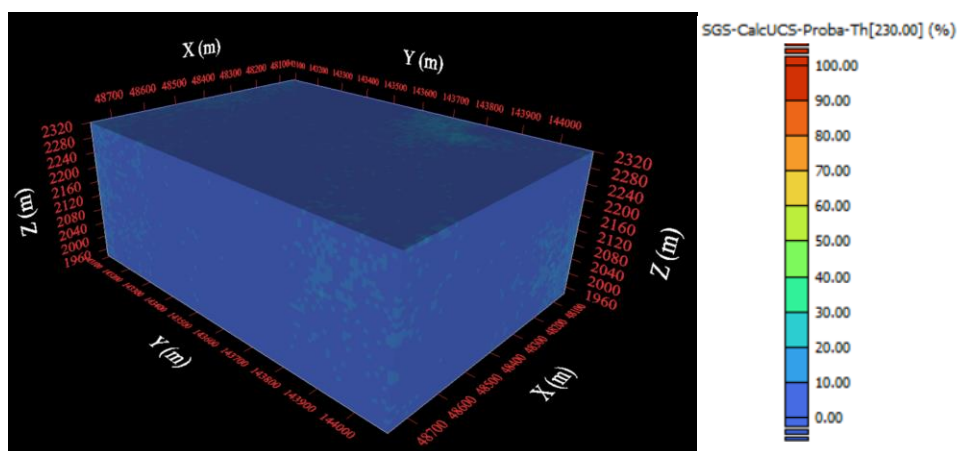


Figura 51. Probabilidad sobre limite UCS de 230 MPa zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

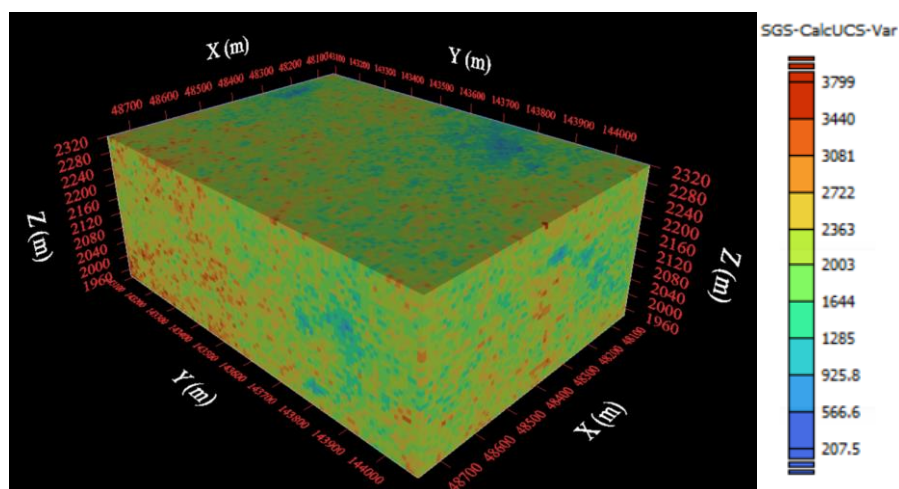


Figura 52. Varianza de simulación zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

5.3.6 Validación simulación

Tabla 18. Estadística antes y después de la simulación en zona norte.

Fuente: Elaboración propia.

Variable	Total Count	Defined Count	Mean	Variance	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Min	Max
CalcUCS	783	753	156	2000	45	0.286	3.3	267
SGS-UCS-Min	270864	270864	34	470.9	22	0.644	3.3	182
SGS-UCS-Max	270864	270864	240	174.9	13	0.055	135.4	267
Mean of SGS-UCS-Simu	270864	270864	156	144.5	12	0.077	51.9	219

Respecto de la información contenida en la Tabla 18, el promedio de las simulaciones entregó el mismo promedio que el de los valores reales, los mínimos y máximos tuvieron un rango inferior al de los datos reales (51.9 versus 3.3 MPa y 219 versus 267 MPa). La varianza y desviación estándar de las simulaciones promedio fueron menores que las reales (de 2000 a 144.5 y de 45 a 12 MPa respectivamente). Esto refleja el efecto de suavizamiento al calcular el promedio de las múltiples realizaciones. Los valores mínimos y máximos fueron relevantes para el análisis de casos críticos.

El histograma y *swath plots* del promedio de todas las simulaciones se presentan en la Figura 53:

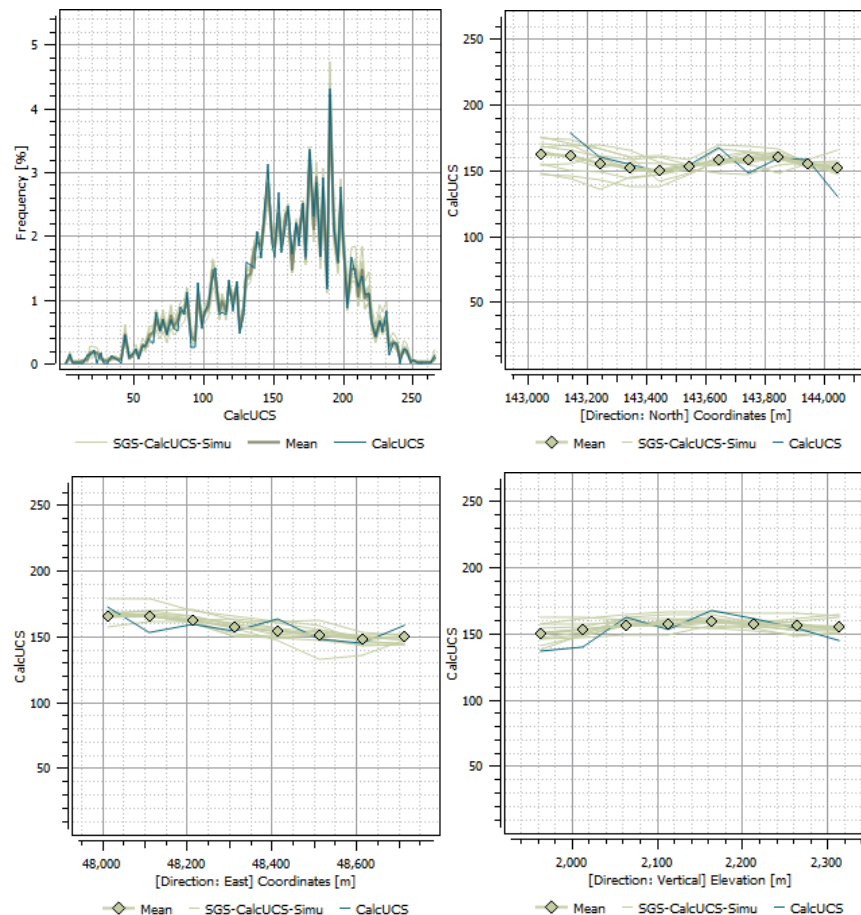


Figura 53. Validación datos simulados de la zona norte con a) histograma y swath plots b) norte, c) este y d) cota.

Fuente: Elaboración propia.

Los *swath plots* indicaron un buen ajuste espacial de los valores simulados respecto de los reales. El promedio de las simulaciones (puntos verdes) se mantuvo próximo a los valores reales (línea azul). Las múltiples simulaciones representadas como líneas verdes indicaron la incertidumbre asociada a la simulación entorno a los valores reales, esta fue reducida y demuestra un buen ajuste. Se logró reproducir adecuadamente la estructura espacial y estadística de los datos.

6. Resultados y análisis

6.1. Zona sur

6.1.1 Comparación de métodos en zona sur

Tabla 19. Comparación estimación con simulación zona sur.

Fuente: Elaboración propia.

Variable	Defined count	Mean	Variance	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Minimum	Maximum
UCS	836	161.5	1424.0	37.74	0.23	49.64	286.3
UCS kriging ordinario	574574	157.6	358.0	18.92	0.12	75.32	230.8
Mean of SGS-UCS-Simu	598272	156.1	303.1	17.41	0.11	76.1	230.5
SGS-UCS-Min	598272	65.2	244.7	15.64	0.24	49.6	180.0
SGS-UCS-Max	598272	248.15	504.6	22.46	0.09	134.4	286.3

Tanto el promedio del kriging ordinario (157.6 MPa) como el promedio de las simulaciones (156.1) se acercaron al valor real de 161.5 MPa, reproduciendo la tendencia general de los datos. El kriging ordinario presentó una notable disminución de la varianza y desviación estándar, pasando de valores reales de 1424 y 37.74 a 358.0 y 18.92 en la estimación. En el caso del promedio de los valores simulados los datos presentaron una dispersión aún menor con una varianza de 303.1 y desviación estándar de 17.41, resultado esperable al ser el promedio de las 100 simulaciones (Tabla 19).

En cuanto a los valores extremos tanto el kriging como la simulación subestimaron los valores máximos y sobre estimaron los mínimos. Al analizar los casos extremos se apreció que el mínimo de las simulaciones reproduce el mínimo real (49.6 MPa) y el máximo de estas reproduce el máximo real (286.3 MPa).

Comparando las figuras resumen de kriging ordinario y el promedio de las simulaciones se evidenció que ambos resultados entregaron un comportamiento espacial de los valores similar. El kriging presentó una mayor irregularidad en su modelo debido a la influencia del elipsoide de búsqueda en su cálculo, en particular a sus dimensiones y la distribución de los datos reales que no permitió el cálculo sobre toda la grilla (ver Figura 54). Por otro lado, el promedio de simulaciones entregó un modelo mucho más suave en cuanto a estructuras espaciales, al no verse influenciado directamente por el elipsoide, si no por la cantidad de simulaciones realizadas en la misma grilla. Esto permitió identificar de mejor manera las áreas con presencia de datos de bajo y alto valor (ver Figura 55).

Si bien el kriging ordinario permite estimar la tendencia global de los datos, pierde capacidad de reproducir la variabilidad local y los valores extremos, fundamentales en el análisis de riesgos. La simulación geoestadística permite representar la variabilidad por medio de múltiples realizaciones permitiendo un análisis de riesgo más robusto.

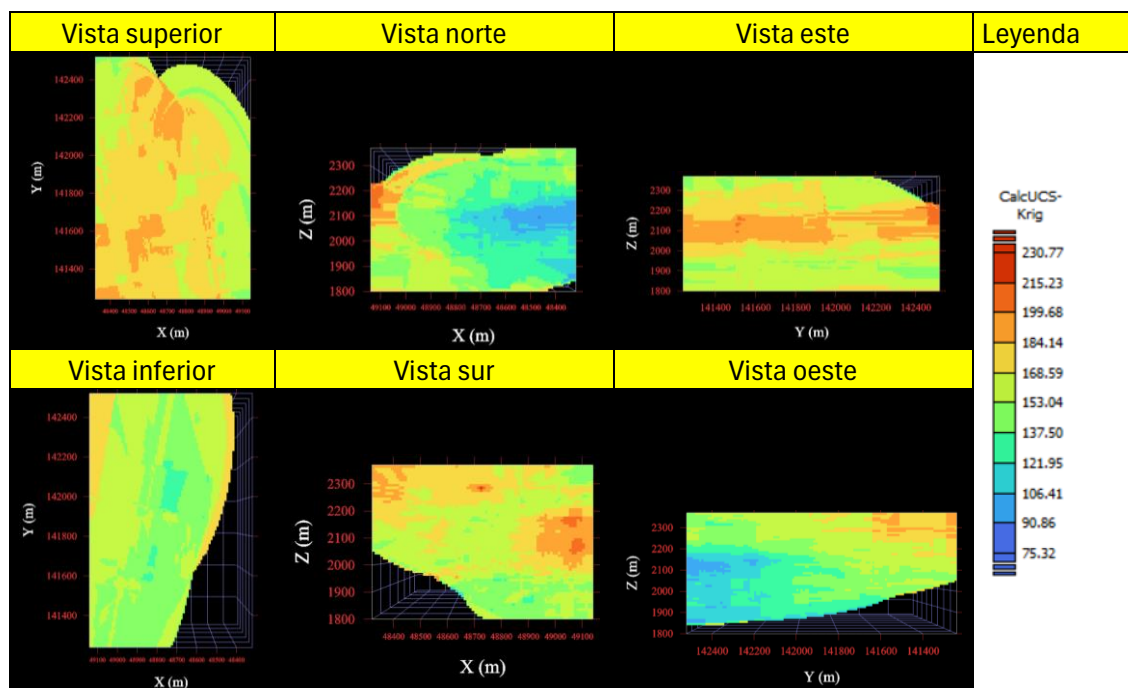


Figura 54. Vistas estimación kriging ordinario zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

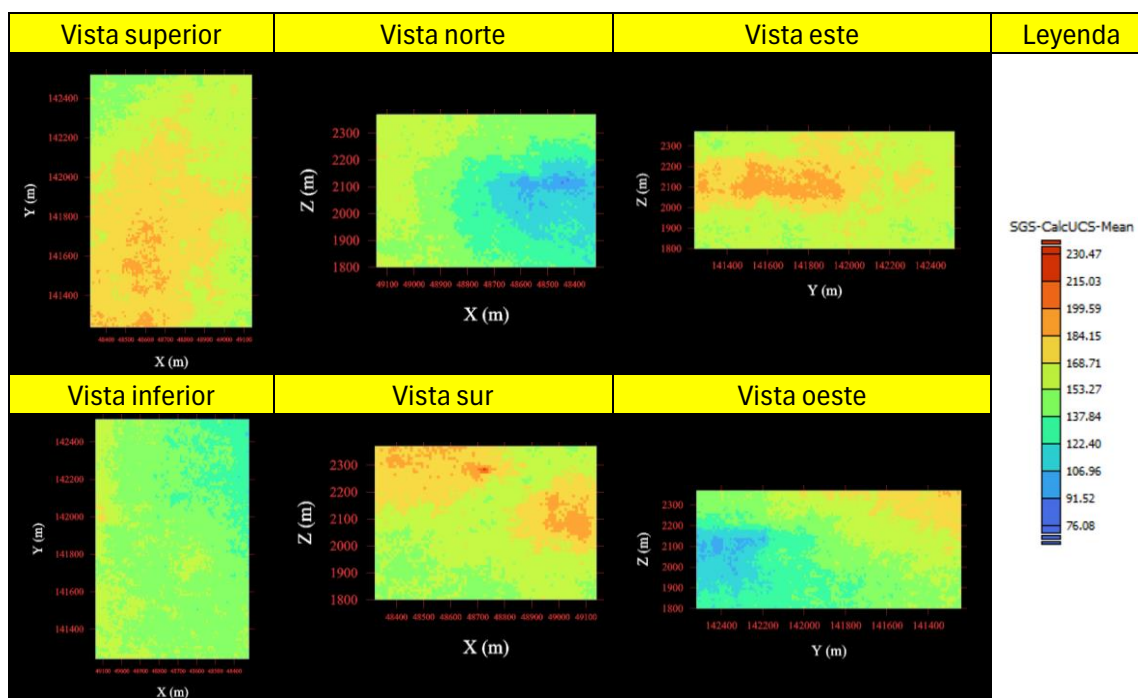


Figura 55. Vistas promedio de simulaciones zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

Observando la Figura 54 y la Figura 55 se identificaron areas de bajos valores en la zona norte de la Vista oeste entre las cotas 2200 - 1900, pero dentro de los rangos 50 a 120 MPa, indicando una roca resistente según el IEAG (Vista norte tambien evidenció el comportamiento en su lado común). El comportamiento contrario se observó en la Vista este en el rango de profundidad 2250 – 2000 m, con un rango de valores entre 170 a 199 MPa, indicando una roca muy resistente (Vista sur comparte la tendencia en su lado común).

En la Vista superior tambien se evidenciaron valores altos en el sector suroeste en un rango de 170 a 200 MPa. En la vista sur entre las cotas 2400-2200 el modelo presentó valores de 215 a 160 MPa. Los valores disminuyeron a mayores profundidades, desde 160 a 120 MPa en las máximas profundidades.

El análisis se complementó con los peores y mejores casos de simulación, que, si bien no corresponden a las mejores estimaciones y entregan una distribución espacial heterogénea, indican escenarios útiles para el análisis de riesgo.

El mínimo de las simulaciones (Figura 56) ayudó a corroborar las areas de mejores valores de UCS (con un rango de valores de 80 a 180 MPa), donde esta se mantuvo entre las cotas 2250 – 2000 m, comportamiento observado en Vista este y compartido por Vista sur. Tambien se evidenciaros zonas de valores intermedios a altos en la zona superior de la Vista sur (comportamiento compartido por la Vista oeste), entre las cotas 2400 – 2200 m, con valores dentro del rango 68 – 180 MPa.

El mínimo de las simulaciones entregó información general de los valores bajos de UCS, ya que muchos de los datos espaciales tomaron ese valor. Las principales zonas de bajos valores correspondieron a las detectadas en la Vista oeste, comportamiento compartido por la Vista norte y Vista inferior, en general, la cantidad de valores mínimos aumentó en dirección oeste (ver vista oeste).

En el caso máximo (Figura 57) la mayor parte de los datos tomó altos valores, ciertas zonas mantuvieron una distribución baja de valores en el rango de 210 a 130 MPa (comparadas con el valor máximo). Esto se da principalmente en el comportamiento compartido por la Vista norte y Vista oeste, entre las cotas 2200 a 2000 m y en menor medida en la Vista inferior del modelo. En las cotas de mayor profundidad predominan valores entre 216 a 250 MPa.

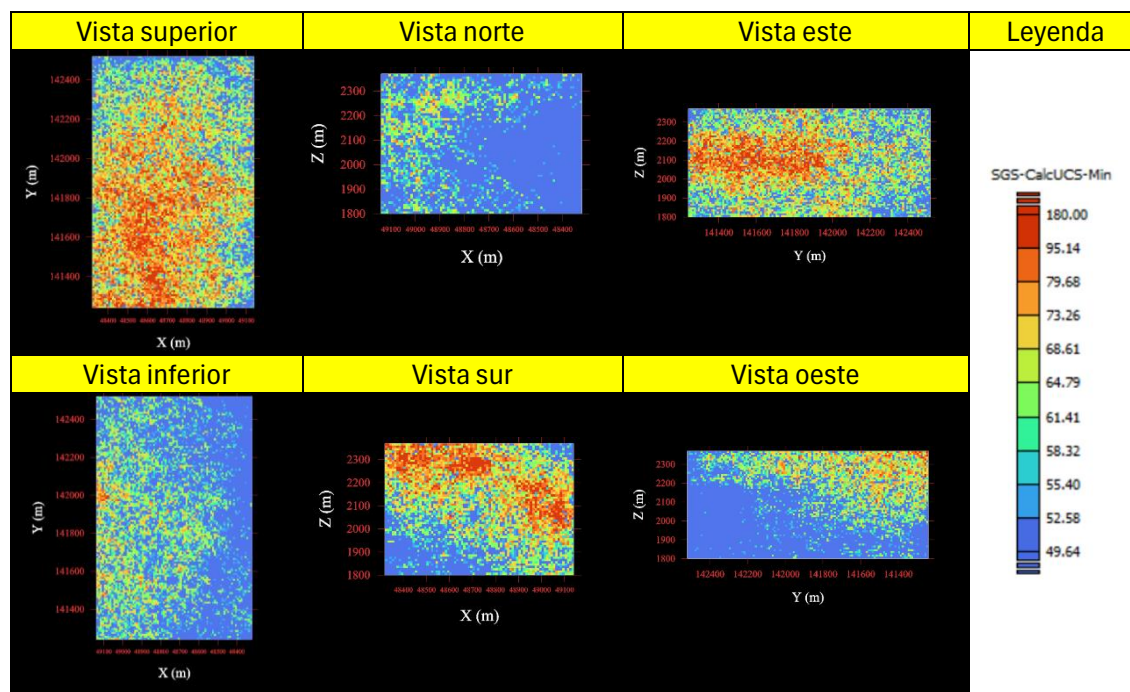


Figura 56. Vistas mínimo de simulaciones zona sur.
Fuente: Elaboración propia

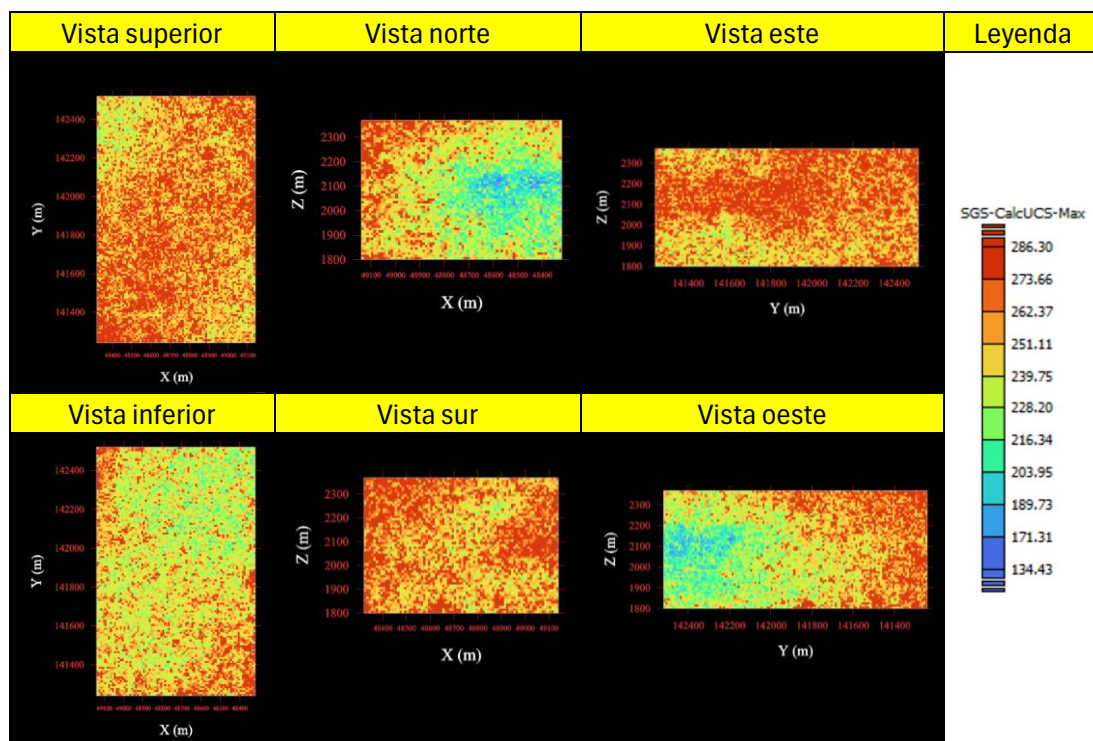


Figura 57. Vistas máximo de simulaciones zona sur.

Fuente: Elaboración propia

6.1.2 Análisis de incertidumbre:

Se omitió en análisis del primer límite de 15 MPa, esto debido a que la estadística descriptiva de la zona sur indicó que los datos se encontraban por sobre los valores de 49.6 (ver Tabla 3).

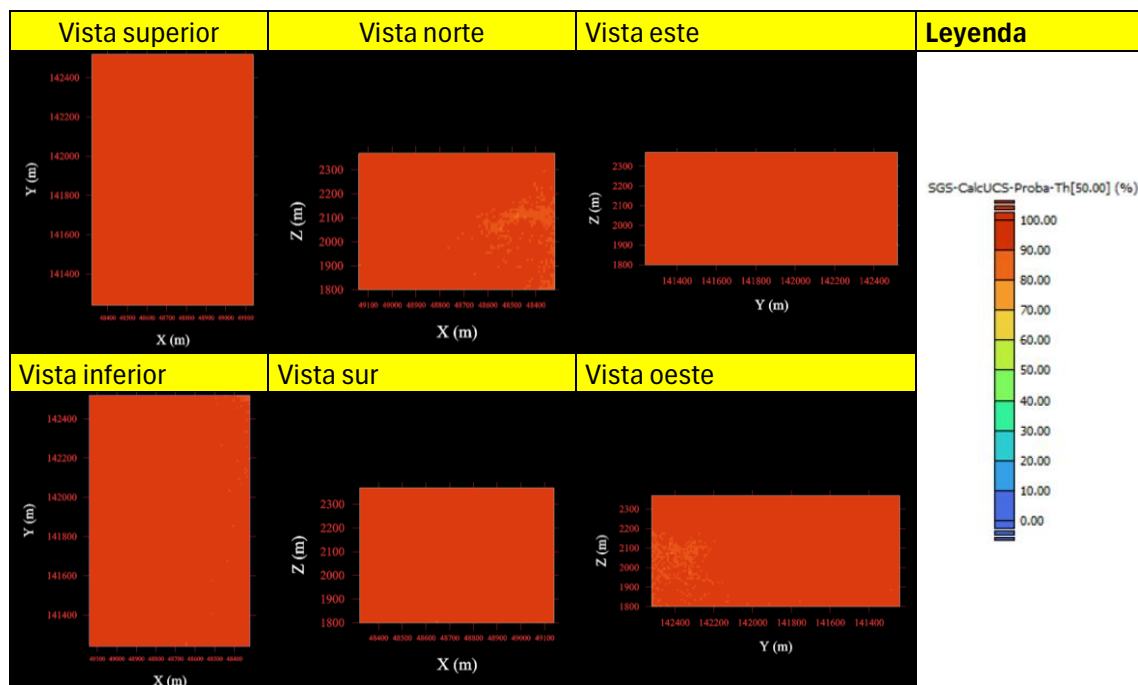


Figura 58. Vistas probabilidad sobre límite de 50 MPa zona sur.

Fuente: Elaboración propia

Se apreció que para el total de simulaciones la mayor parte de estas entregó valores de resistencia a la compresión uniaxial por sobre el límite de 50 MPa (ver Figura 58), exceptuando la zona compartida por la Vista norte y Vista este, específicamente desde los 2200 m en cota hasta la máxima profundidad. La probabilidad de que los valores ubicados en la zona superaran el umbral se encontró en el rango de un 80 – 90%. Análisis consistente con la estadística descriptiva de la zona, la cual presenta un mínimo de 49.6 MPa en valores de UCS y un histograma de comportamiento normal con una mediana de 162 MPa.

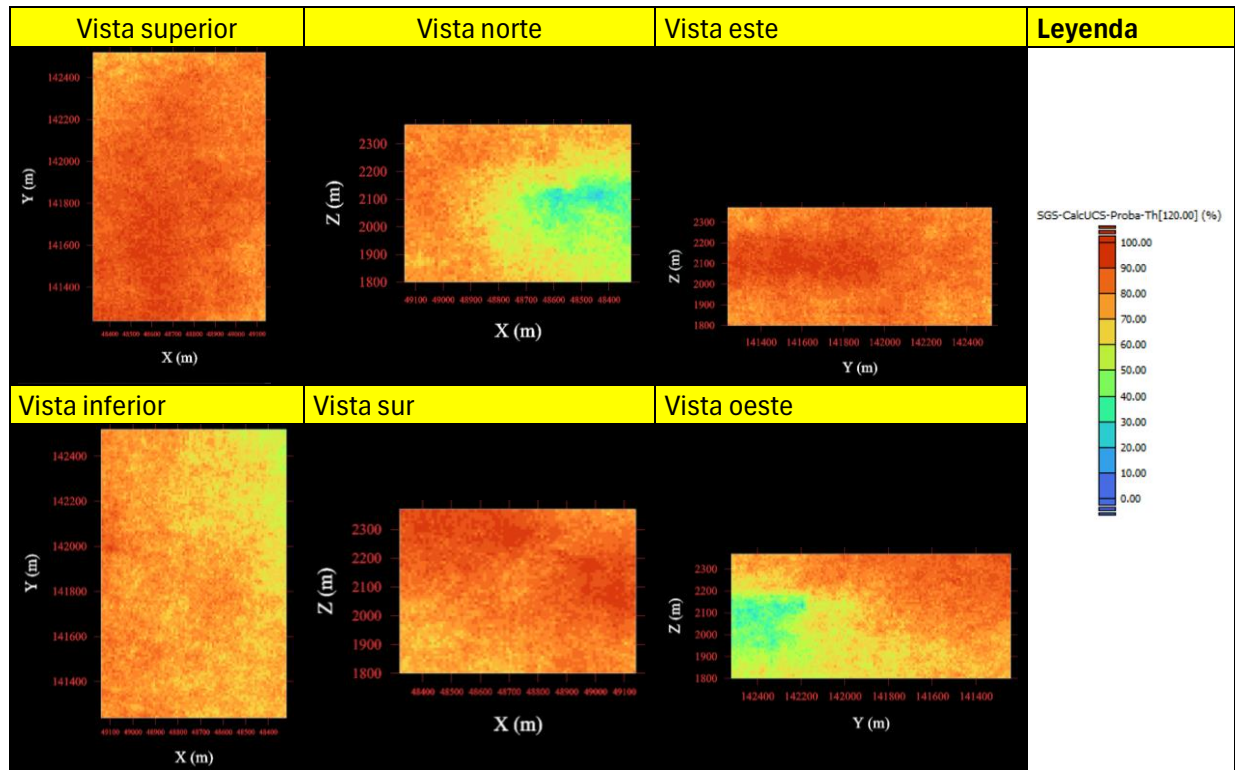


Figura 59. Vistas probabilidad sobre límite 120 MPa zona sur.

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de las simulaciones sobre el límite de 120 MPa (ver Figura 59), la menor probabilidad de superar el umbral se encontró en la zona de comportamiento compartido entre la Vista norte y Vista oeste, entre las cotas 2200 y 2000 m, con una probabilidad en el rango de 20 a 50% (menos de 50 simulaciones obtuvieron valores superiores a 120 MPa), lo que aumentó la incertidumbre de la zona. La probabilidad también fue menor en la Vista inferior (comportamiento compartido por la Vista oeste), desde esta se apreció la disminución gradual a medida que se avanza en dirección noroeste llegando a valores de 70 – 50%.

Las probabilidades más altas de superar el umbral se encontraron en la Vista superior en la dirección sur, comportamiento compartido por la Vista oeste, entre las cotas 2400 – 2100 m con un rango de probabilidad entre 70 y 100% de superar el valor límite. De la misma forma en la Vista este entre las cotas 2200 y 2000 la probabilidad de superar el umbral alcanza valores de 70 a 100% (comportamiento compartido por la Vista sur).

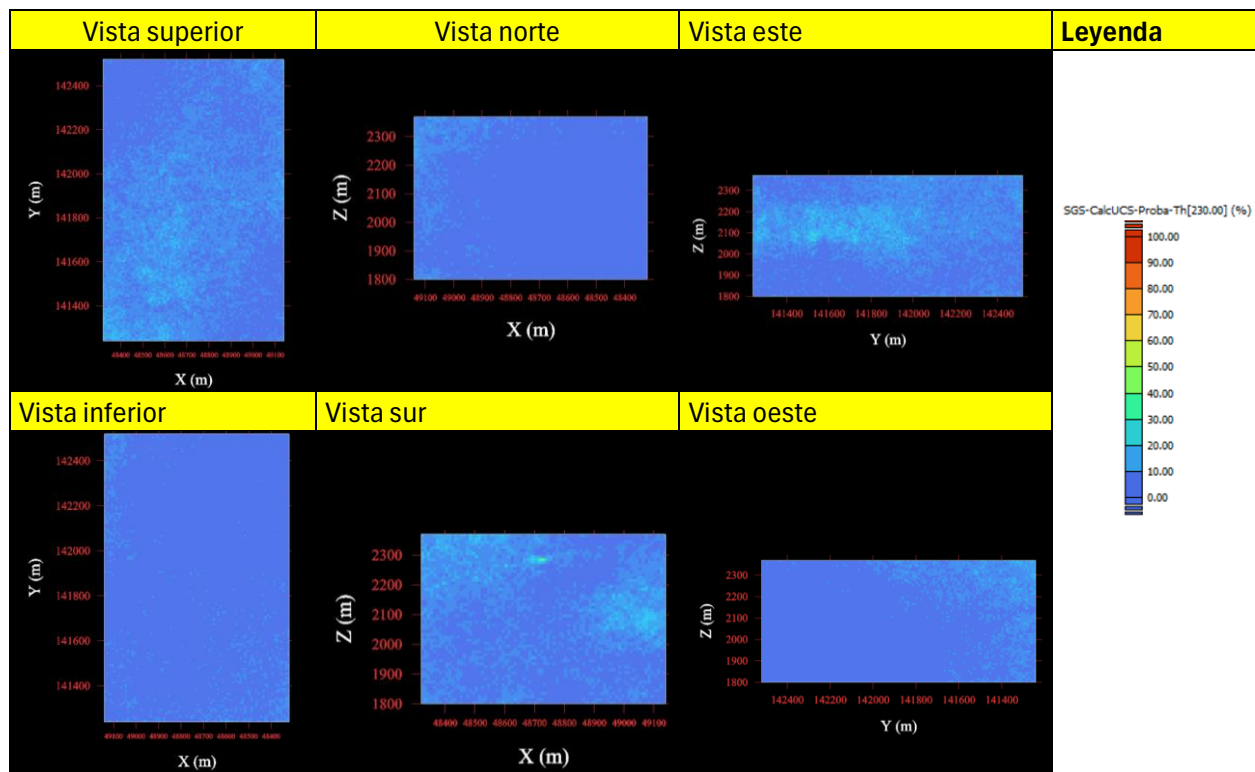


Figura 60. Vistas sobre límite 230 MPa zona sur.

Fuente: Elaboración propia

La mayor parte de las probabilidades de superar el umbral de 230 MPa fueron cercanas a 0 (ver Figura 60), exceptuando la Vista superior con un aumento de las probabilidades en dirección el sur, comportamiento compartido por la Vista oeste, la probabilidad aumentó alcanzando valores máximos de 40%. En la Vista sur entre las cotas 2200 y 2000 los valores también presentaron una mayor probabilidad de superar el límite de 230 MPa entre un rango de 10 a 40% (comportamiento compartido por Vista este).

6.2. Zona norte

6.2.1 Comparación de métodos zona norte

Tabla 20. Comparación estimación con simulación zona norte.

Fuente: Elaboración propia

Variable	Defined count	Mean	Variance	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Minimum	Maximum
UCS	753	156	2001	45	0.286	3.0	267
UCS kriging ordinario	270864	157	205	14	0.091	52.0	222
Mean of SGS-UCS-Simu	270864	156	144.5	12	0.077	51.9	219
SGS-UCS-Min	270864	34	470.9	22	0.644	3.3	182
SGS-UCS-Max	270864	240	174.9	13	0.055	135.4	267

Los valores de media de los datos estimados (157 MPa) y simulados (156 MPa) son prácticamente iguales a la media real (156 MPa). La varianza y desviación estándar disminuyó considerablemente, pasando de los valores reales 2001 y 45 a 205 y 14 en los estimados, en los simulados se obtuvieron valores de 144.5 y 12 (ver Tabla 20).

El rango de valores extremos de la estimación (52 – 222 MPa) y promedio de simulación (51.9 – 219 MPa) fueron menores al de los datos reales (3 – 267 MPa) debido al suavizamiento de la estimación y el efecto de promediar las 100 realizaciones. Para estudiar los valores extremos fueron analizados los casos de simulación de valores máximos y mínimos, permitiendo evaluar en conjunto al promedio casos optimistas o pesimistas para los datos.

Al observar las vistas de la estimación por kriging ordinario (Figura 61) se apreció una fuerte influencia del elipsoide de búsqueda en la determinación de valores, identificada por los fuertes cambios de UCS en el espacio, siguiendo curvas con forma elipsoidal. Por el contrario, el promedio de simulaciones (Figura 62) presentó una menor cantidad de cambios bruscos en los datos, entregando una variable más continua en el espacio. En las simulaciones al poseer distintas realizaciones se empleó la mejor y la peor para analizar casos favorables o críticos en torno a la identificación de áreas de altos y bajos valores.

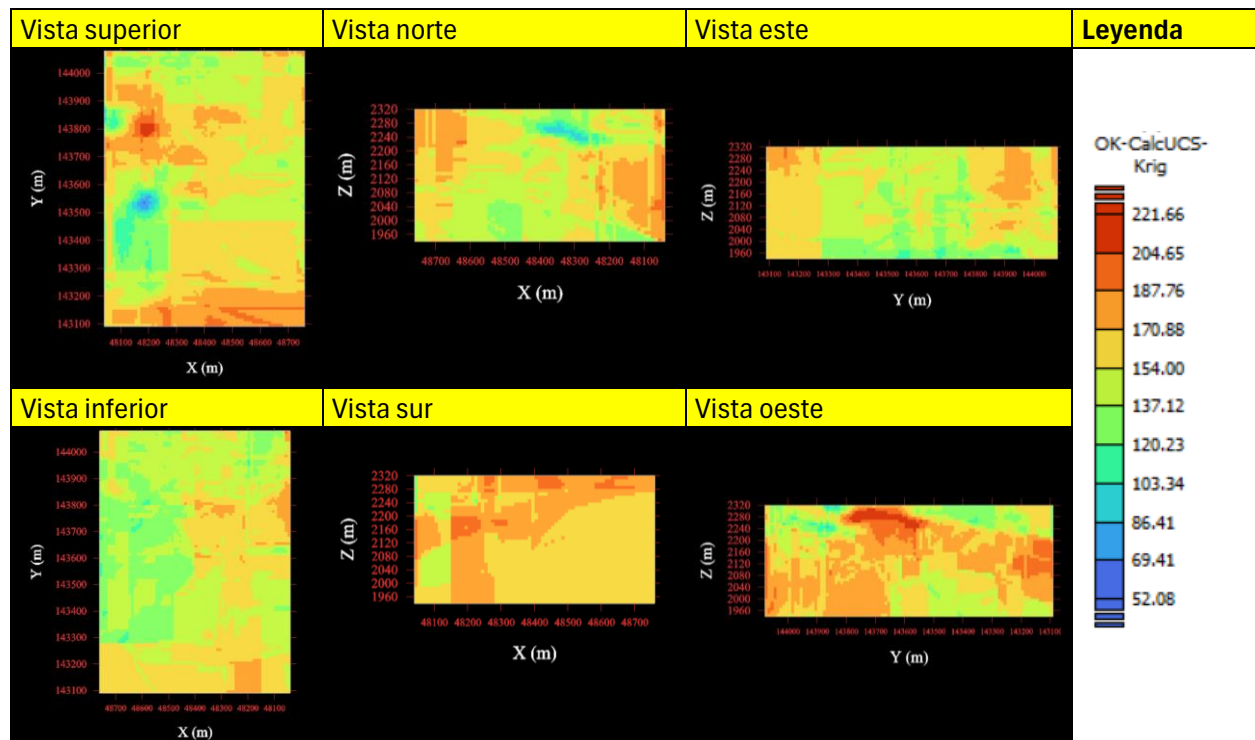


Figura 61. Vistas estimación kriging ordinario zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

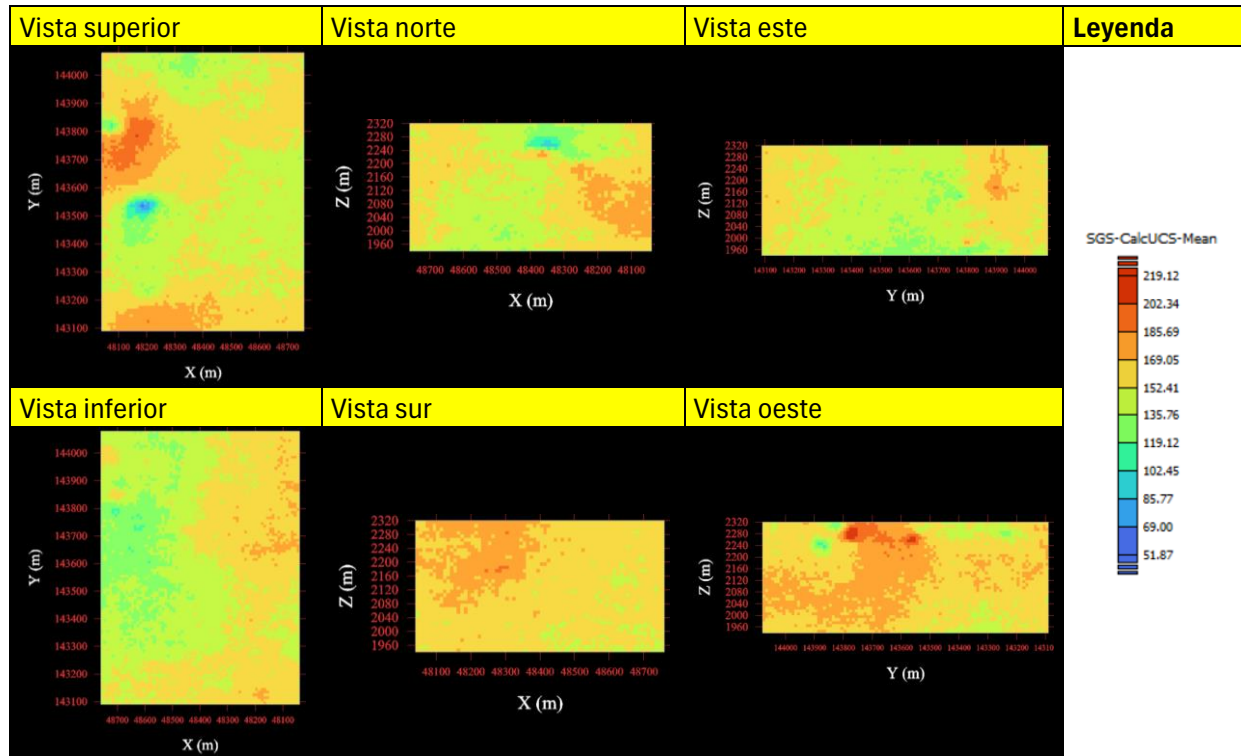


Figura 62. Vistas simulación zona norte.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos indicaron un comportamiento promedio, con rango de valores entre 140 a 185 MPa. Se presentó una mayor concentración de valores altos en la Vista superior, entre las coordenadas norte 143600 y 143800, comportamiento compartido por la Vista oeste donde se identificó que los valores se mantienen altos también en la cota, todos estos entre el rango de 170 a 220 MPa.

En la Vista superior se apreció una zona con valores altos entre las coordenadas este 48100 y 48400, comportamiento compartido por la Vista sur en la cual se identificó que estos valores persistieron en la cota hasta los 2120 m, en un rango de valores de 170 a 200 MPa

En la vista superior también se identificaron tres zonas de bajos valores: La primera corresponde a la ubicada en el área que rodeó a la coordenada (norte, este) = (48180,143550), con valores en el rango de 119 a 50 MPa. La segunda zona correspondió a la Vista superior con comportamiento compartido con la Vista norte entre las coordenadas este 48400 a 48300, donde se apreció que los valores disminuyen desde la zona superior hasta la cota 2240, con valores de UCS de 70 a 130 MPa.

En la Vista inferior se apreció como los valores tienden a disminuir, pasando de 170 MPa en la zona oeste a 120 MPa en la zona este, al ver la Vista este de los datos se apreció que esta tendencia también persiste en parte de la cota mínima aumentando los valores de UCS al aumentar la cota.

Para los casos mínimo y máximo se obtuvieron distribuciones espaciales heterogéneas, pero que aún así indicaron tendencias respecto del comportamiento espacial de los datos.

Para el mínimo de las simulaciones (Figura 63) se obtuvo que los valores bajos se distribuyeron en gran parte del modelo. Especialmente en la Vista superior, entre los rangos 48150 – 48250 m de la coordenada

este y 143500 y 143600 m de la coordenada norte, los valores de UCS fueron mínimos. En la vista inferior, de igual forma se apreció el comportamiento en la dirección este, donde los valores de UCS en todo el modelo tendieron a disminuir.

Las zonas que principalmente mantuvieron valores relativos altos correspondieron a las visualizadas en la Vista superior en conjunto con la Vista oeste al poseer comportamiento compartido, entre las coordenadas norte 143900 y 143600 m, con un rango de valores de UCS entre 62 a 182 MPa. Los mismo se apreció en la misma Vista superior en conjunto con la Vista sur, entre las coordenadas este 48200 a 48300 m. Este comportamiento persiste en la profundidad al analizar la vista sur, donde se mantuvieron valores intermedios y altos desde la zona superior hasta la cota 2160 m con predominancia de valores entre 50 y 99 MPa.

Para el máximo de los datos simulados (ver Figura 64) la mayor parte de los datos tomaron valores intermedios a altos. Se identificaron las zonas de mayor concentración de valores altos, correspondientes a, en la vista superior los datos ubicados entre las coordenadas norte 143800 y 143600 m en el sector oeste alcanzando valores máximos de 266 MPa. También se aprecia una concentración de datos máximos en la vista oeste entre las coordenadas 143800 y 143600 m norte, en la zona superior del modelo. Alcanzando en gran parte del area valores por sobre 251 MPa.

Los valores mínimos que mantuvieron su principal tendencia fueron identificados en la Vista superior, entre las coordenadas 143600 y 143450 m norte, en la zona oeste con valores entre el rango 135 a 220 MPa. En la vista norte, en la zona superior entre las coordenadas 48400 y 48300 m norte, los datos tomaron valores dentro del rango 230 a 180 MPa.

En la vista oeste se apreció principalmente en el area superior los rangos de coordenadas norte 143900 - 143800 m y 143400 – 143200 m, valores inferiores e intermedios, dentro del rango 199 a 230 MPa.

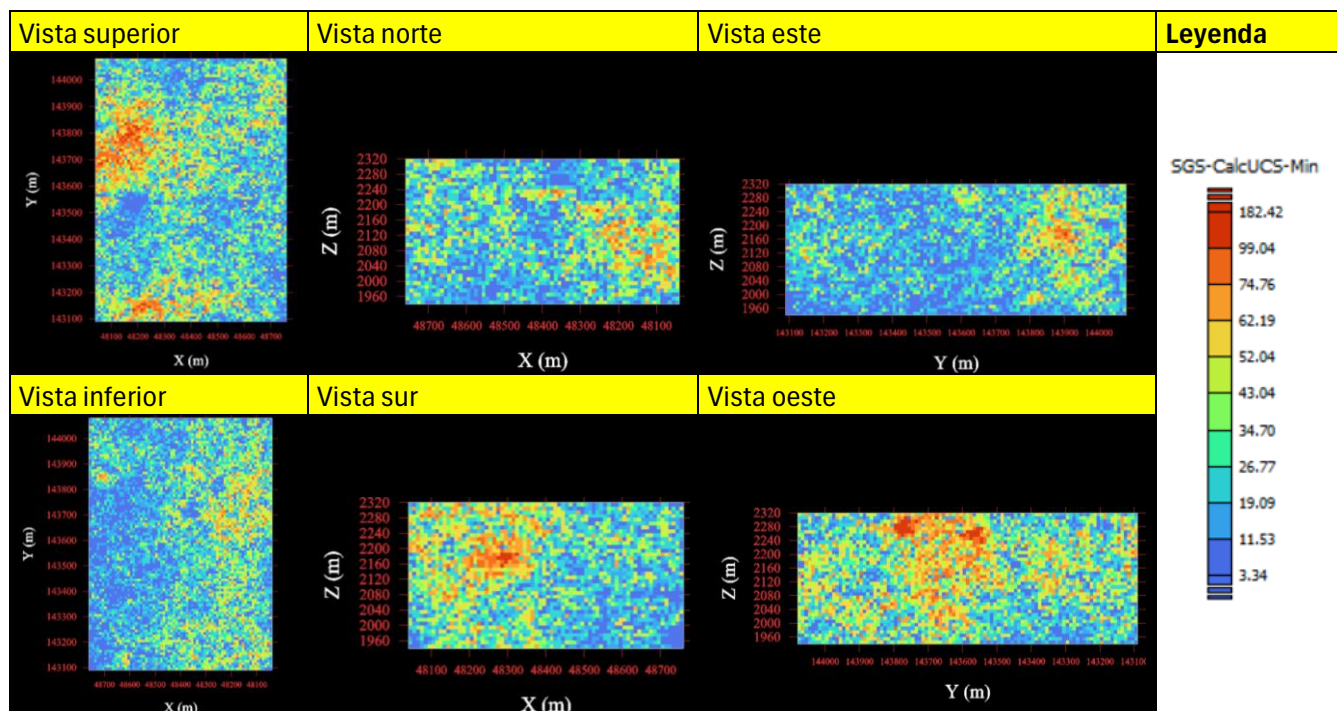


Figura 63. Vistas mínimo de simulaciones zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

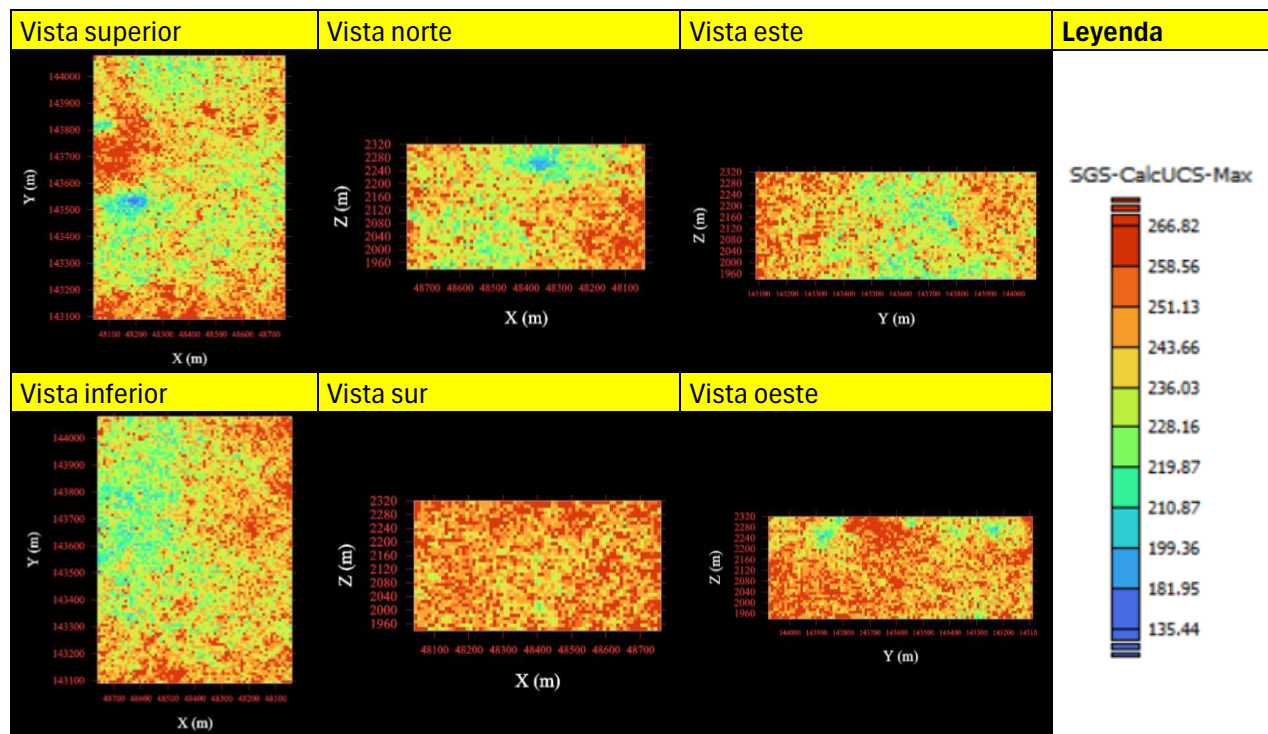


Figura 64. Vistas máximo de simulaciones zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 Análisis de incertidumbre:

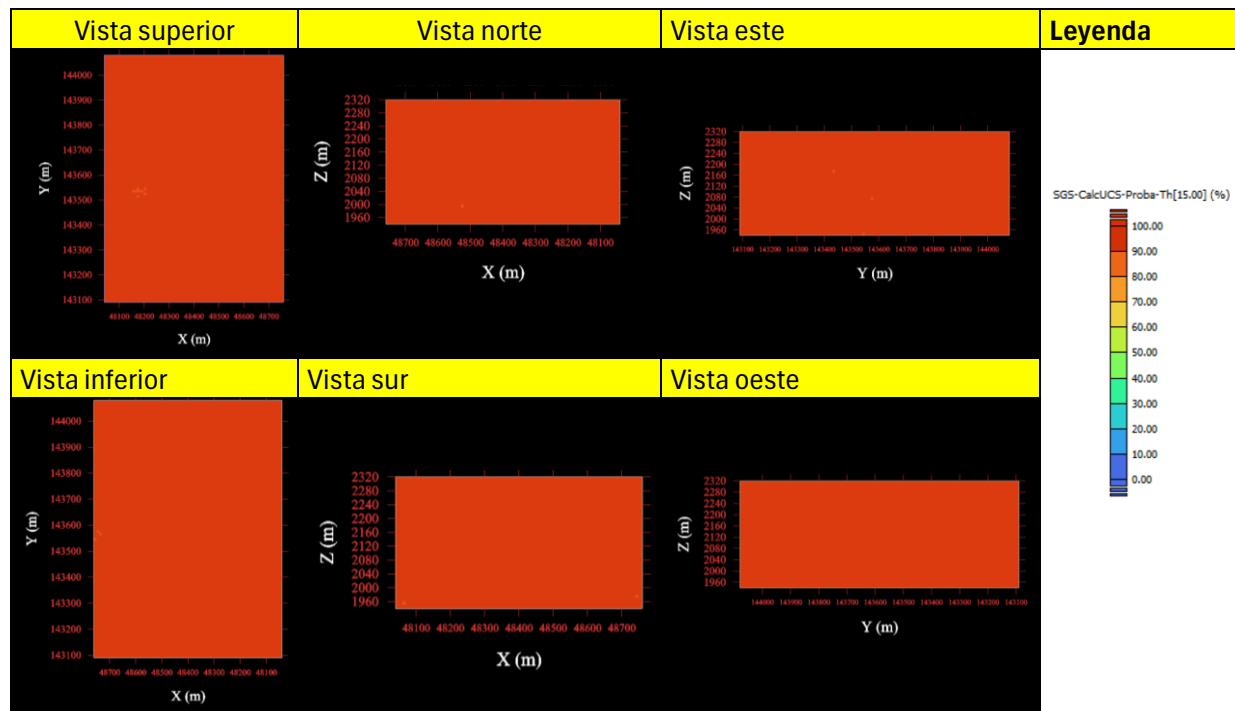


Figura 65. Vistas probabilidad sobre 15 MPa zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

En la determinación de valores por sobre el límite de 15 MPa se obtuvo que casi todo el modelo se encuentra por sobre este valor (ver Figura 65). Existieron valores encontrados en la vista superior, norte y este. Estos se encontraron en el rango de probabilidad de 80 – 90%, presentando una baja probabilidad de ser inferiores.

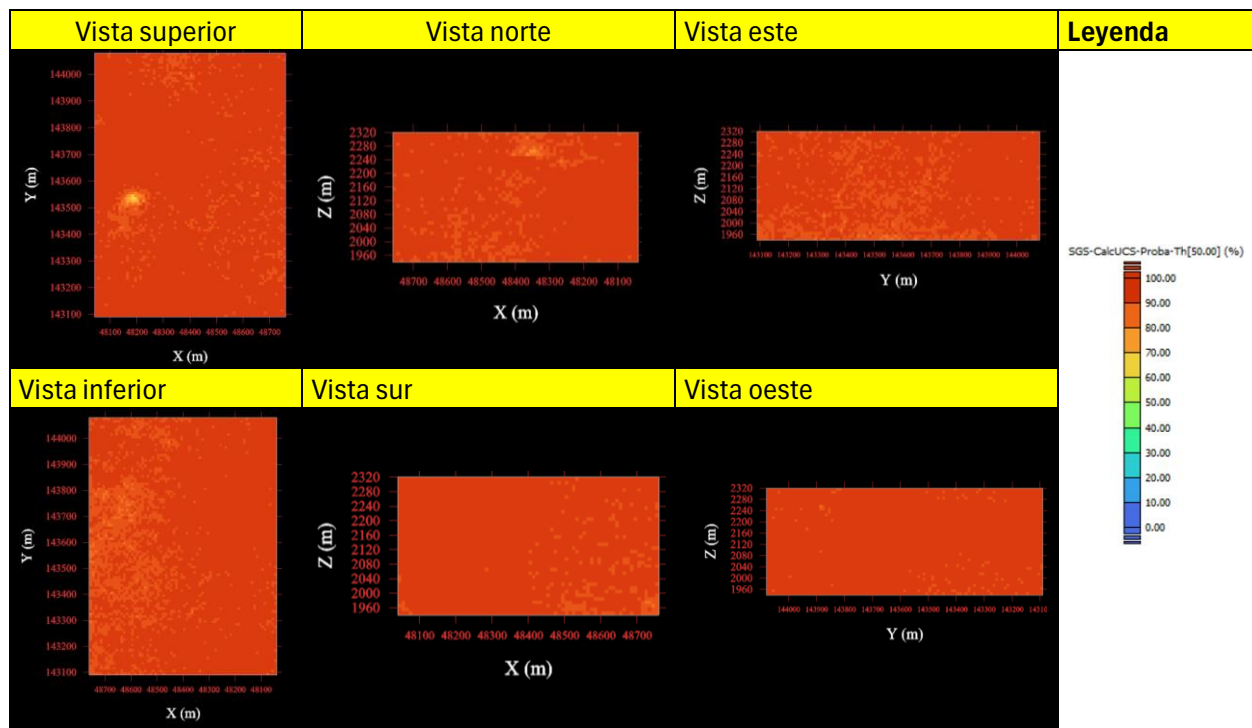


Figura 66. Vistas probabilidad sobre 50 MPa zona norte.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 66 de valores que superan los 50 MPa se obtuvo que el área que encierra los valores cercanos al punto (norte, este) = (48200, 135550) de la Vista superior, presentó probabilidades del 60% por sobre el límite, representando un área de mayor incertidumbre respecto al valor real de los datos. En la Vista inferior se aprecia que los valores disminuyen su probabilidad de superar el umbral a medida que se avanza en la dirección este pasando de 100% a 80 – 90%, comportamiento compartido por la Vista este. La Vista norte indicó menores probabilidades de superar el umbral en los valores cercanos al punto (este, cota) = (48450, 2260) dentro del rango 70 – 90%. En la dirección este de la misma vista las probabilidades disminuyeron tomando valores en el rango 80 – 90%.

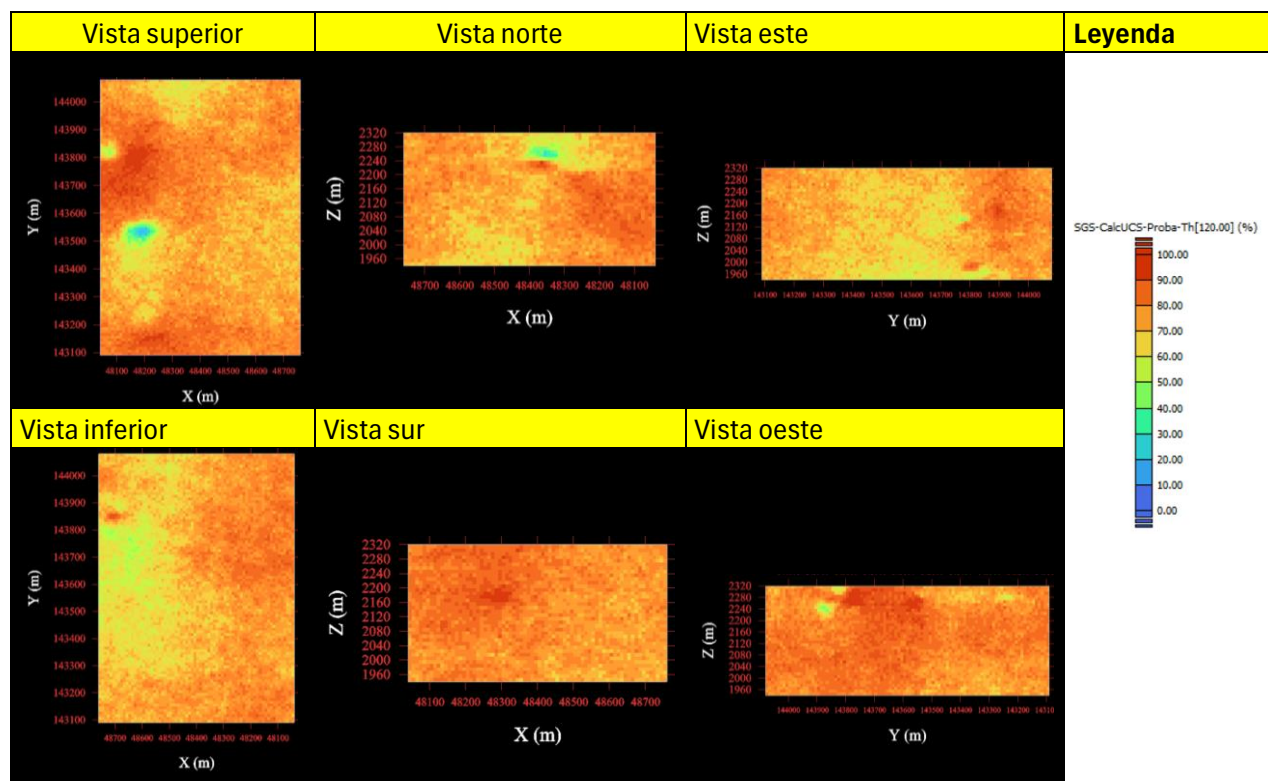


Figura 67. Vistas sobre probabilidad 120 MPa zona norte.

Fuente: Elaboración propia.

En el mapa de probabilidad por sobre el límite de 120 MPa (Figura 67) se obtuvo que, en la Vista superior, en el área alrededor de la coordenada (este, norte) = (48200,143550) los valores presentaron una menor probabilidad de encontrarse sobre el límite, en un rango de 50 a 10%. Lo mismo sucedió en el área circundante a la coordenada (este, norte) = (48100,143800) con un rango de valores entre 60 a 50%.

En la Vista norte se detectó otra zona de baja probabilidad sobre umbral en la parte superior del modelo entre la coordenada este 48300 y 48400 m, con valores que van del 50% hasta mínimos de 20%.

La probabilidad en la Vista inferior presentó una disminución en la dirección este de los valores, pasando de 90-80% en el oeste, llegando a mínimos de 50% en el este (comportamiento compartido por la zona inferior de la Vista este).

En la Vista este se apreció que los valores ubicados a los extremos del modelo tendieron a ser mayores que los centrales, alcanzando máximos en la dirección norte de la misma vista de 100% a niveles medios de cota.

En la Vista oeste se apreciaron grupos puntuales de valores con baja probabilidad (40-60%) sobre el límite en el rango de 143900 - 143800 m de la coordenada este. A escasos metros de esta zona de baja probabilidad se encontró una zona de alta probabilidad sobre el límite de 120 MPa, entre los valores 143800 y 143700 m (80-100%).

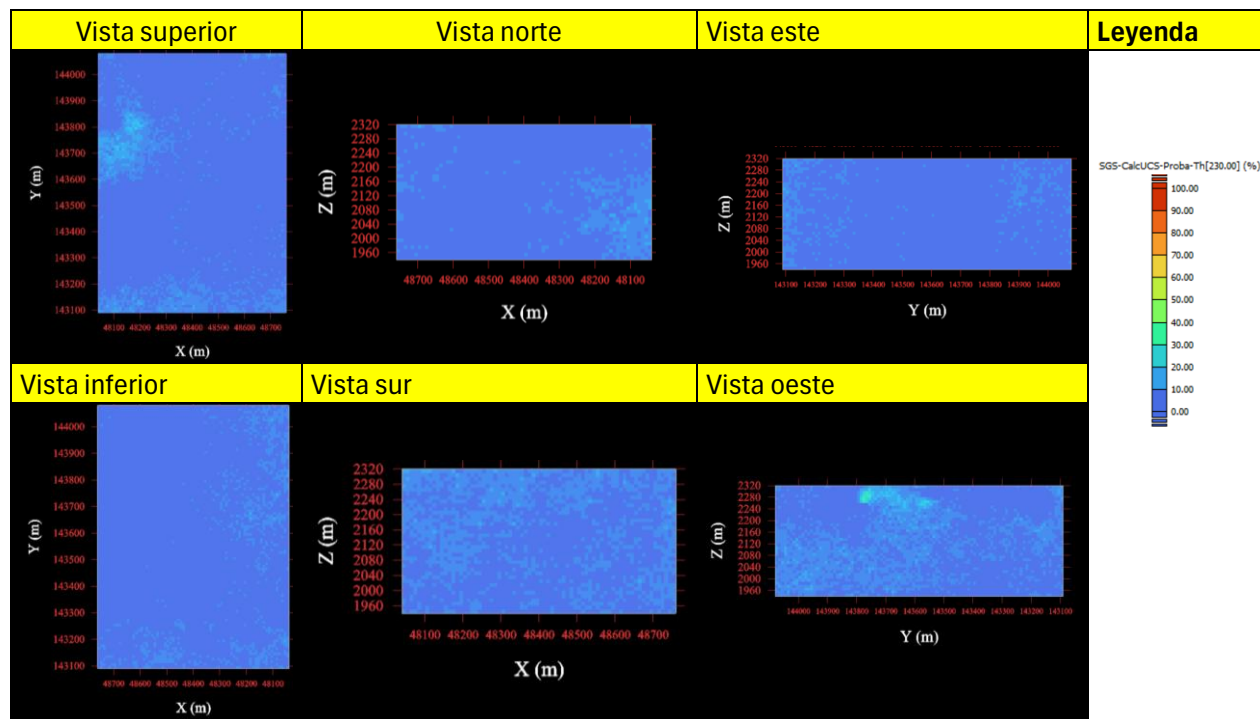


Figura 68. Vistas sobre probabilidad 230 MPa zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

En las vistas del mapa de probabilidad sobre el límite de 230 MPa (Figura 68) se obtuvieron en general zonas de bajos valores de probabilidad. Las principales áreas que con probabilidad de poseer valores superiores al de análisis correspondieron la zona oeste entre las coordenadas norte 143600 y 143900 m de la Vista superior, alcanzando probabilidades máximas de 50%. Otra zona de probabilidad correspondió a la identificada en la Vista oeste, donde la parte superior de los datos entre las coordenadas norte 143800 a 143550 m, con valores predominantes de 30% llegando a máximos en 143800 de 60%.

6.3. Aplicación: Relación entre mapas de probabilidad y profundidad de falla en túneles.

Una aplicación práctica de los mapas de probabilidad fue la estimación preliminar de la profundidad de falla. La geoestadística permitió por medio de la simulación determinar las áreas de mayor probabilidad sobre un determinado umbral, de esta forma podemos mejorar la planificación en base a valores de referencia, como por ejemplo 120 MPa en cuanto a calidad de roca.

El mapa graficado contempló los bloques de UCS con probabilidad 100 $\pm$ 1% de encontrarse por sobre el valor de 120 MPa, es decir, calidades de roca mayores o iguales a la resistente (ver Figura 69).

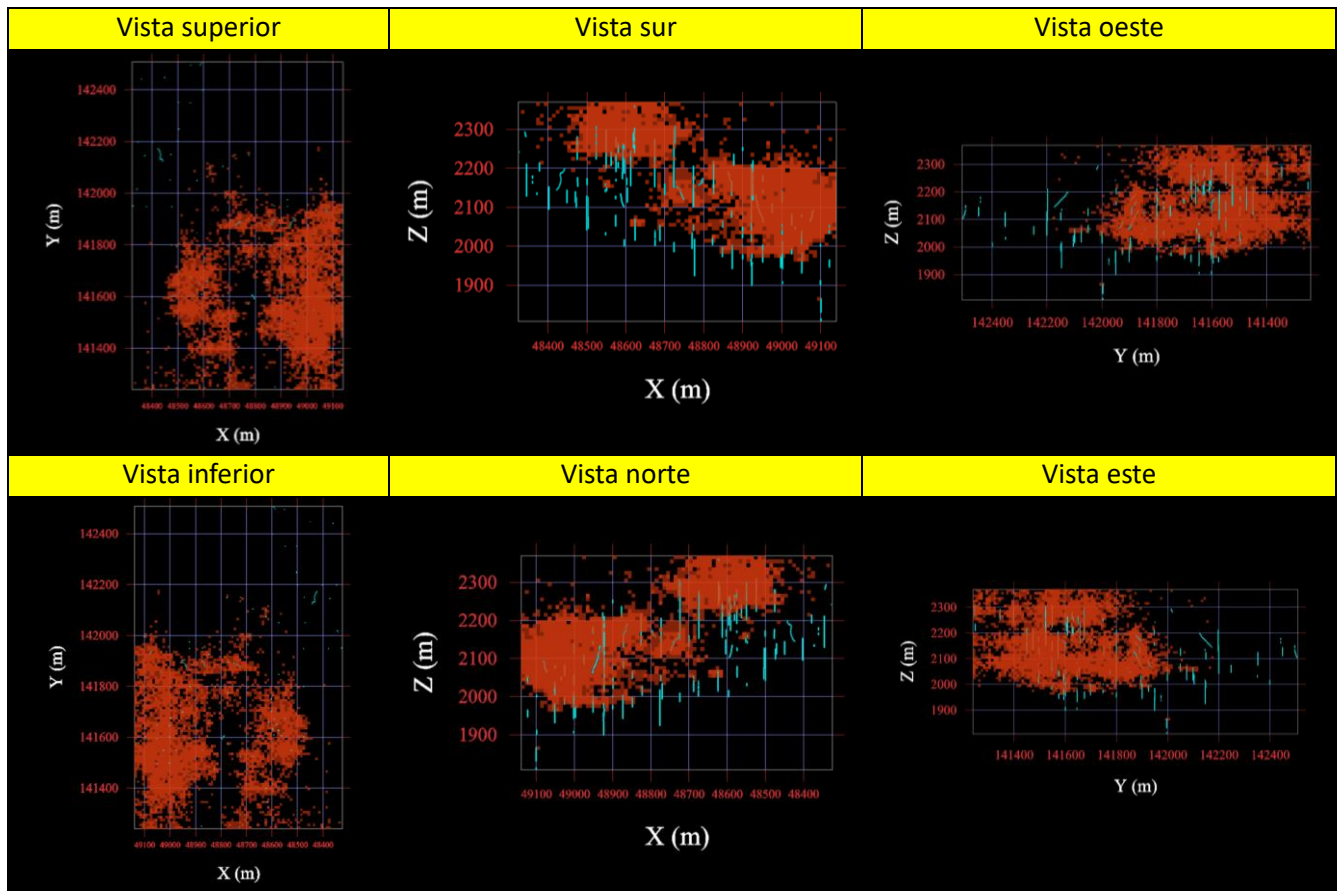


Figura 69. Probabilidad de 100% +/- 1% de encontrarse sobre el límite de 120 MPa. Zona sur.
Fuente: elaboración propia.

Esta información se vuelve útil tanto para determinar zonas de mayor-menor estabilidad como para determinar otros parametros de interés en diversas profundidades, como lo es la profundidad de falla en túneles.

La profundidad de falla es la profundidad a la cual, desde el contorno de la excavación, se generan grietas y laminamiento producto de los esfuerzos tangenciales, los cuales superan la resistencia de la roca. Esta es determinada de forma empírica a partir de un gráfico que recopila diferentes casos alrededor del mundo (ver Gráfico 26).

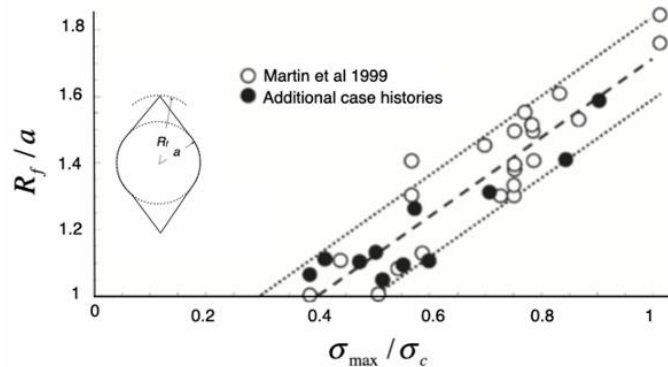


Gráfico 26. Profundidad de falla predicha por medio de profundidad de fallas medidas.
Fuente: Extraído de “Influence of Preconditioning and Tunnel Support on Strain Burst Potential” (Delonca et al., 2023)

Dónde:

- $\sigma_{max} = 3 \sigma_1 - \sigma_3$.
- $\sigma_c = UCS$.
- $a = \text{Diametro excavación}$.
- $R_f = \text{Profundidad de falla}$.
- Adicionalmente se tiene: $\sigma_1 = 1.4 \sigma_3 = 1.4 \rho g h$
- Caso de estudio, condición de placas convergentes con σ_1 horizontal y σ_3 vertical.

Para este caso de estudio se consideró la ubicación de la mina a una cota de 2580 msnm, para una mejor interpretación se hizo uso de la cota 2150 msnm en la zona sur la cual fue una de las con menor varianza tanto de kriging como simulación (ver anexo 10.3), esto con el objetivo de ubicar aleatoriamente un túnel de 10 metros de radio en las áreas de interés.

Para la profundidad de interés se identificaron los bloques con probabilidad de 100 +-1 % de poseer un valor mayor o igual a 120 MPa (ver Figura 70).

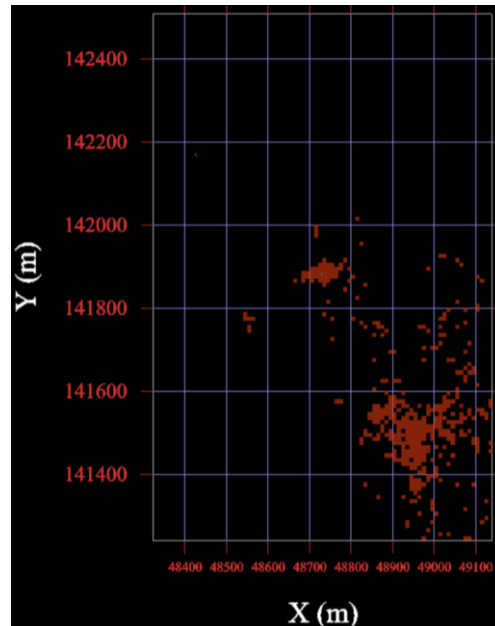


Figura 70. Bloques en cota 2150 msnm con probabilidad 100 +-1% sobre límite de 120 MPa.

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Valor del bloque (100\% probabilidad)} \geq 120 \text{ MPa}$$

Si:

$$\text{Valor de bloque } (\sigma_c) \geq 120 \text{ MPa} \rightarrow \frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} \leq \frac{\sigma_{max}}{120 \text{ MPa}}$$

Donde σ_{max} es un valor único a una determinada profundidad, σ_c en cambio varía dependiendo del valor de UCS que tenga el bloque (el cual, según la simulación posee probabilidad 100% de encontrarse por sobre 120 MPa). De esta forma $\frac{\sigma_{max}}{120}$ ayuda a realizar una estimación preliminar de profundidad de falla.

Luego para el cálculo de la profundidad de falla se hizo uso de los parametros dispuestos en el anexo 13.4, con los cuales, en conjunto con el gráfico de profundidad de falla, se obtuvo el siguiente resultado:

Tabla 21. Cálculo de razón de esfuerzos y profundidad de falla. Primer caso.
Fuente: Elaboración propia

Determinación razón esfuerzos y profundidad de falla			
Zona sur	Cota interés	2150	m. s. n. m.
	Profundidad	460	m
	$\sigma_{vertical}$	12.2	MPa
	$\sigma_{horizontal}$	17.0	MPa
	σ_{max}	38.9	MPa
	σ_{max}/σ_c	0.30	-
	R_f/a	0	-
	R_f	0	m

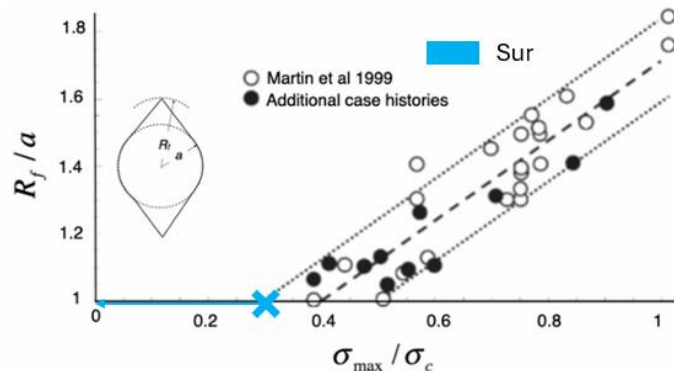


Gráfico 27. Determinación profundidad de falla en zona sur.
Fuente elaboración propia.

En base al resultado obtenido en la cota 2150 de la zona sur, los valores de profundidad de falla en túnel son de 0 metros. Esto indica que los túneles que crucen áreas donde se encuentran bloques con valores de 120 o más MPa no presentaran profundidad de falla (Figura 70). Se determinó también que para cualquier cota por sobre los 2150 msnm y en áreas con bloques con probabilidad 100 +/- 1% de superar 120 MPa, no tendrá profundidad de falla asociada. Finalmente se obtuvo una cantidad total de 3696 bloques que cumplen esta condición (ver Figura 71).

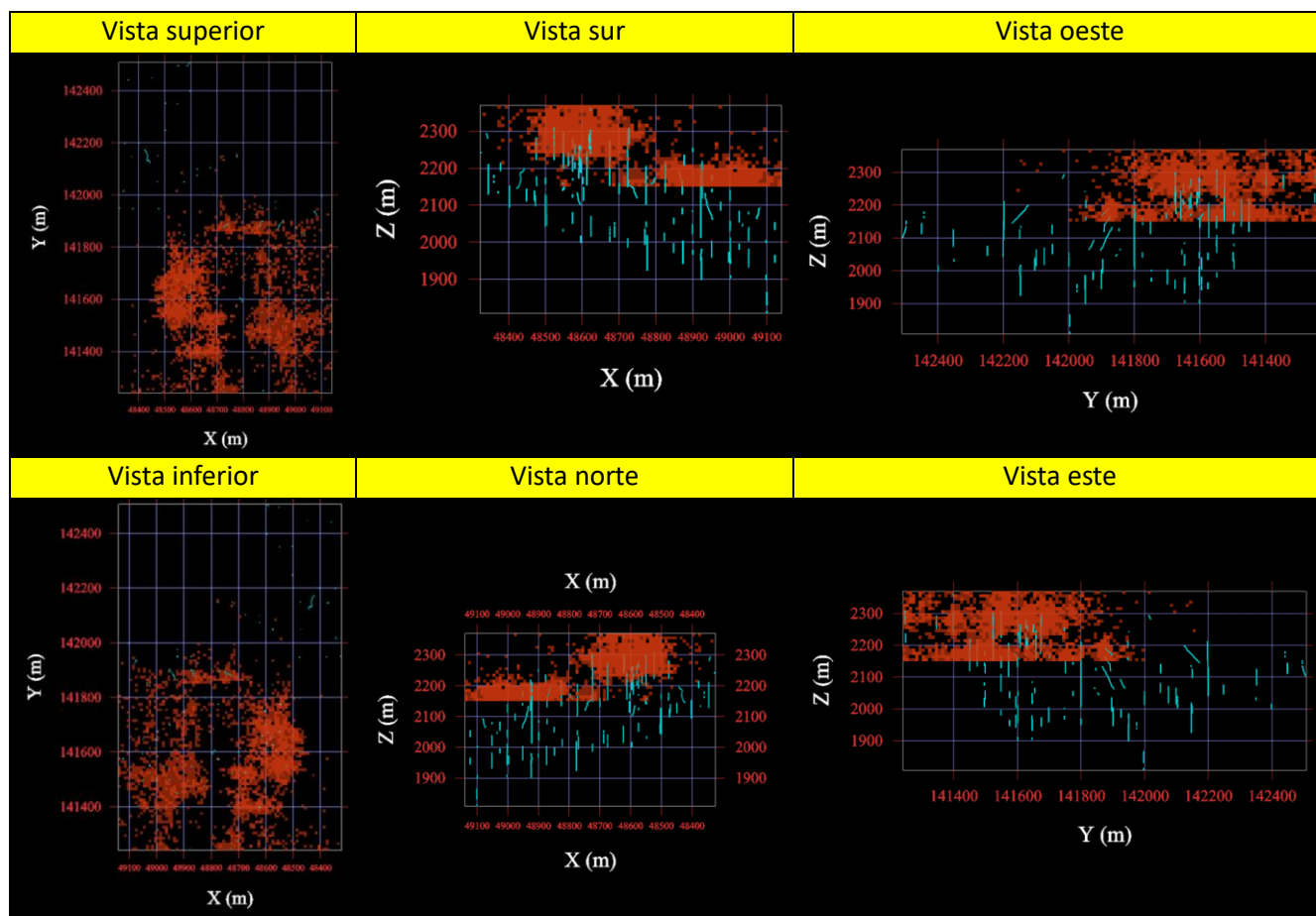


Figura 71. Bloques sobre cota 2150 con probabilidad 100+-1% sobre límite de 120 MPa.
Fuente: Elaboración propia.

6.3.1 Influencia de la probabilidad límite:

En base a la estabilidad determinada sobre una cota en particular, se puede analizar la cantidad de bloques y la influencia que tiene la probabilidad sobre el límite en estos. Se analizan probabilidades de 95%, 90%, 85% y 80%.

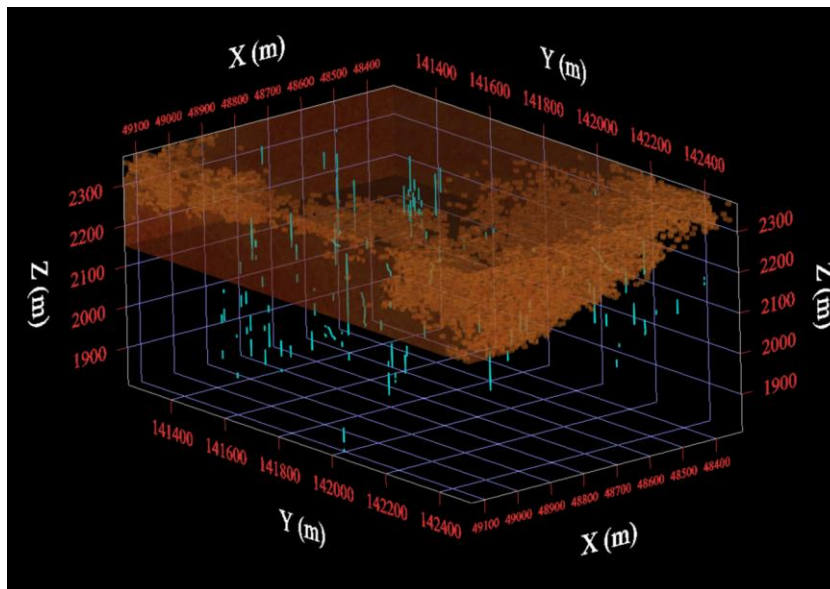


Figura 72. Probabilidad sobre 80% de no poseer profundidad de falla. 199.879 bloques contabilizados (33.4% del dominio).
Fuente: Elaboración propia.

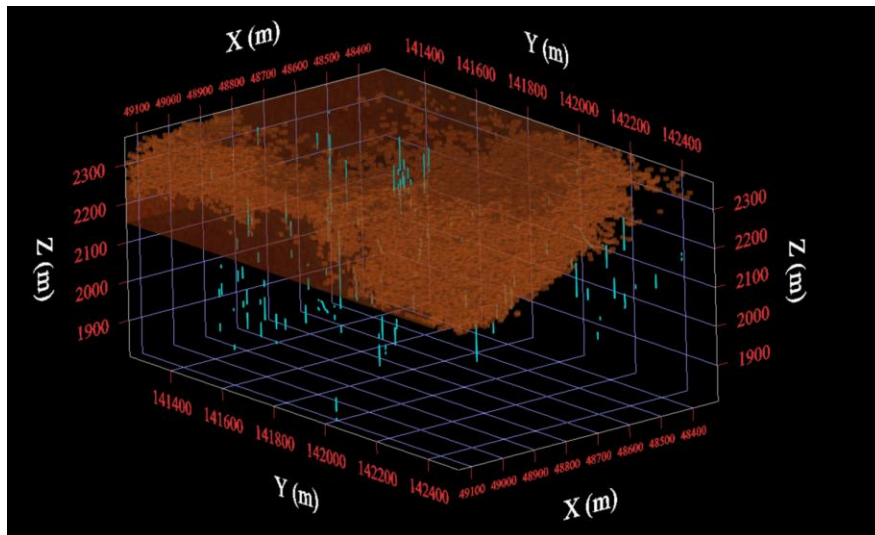


Figura 73. Probabilidad sobre 85% de no poseer profundidad de falla. 168.336 bloques contabilizados (28.1% del dominio).
Fuente: Elaboración propia

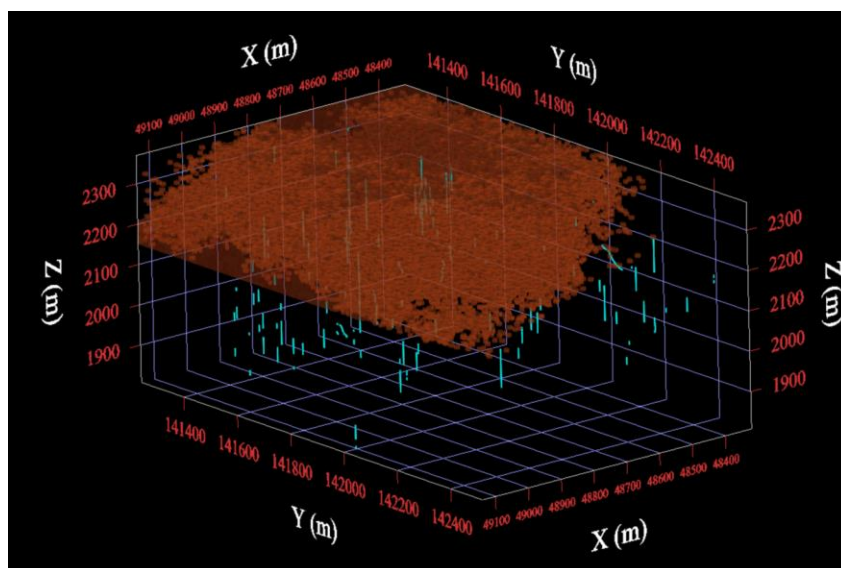


Figura 74. Probabilidad sobre 90% de no poseer profundidad de falla. 92.530 bloques contabilizados (15.5% del dominio).
Fuente: Elaboración propia.

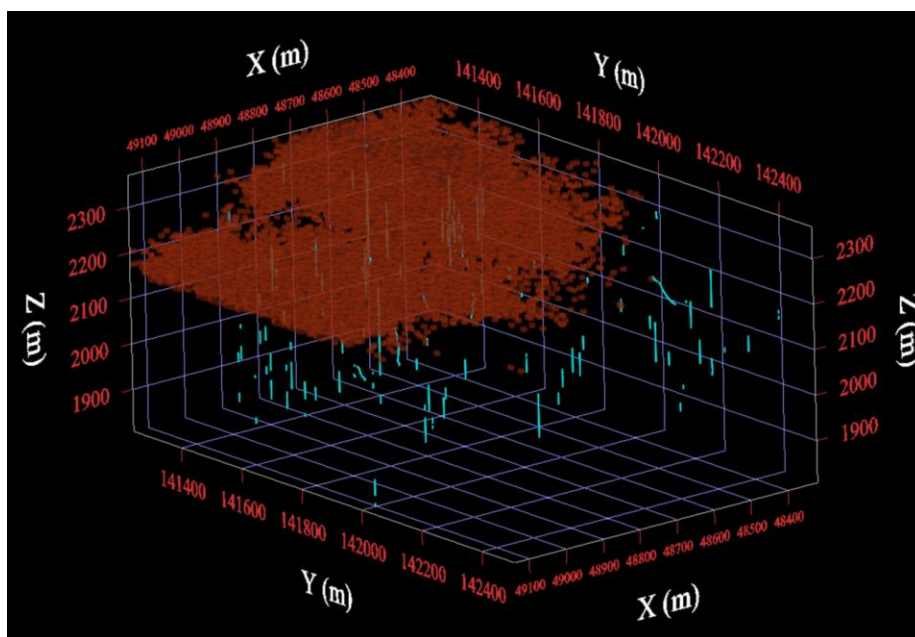


Figura 75. Probabilidad sobre 95% de no poseer profundidad de falla. 22.930 bloques contabilizados (3.8% del dominio).
Fuente: Elaboración propia.

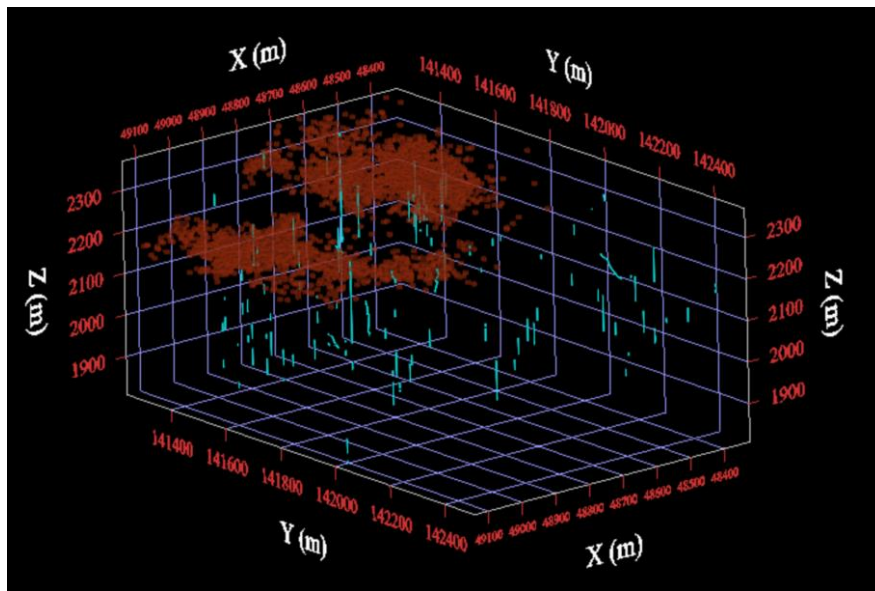


Figura 76. Probabilidad de 100% de no poseer profundidad de falla. 3696 bloques contabilizados (0.6% del dominio).
Fuente: Elaboración propia.

De esta forma se puede analizar la influencia de la probabilidad de estabilidad (a partir de los mapas de probabilidad sobre límite de UCS) en la cantidad de bloques que cumplen la condición, pudiendo analizar de forma complementaria el impacto financiero o de fortificación que tiene la cantidad de bloques a considerados.

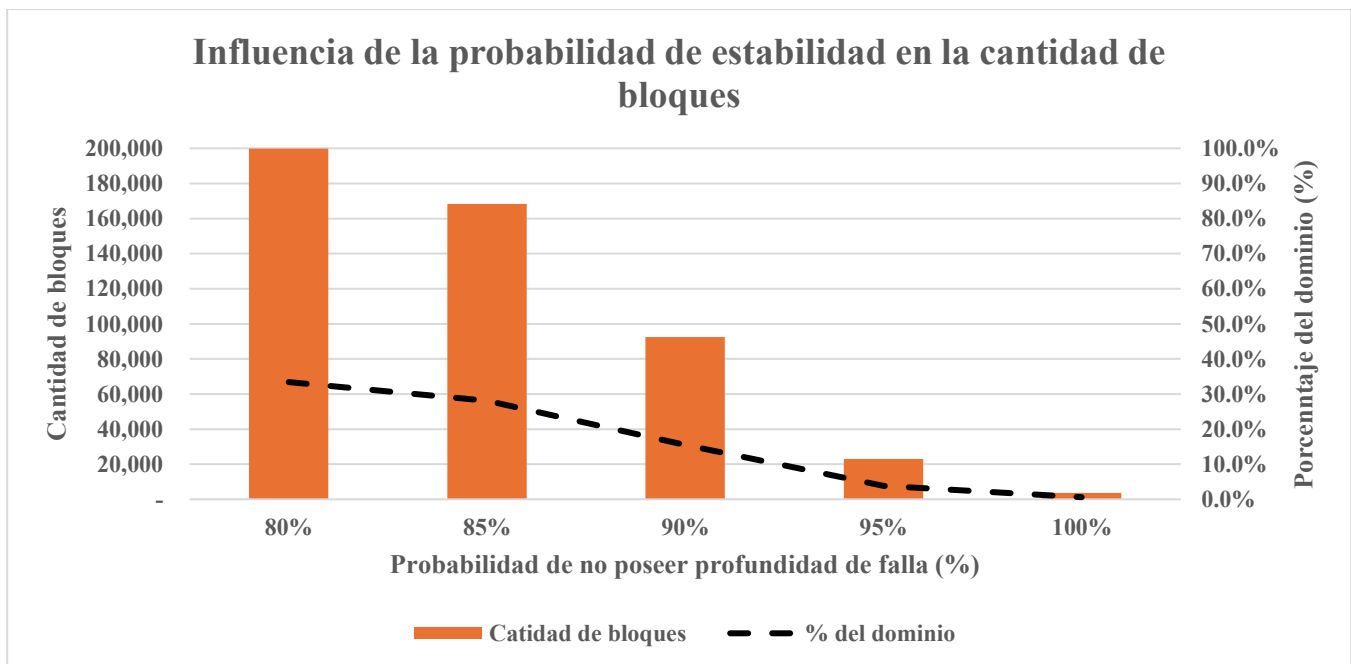


Gráfico 28. Influencia de la probabilidad de estabilidad en la cantidad de bloques simulados.
Fuente: Elaboración propia.

6.4. Estabilidad e inestabilidad en excavaciones.

Una vez determinado el comportamiento de estabilidad en el dominio según el caso de 120 MPa, se procedió en el segundo caso a analizar la estabilidad e inestabilidad de las excavaciones en la cota de interés (2080 msnm. Figura 77). Para esto, se realizó un mapa de probabilidad a partir de la simulación gaussiana secuencial. Para este análisis se consideró un umbral de resistencia UCS de 155 MPa, valor que representa el límite de estabilidad a dicha cota, es decir, el punto a partir del cual las excavaciones se mantienen dentro del rango estable (ver Tabla 22), con una razón de esfuerzos aproximada de:

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} \approx 0.3$$

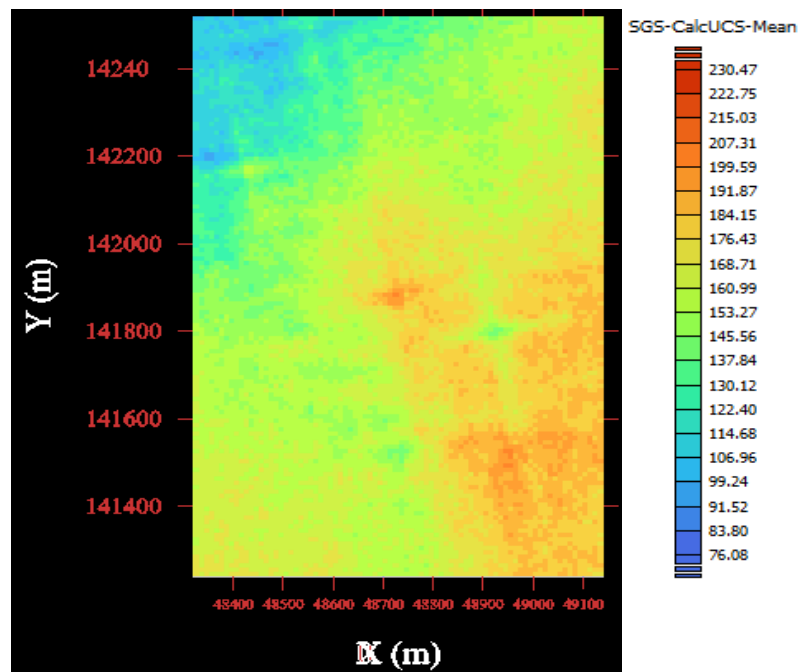


Figura 77. Mapa de la simulación gaussiana secuencial promedio en cota 2080 msnm.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Determinación de esfuerzos y profundidad de falla. Segundo caso.
Fuente: Elaboración propia.

Determinación razón esfuerzos y profundidad de falla			
Zona sur	Cota mina	2700	m. s. n. m.
	Cota interés	2150	m. s. n. m.
	Profundidad	550	m
	$\sigma_{vertical}$	14.6	MPa
	$\sigma_{horizontal}$	20.4	MPa
	σ_{max}	46.6	MPa
	σ_c (UCS)	155	MPa
	σ_{max}/σ_c	0.30	-
	Rf/a	0	-
	Rf	0	M

Se procedió a la obtención, por medio de los gráficos de probabilidad los mapas de estabilidad e inestabilidad de la cota 2080 msnm (

Figura 78 y Figura 79), cuantificándose la cantidad de bloques seleccionados según escenario de probabilidad (Tabla 23 y Tabla 24).

De este modo, los bloques cuya probabilidad de superar los 155 MPa sea alta (por ejemplo, $\geq 95\%$) se asocian a condiciones estables, mientras que aquellos con probabilidades menores reflejan un mayor grado de inestabilidad potencial, al encontrarse por debajo del umbral de resistencia crítica.

En este caso, el modelo entrega únicamente la probabilidad de que los bloques se encuentren por sobre el valor umbral de UCS ($\text{Prob}[\text{UCS} \geq 155 \text{ MPa}]$). Por tanto, la probabilidad de inestabilidad se obtiene de forma complementaria, como: **$\text{Prob}(\text{inestabilidad}) = 1 - \text{Prob}(\text{UCS} \geq 155 \text{ MPa})$**

De esta manera, si un bloque presenta una probabilidad **igual o menor** al 5 % de superar el umbral, significa que posee una probabilidad igual o mayor al 95% de encontrarse por debajo de dicho valor, es decir, un 95% de inestabilidad.

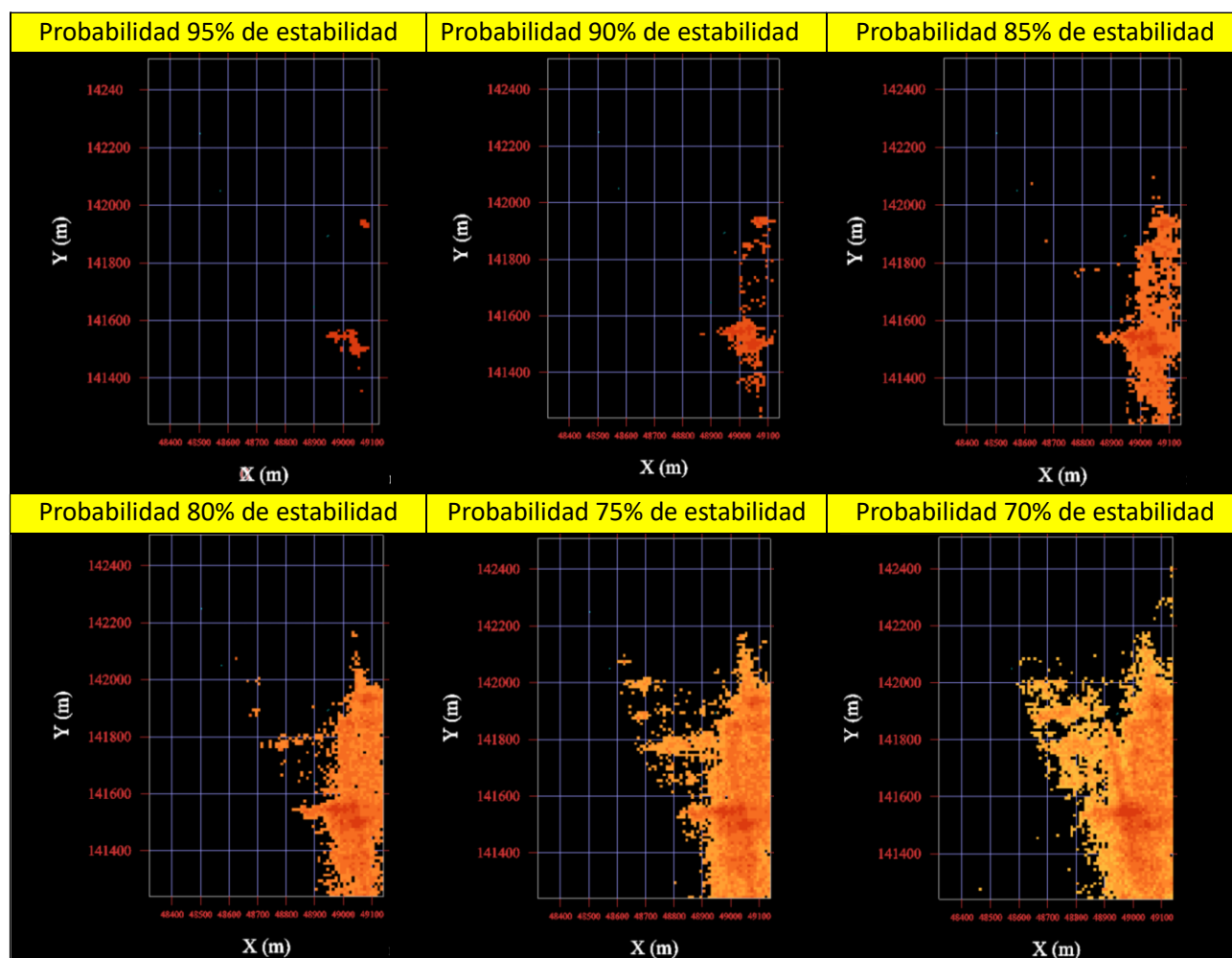


Figura 78. Vista Cota 2080 según probabilidad de estabilidad.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Influencia de la probabilidad de estabilidad en la cantidad de bloques seleccionados.
Fuente: Elaboración propia.

Cota 2080	95% Estable	90% Estable	85% Estable
Cantidad de bloques	84	359	1459
Cota 2080	80% Estable	75% Estable	70% Estable
Cantidad de bloques	2464	3550	4642

Los resultados obtenidos para la cota 2080 m muestran una relación inversa entre la probabilidad exigida y la cantidad de bloques estables. A medida que se reduce el nivel de probabilidad (de 95 % a 70 %), el número de bloques clasificados como estables aumenta de 84 a 4 642, evidenciando que los sectores con alta confianza de estabilidad (≥ 95 %) son más localizados, mientras que al disminuir el umbral se incorporan áreas con mayor incertidumbre respecto a la resistencia del macizo rocoso.

Este comportamiento refleja la sensibilidad del modelo frente al nivel de probabilidad adoptado, permitiendo ajustar los criterios de diseño y fortificación según el riesgo aceptable. En este sentido, los mapas de probabilidad representan una herramienta eficaz para delimitar zonas críticas y orientar la planificación de excavaciones subterráneas considerando la variabilidad espacial y la incertidumbre del parámetro UCS.

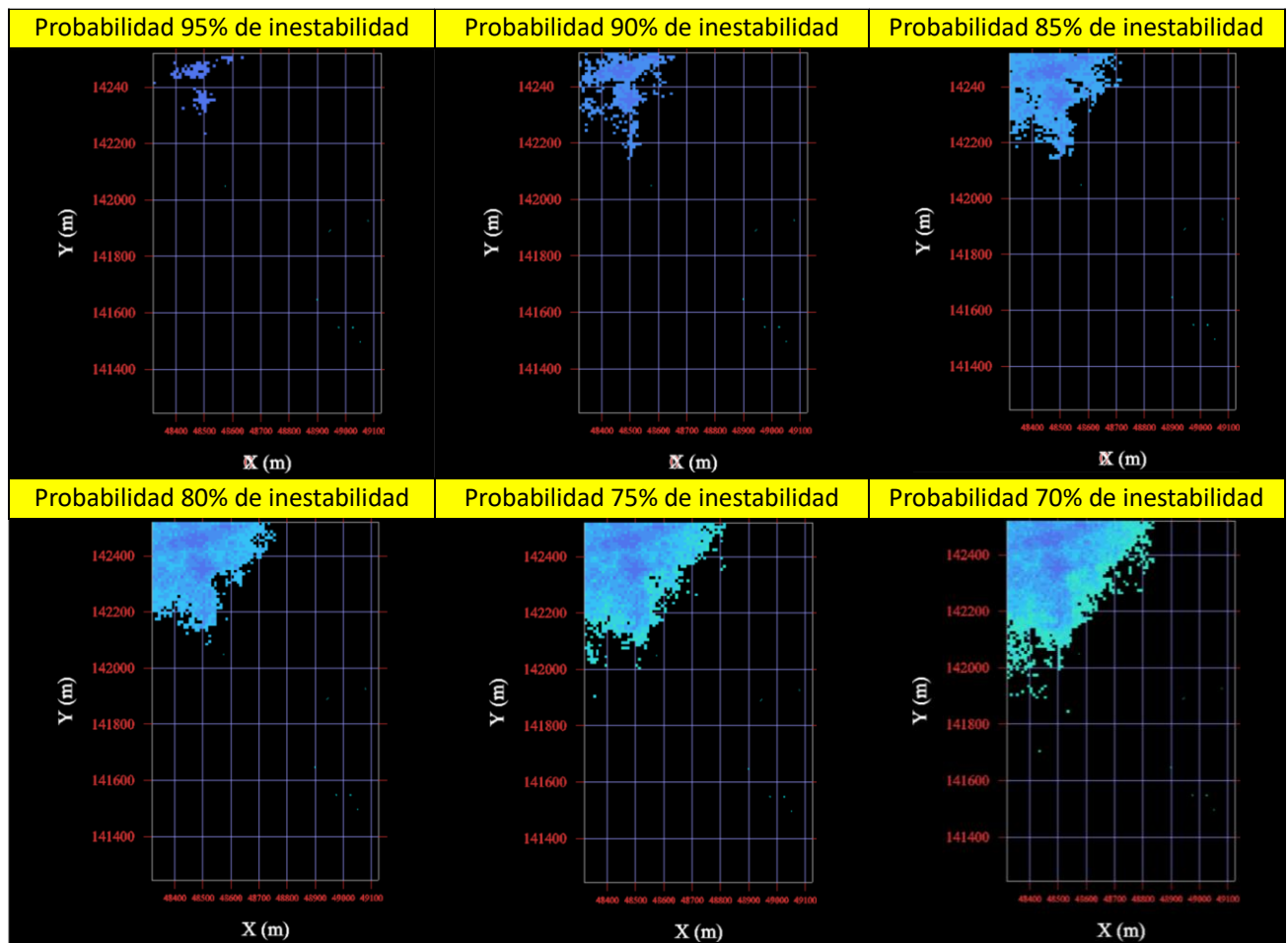


Figura 79. Vista Cota 2080 según probabilidad de inestabilidad.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Influencia de la probabilidad de inestabilidad en la cantidad de bloques seleccionados.
Fuente: Elaboración propia.

Cota 2080	95% Inestable	90% Inestable	85% Inestable
Cantidad de bloques	51	410	1240
Cota 2080	80% Inestable	75% Inestable	70% Inestable
Cantidad de bloques	1874	2507	3014

Los resultados obtenidos para la cota 2080 m, muestran que la cantidad de bloques inestables aumenta progresivamente al disminuir el nivel de probabilidad exigido. Mientras que con una probabilidad del 95 % de inestabilidad se identifican solo 51 bloques, al reducir el umbral a 70 % la cantidad asciende a 3 014 bloques, evidenciando una expansión significativa de las zonas potencialmente afectadas.

Esta tendencia revela que, a medida que se considera un escenario más permisivo en cuanto a probabilidad de inestabilidad, el modelo incorpora mayores volúmenes del macizo rocoso dentro de zonas con riesgo estructural. En consecuencia, los mapas de probabilidad de inestabilidad permiten visualizar con claridad las áreas críticas de comportamiento mecánico débil, aportando una base cuantitativa para la evaluación de riesgo y la planificación de medidas de sostenimiento o refuerzo en excavaciones subterráneas.

7. Discusión

El presente estudio buscó estimar y simular valores de resistencia a la compresión uniaxial con el objetivo de mejorar la determinación del parámetro en minería subterránea. De esta forma se quiso demostrar que el uso de técnicas geoestadísticas como el kriging ordinario y la simulación gaussiana secuencial permiten una caracterización precisa y realista de la variabilidad espacial de los datos de UCS en un contexto de minería subterránea.

La determinación del modelo espacial por medio de kriging ordinario logró reproducir satisfactoriamente la variabilidad real de los datos, pero presentó grandes desafíos en cuanto a la determinación de las principales direcciones de continuidad y modelamiento variográfico. Múltiples modelos de variograma fueron iterados para obtener la mejor representación espacial posible, empleando la herramienta KNA de Isatis.neo para determinar los mejores resultados de estimación por medio del parámetro *slope* y correlación (VER ANEXO 10.1). El compositado también permitió disminuir la alta variabilidad de los datos en el variograma, esta decisión aumenta el suavizamiento a cambio de una mejor representación de la correlación espacial. Estas decisiones fueron tomadas a causa de la gran variabilidad espacial y limitada cantidad de datos de UCS presentes en la zona norte y sur.

Para la comparación de la estimación con la simulación se hizo uso de los mismos vecindarios móviles de kriging, obteniendo un valor promedio simulado de características muy similares al kriging ordinario en ambas zonas norte y sur.

Las simulaciones entregaron información más detallada de la variabilidad real de los datos. Al tener múltiples realizaciones con casos máximos y mínimos, estas permitieron identificar áreas críticas de UCS, identificando tendencias de valores altos y bajos independientemente del caso.

El análisis de probabilidad sobre límite impuesto es útil para determinar la incertidumbre de valores de interés que superen cierto umbral crítico. Bajo esta lógica es recomendable que los valores límite se adecúen a la distribución estadística de los datos. Esto debido a que en el caso de estudio planteado los datos de ambas zonas, sur y norte poseían distribuciones similares a las normales, con una escasa cantidad de valores altos y bajos, y valores límites (según la IEAG) basados en la toma de decisiones para la clasificación de calidad de roca. Los datos de la zona sur al tener una distribución simétrica no lograban entregar gran detalle probabilístico para los valores límite de 15 MPa o 230 MPa.

En el ejemplo de aplicación de la sección de resultados y análisis se hizo un uso práctico de los mapas de probabilidad en torno a la determinación de la profundidad de falla. La relación $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_c}$ y el diámetro de la excavación cumplieron un rol fundamental en la determinación del parámetro, permitiendo identificar zonas donde no se producen inestabilidades en la excavación producto del valor de UCS y los altos esfuerzos tangenciales en profundidad.

En base a la determinación de la profundidad de falla en las cotas de interés de la zona sur se logra determinar que, para el primer caso, cualquier profundidad por sobre la mencionada, las excavaciones que se sitúen en los bloques con probabilidad 100% sobre el límite de 120 MPa mantendrán su estabilidad. En base a esto resultó útil analizar la influencia de la probabilidad de estabilidad en la cantidad de bloques que son abarcados y de esta forma respaldar con más antecedentes decisiones financieras y de fortificación en minería subterránea. Respecto del segundo caso, el análisis de estabilidad e inestabilidad permitió

corroborar zonas de mayor o menor estabilidad y determinar la incertidumbre asociada en una determinada cota, y de esta forma ocupar la información en para la toma de decisiones.

8. Conclusiones

En la zona sur el kriging ordinario logró una estimación insesgada pero suavizada, reproduciendo el promedio de los datos reales con un error porcentual de 2.4% (valor real de 162 MPa y estimado de 158 MPa) (ver Tabla 19). Reprodujo la estructura espacial de los datos (ver Figura 22), pero con valores intermedios, lo cual queda reflejado en su menor varianza (1424 real y 358 estimada) y menor rango de datos (mínimo y máximos reales 50 y 286 MPa, mínimos y máximos estimados 75 y 231 MPa). La validación cruzada indicó un ajuste de 0.85.

La simulación permitió el desarrollo de 100 realizaciones, en particular la simulación promedio tuvo un promedio de sus valores de 156.1 MPa, valor próximo al real (error 0.6%), una menor varianza de 303.1 y un valor mínimo y máximo de 76.1 y 230.5 MPa (Tabla 19). Esta logró reproducir la variabilidad espacial real al igual que el kriging (ver Figura 33), pero algo más suavizada debido al promedio de simulaciones. Las simulaciones mínimas y máximas permiten identificar tendencias marcadas en cuanto a la concentración de datos mínimos y máximos (ver Figura 56 y Figura 57).

Se pudo analizar la incertidumbre por medio de la probabilidad existente dentro de las 100 simulaciones de que el valor en cierta ubicación se encuentre por sobre límites definidos. Esto permitió identificar áreas con probabilidad de encontrarse dentro de rangos definidos de calidad de roca según el IAEG (15, 50, 120 y 230 MPa), principalmente en umbrales 120 y 230 MPa debido a la distribución estadística de los datos (ver Figura 59 y Figura 60)

En la zona norte el kriging ordinario estimó valores obteniendo una media de 157 MPa, muy cercana a la real de 156 MPa, la varianza sufrió una reducción de 2001 (real) a 205 (estimada). También acortó el rango de valores mínimo y máximo de 3 y 267 MPa a 52 y 222 MPa (ver Tabla 20), aun así, reproduciendo el comportamiento espacial real de los datos. La validación cruzada indicó un ajuste de 0.85 (ver Figura 42).

El promedio de las simulaciones indicó una media de sus valores de 156 MPa, siendo exactamente igual al de los valores reales, la varianza tuvo un valor inferior de 145 con un rango de valores mínimo y máximo de 52 y 219 MPa (ver Tabla 20). La simulación logró reproducir la variabilidad espacial real de los datos (ver Figura 53). La realización de valores máximos y mínimos permitieron realizar un análisis de casos críticos en distintas zonas de interés (ver Figura 64 y Figura 63). El análisis de incertidumbre logró al igual que en la zona sur identificar áreas de mayor probabilidad de encontrarse por sobre los rangos de calidad de UCS según el IAEG (15, 50, 120 y 230 MPa) siendo los mapas de probabilidad límite de mayor información los de la Figura 66, Figura 67 y Figura 68 (50, 120 y 230 MPa).

Tanto para simulación como estimación los métodos reprodujeron la media, en términos de varianza la simulación presenta un mayor valor de esta, principalmente debido al efecto promedio de las 100 realizaciones y al estas haber estimado el 100% del dominio, es decir, una mayor cantidad de datos los cuales toman valores intermedios para evitar sesgos.

El primer caso de aplicación logró relacionar la información entregada por mapas de probabilidad con el cálculo de la profundidad de falla de túneles. Considerando para el caso la mina ubicada a una cota de

2580 m y la profundidad de interés a una cota de 2150 msnm se determinó la profundidad de falla de túneles de 10 metros de diámetro en zonas con una probabilidad de 100% $\pm$ 1% de tener valores de resistencia a la compresión uniaxial iguales o mayores a 120 MPa. Esto permitió identificar zonas con prácticamente 0% de probabilidad de presentar fallas en profundidad. La profundidad de cálculo obtuvo un valor de $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_c}$

cercano a 0.3, lo cual es el límite en la generación de falla en túnel. Se concluyó que cualquier profundidad por sobre 2150 m (caso de estudio) y con probabilidad de UCS por sobre 120 MPa no tendrá profundidad de falla en túnel, obteniéndose 3696 bloques que cumplen la condición.

El análisis de influencia de la probabilidad de no falla permitió identificar la variación de bloques pudiendo servir de respaldo para la toma de decisiones al momento de fortificar o tomar decisiones económicas.

En el segundo caso, considerando la mina a una cota de 2700 m, el análisis de inestabilidad permitió identificar visualmente, en la cota 2080 m, las zonas con mayor susceptibilidad a falla, mediante los mapas de probabilidad de estabilidad e inestabilidad generados. A partir de estos, fue posible cuantificar la cantidad de bloques inestables bajo distintos niveles de probabilidad, lo que proporciona una herramienta práctica para la toma de decisiones operativas y el diseño de fortificación, permitiendo priorizar zonas críticas y optimizar los recursos de sostenimiento según el grado de incertidumbre asociado al parámetro UCS.

Se recomienda en estudios posteriores relacionar el UCS con más parámetros geomecánicos y geológicos para complementar la estimación con un análisis de estructuras geológicas y tipos de litología.

9. Referencias

- Aalianvari, A., Soltani-Mohammadi, S., & Rahemi, Z. (2018). Estimation of geomechanical parameters of tunnel route using geostatistical methods. *Geomechanics and Engineering*, 14(5), 453–458. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.14.5.453>
- Bell, F. G. (2005). *ENGINEERING GEOLOGY | Rock properties and their assessment*. Encyclopedia of Geology, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, 566–580. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369396-9/00211-2>
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons. ISBN 9780471601722
- Delonca, A., Gonzalez, F., Mendoza, V., & Ceron, A. (2023). Influence of preconditioning and tunnel support on strain burst potential. *Applied Sciences*, 13(13), 7419. <https://doi.org/10.3390/app13137419>
- Doostmohammadi, M., Jafari, A., & Asghari, O. (2014). Geostatistical modeling of uniaxial compressive strength along the axis of the Behesht-Abad tunnel in Central Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0663-z>
- Emery, X. (2007). *Apunte de geoestadística*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Emery, X. (2013). *Apunte de geoestadística*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Emery, X., & Séguet, S. A. (2020). *Geoestadística de yacimientos de cobre chilenos*. Penguin Random House Grupo Editorial. Recuperado de <https://books.google.cl/books?id=nRv9DwAAQBAJ>
- Hekmatnejad, A., Emery, X., Brzovic, A., Schachter, P., & Vallejos, J. A. (2017). Spatial modeling of discontinuity intensity from borehole observations at El Teniente mine, Chile. *Engineering Geology*, 230, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.07.012>
- Hoek, E. (2008). *Practical rock engineering*. Evert Hoek Consulting Engineer Inc.
- Kadikoy–Kartal subway, Turkey. (2014). Geostatistical investigation of geotechnical and constructional properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.11.002>

Marinos, P., & Hoek, E. (2000). GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. En *Proceedings of GeoEng2000: An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*. Melbourne, Australia.

Ozturk, C. A., & Nasuf, E. (2002). Geostatistical assessment of rock zones for tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17(3), 275–285. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00023-8](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00023-8)

Ozturk, C. A., & Simdi, E. (2014). Geostatistical investigation of geotechnical and constructional properties in Kadikoy–Kartal subway, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.11.002>

Pinheiro, M., Vallejos, J., Miranda, T., & Emery, X. (2016). Geostatistical simulation to map the spatial heterogeneity of geomechanical parameters: A case study with rock mass rating. *Engineering Geology*, 211, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.03.003>

Pinheiro, M., Emery, X., Miranda, T., Lamas, L., & Espada, M. (2018). Modelling geotechnical heterogeneities using geostatistical simulation and finite differences analysis. *Minerals*, 8(2), 52. <https://doi.org/10.3390/min8020052>

Ramírez Zúñiga, N. I. (2022). Análisis 3D de la variabilidad de los parámetros geomecánicos para determinar su influencia en la generación de un estallido de rocas (Memoria de titulación, Ingeniero Civil de Minas). Universidad Técnica Federico Santa María.

Sánchez, L. K., Emery, X., & Séguret, S. A. (2021). Improving the geostatistical modelling of geotechnical variables considering directional dependence. En *Proceedings of the 2021 15th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection* (pp. 401–408). https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2135_25

Séguret, S. A., & Guajardo, C. (2015). Geostatistical evaluation of rock-quality designation and its link with linear fracture frequency. HAL-Mines ParisTech. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01187731>

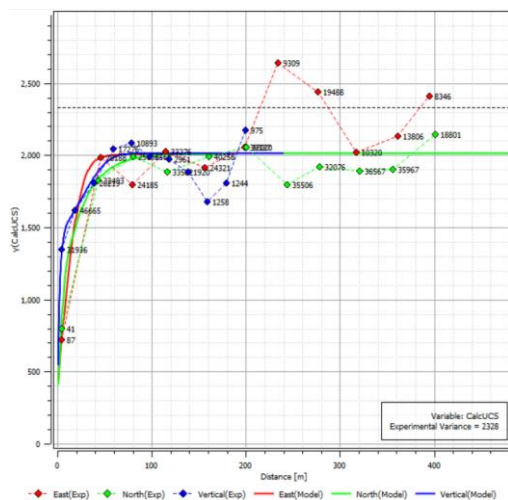
Séguret, S. A., Guajardo, C., & Freire Rivera, R. (2014). Geostatistical evaluation of fracture frequency and crushing. HAL-Mines ParisTech. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01009589>

Universidad de Chile. (s.f.). 06 – Variograma modelado [Diapositivas de clase]. MI54A Evaluación de Yacimientos, Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

10. Anexos

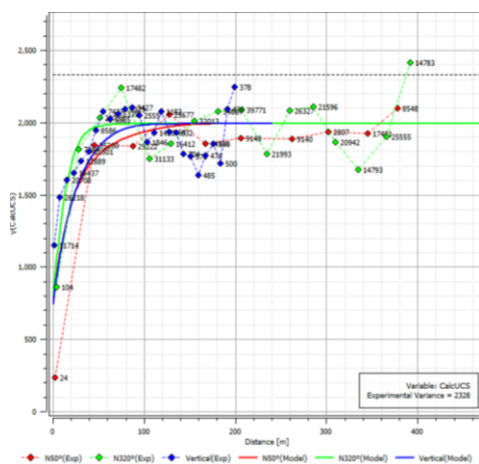
10.1. Iteraciones variograma y calidad de vecindad bajo distinto compositado y modelo variográfico.

10.1.1 Zona Sur



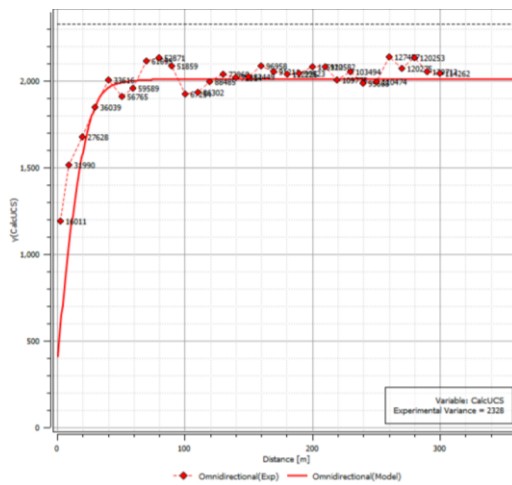
Mejor caso compuesto 1m	
Slope	0.1999
Corr	0.1380

Iteración 1 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



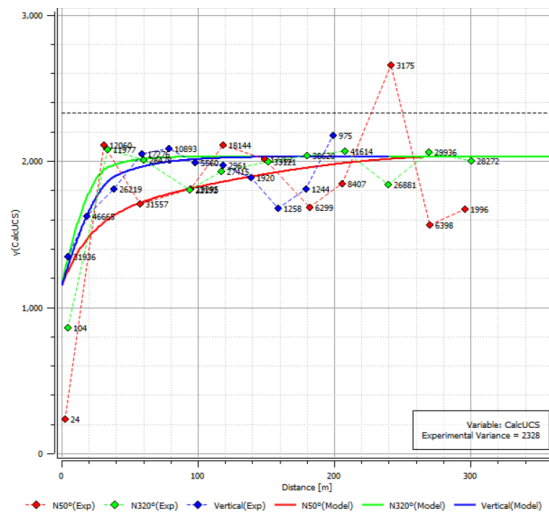
Mejor caso compuesto 1m	
Slope	0.216
Corr	0.151

Iteración 2 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



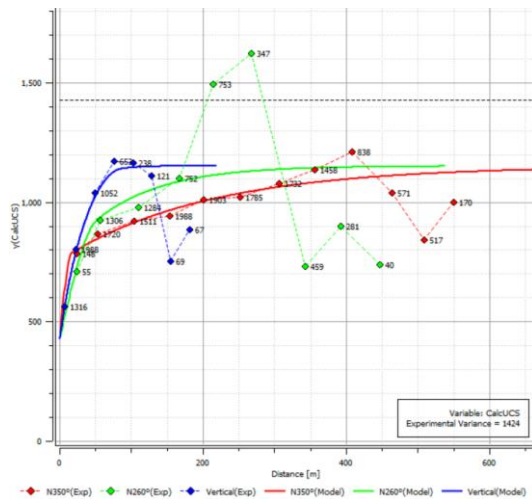
Mejor caso compósito 1m	
Slope	0.171
Corr	0.134

Iteración 3 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



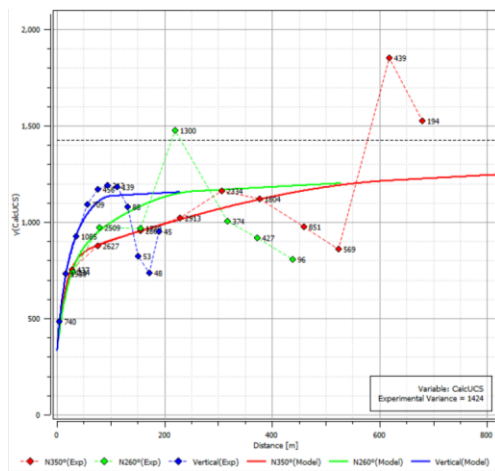
Mejor caso compósito 1m	
Slope	0.218
Corr	0.129

Iteración 4 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



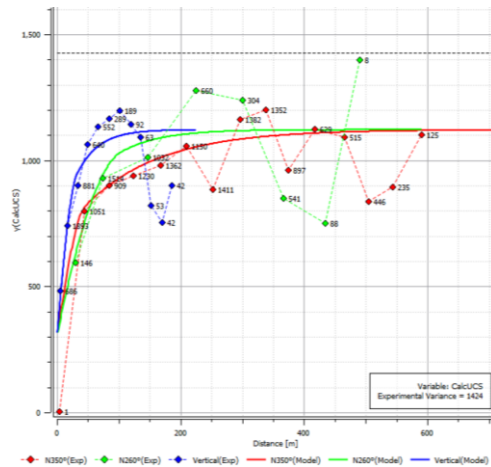
Mejor caso compósito 5m	
Slope	0.813
Corr	0.262

Iteración 5 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



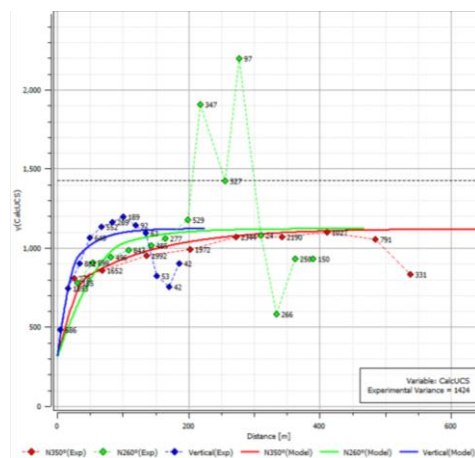
Mejor caso compuesto 5m	
Slope	0.946
Corr	0.609

Iteración 6 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



Mejor caso compuesto 5m	
Slope	0.708
Corr	0.242

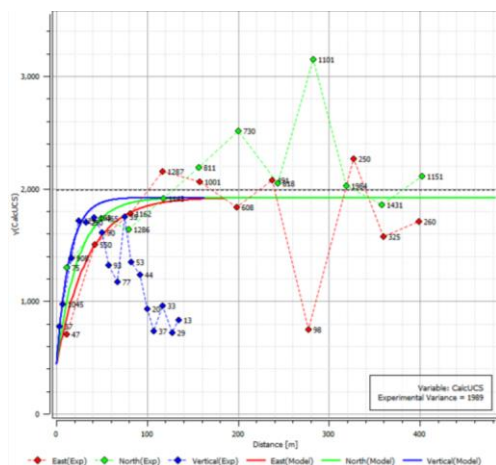
Iteración 7 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



Mejor caso compuesto 5m	
Slope	0.7585
Corr	0.2407

Iteración 8 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).

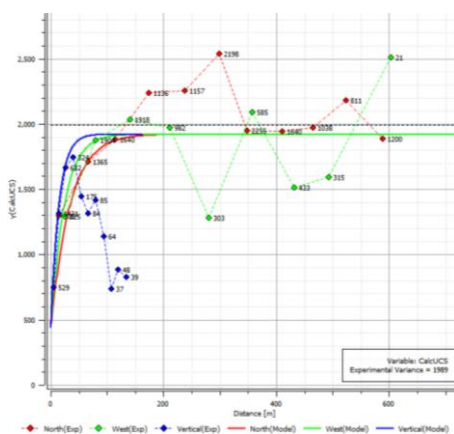
10.1.2 Zona Norte



Mejor caso compuesto 5m

Slope	0.515
Corr	0.407

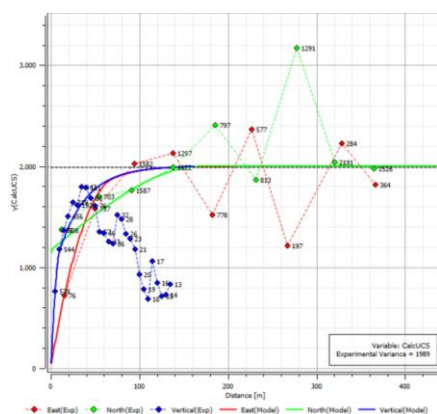
Iteración 9 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



Mejor caso compuesto 5m

Slope	0.313
Corr	0.205

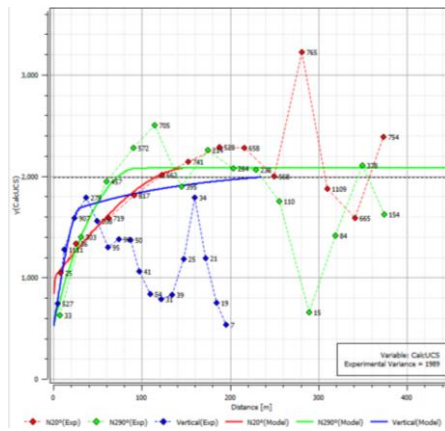
Iteración 10 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



Mejor caso compuesto 5m

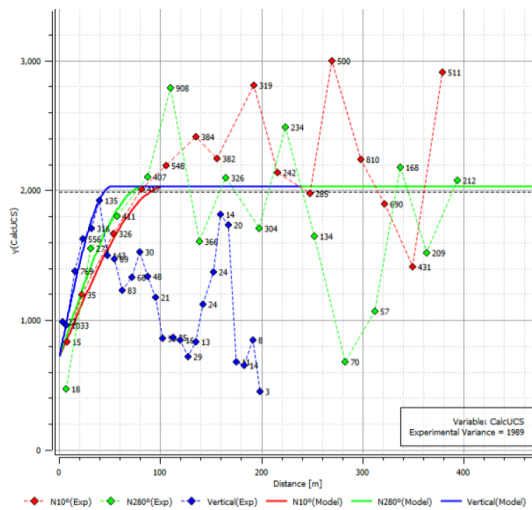
Slope	0.284
Corr	0.158

Iteración 11 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



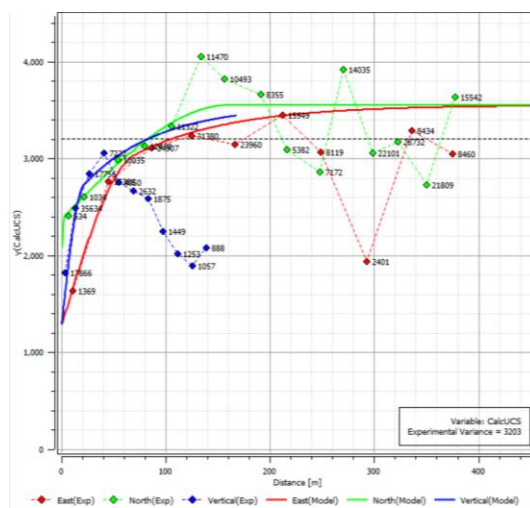
Mejor caso compuesto 5m	
Slope	0.497
Corr	0.345

Iteración 12 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



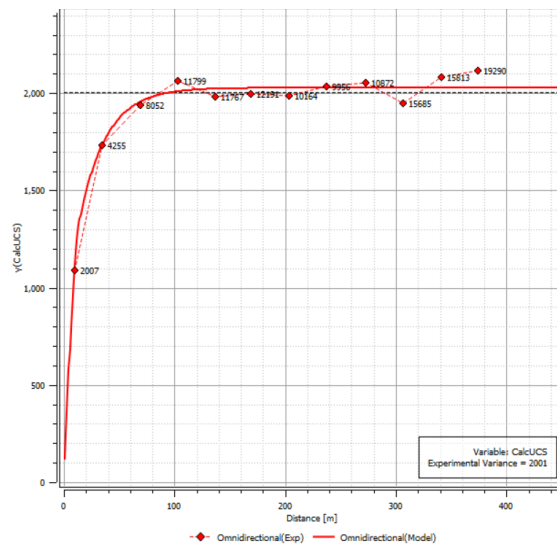
Mejor caso compuesto 5m	
Slope	0.4219
Corr	0.2928

Iteración 13 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



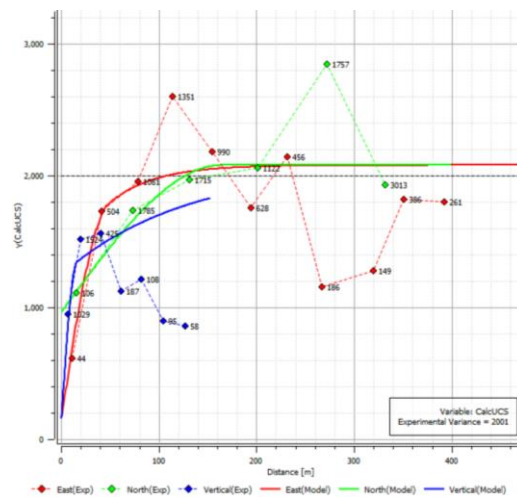
Mejor caso compuesto 5m	
Slope	0.143
Corr	0.087

Iteración 14 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



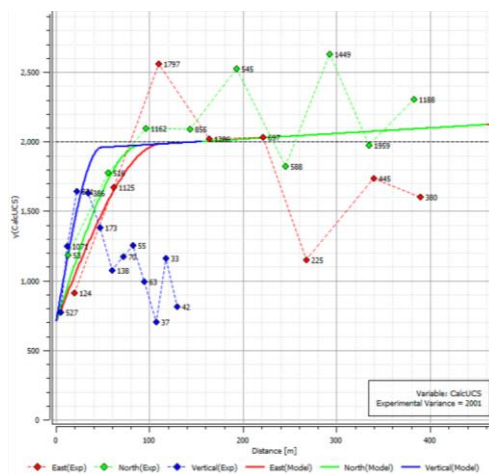
Mejor caso compósito 5m	
Slope	0.2445
Corr	0.1614

Iteración 15 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



Mejor caso compósito 5m	
Slope	0.170
Corr	0.070

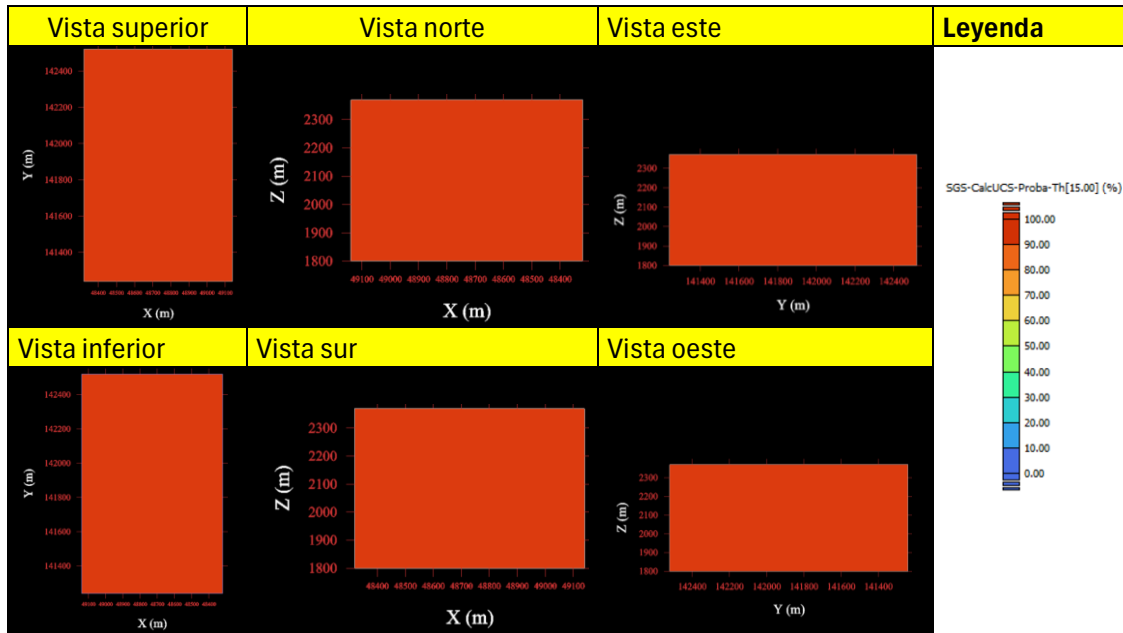
Iteración 16 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).



Mejor caso compósito 5m	
Slope	0.903
Corr	0.599

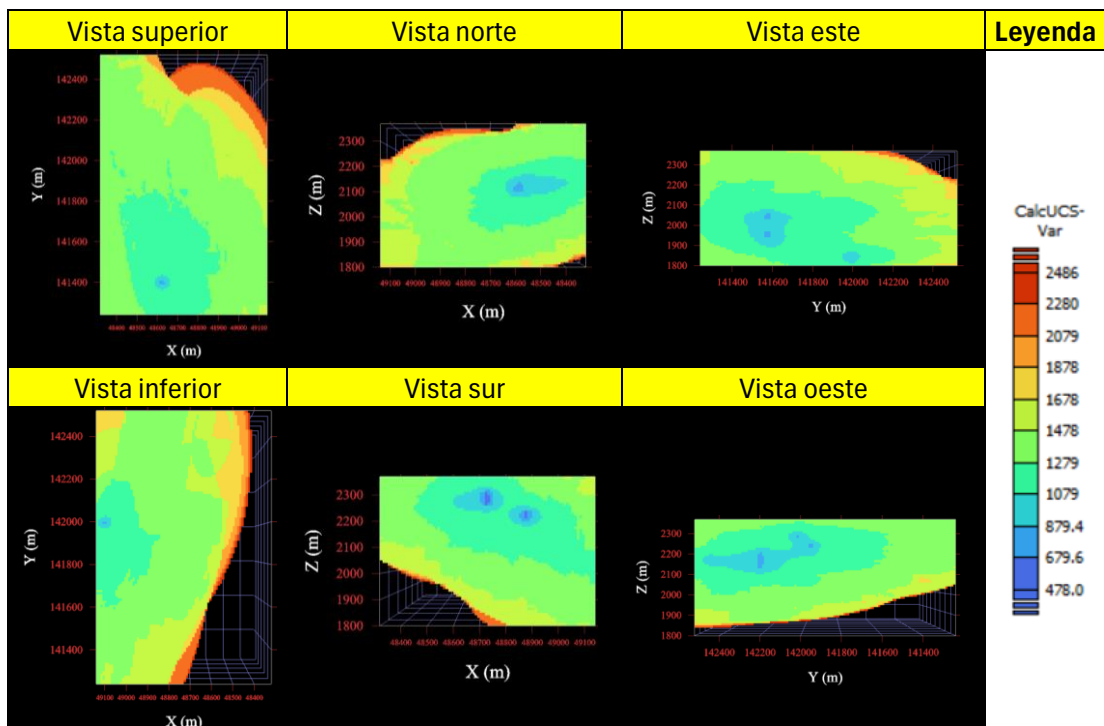
Iteración 17 de variograma y resultado mejor vecindad (KNA).

10.2. Material complementario resultados



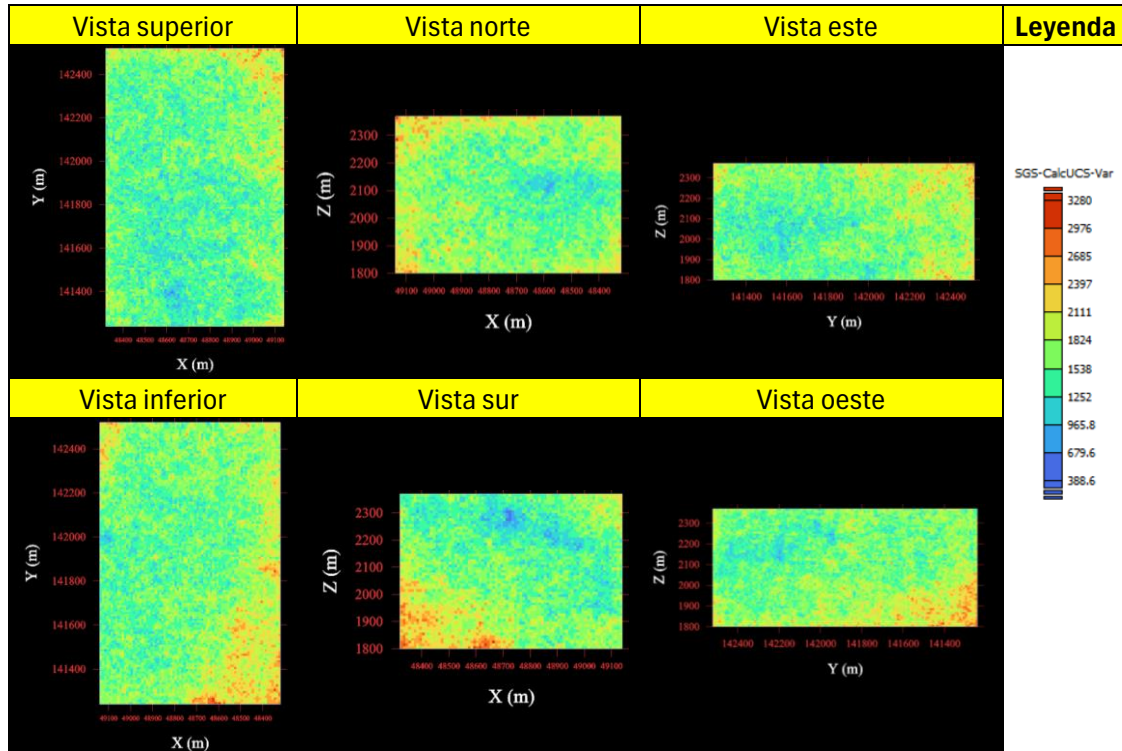
Vistas probabilidad sobre límite 15 MPa zona sur.

Fuente: Elaboración propia

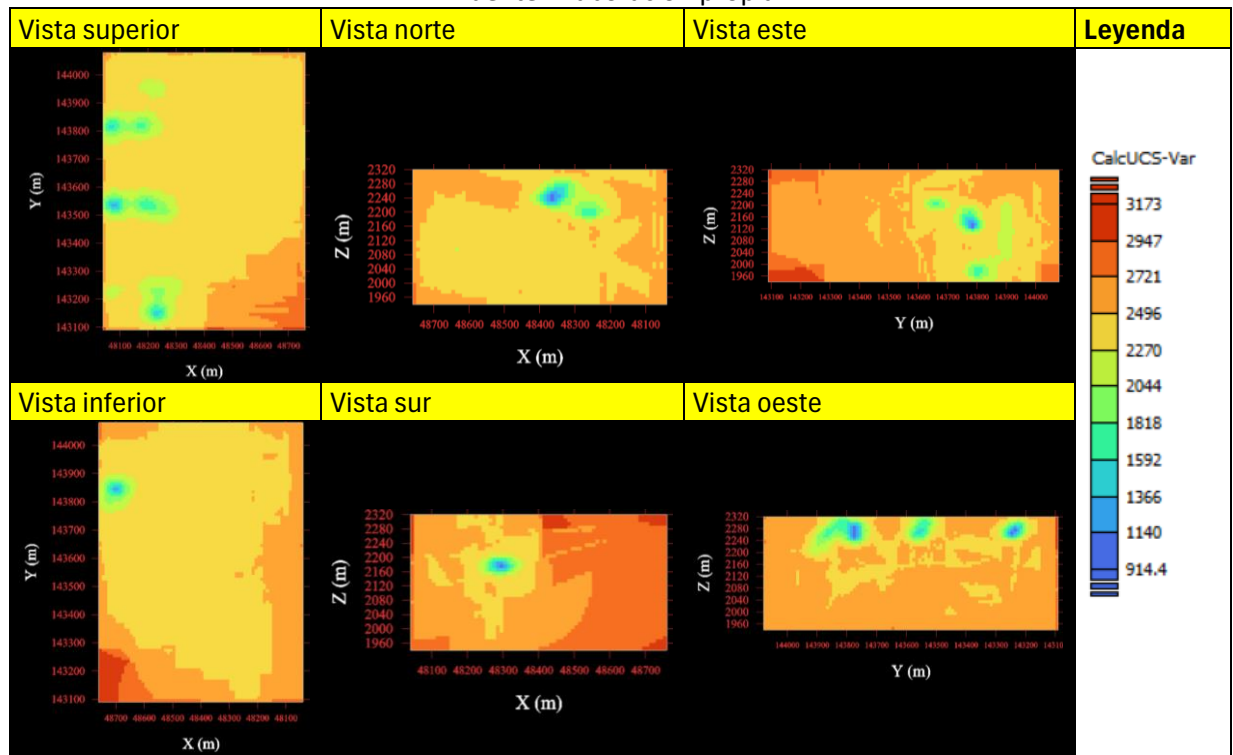


Vistas varianza kriging ordinario zona sur.

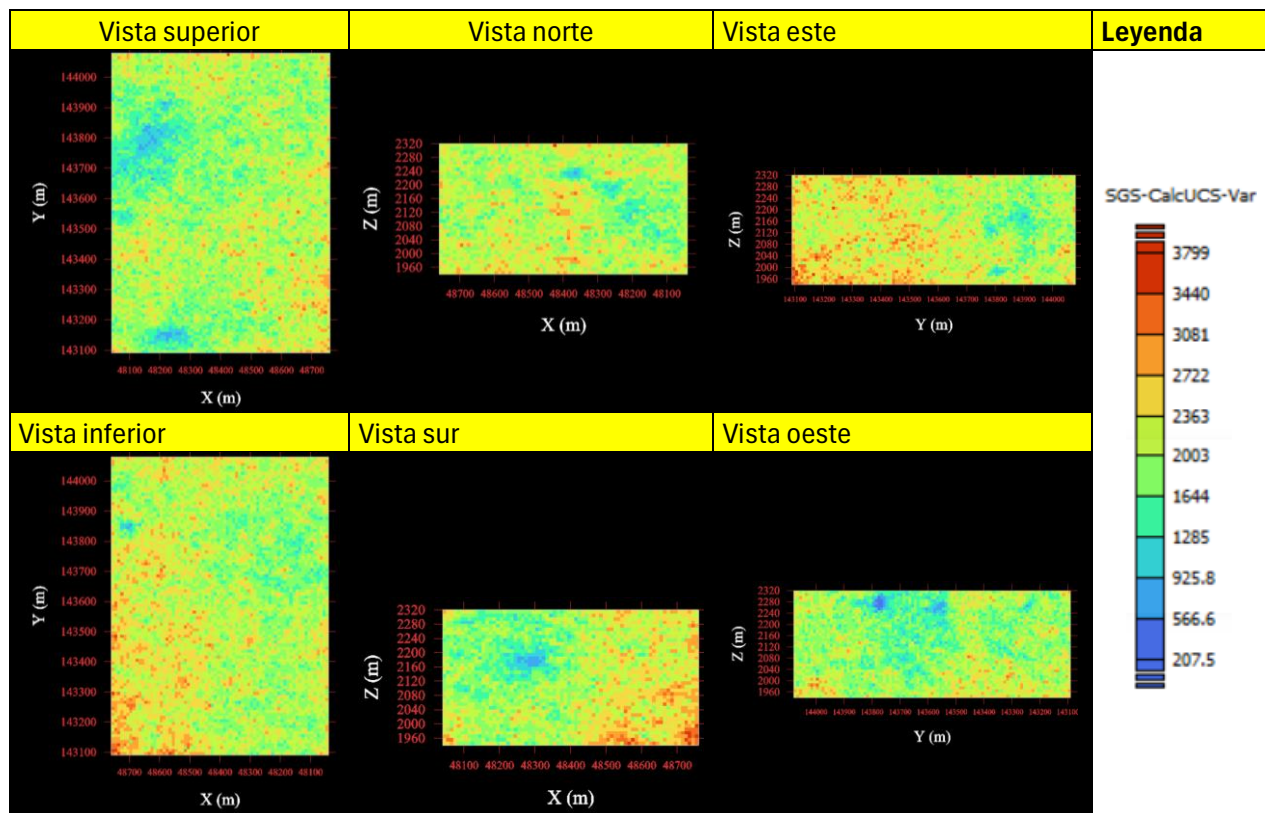
Fuente: Elaboración propia



Vistas varianza simulación gaussiana secuencial zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

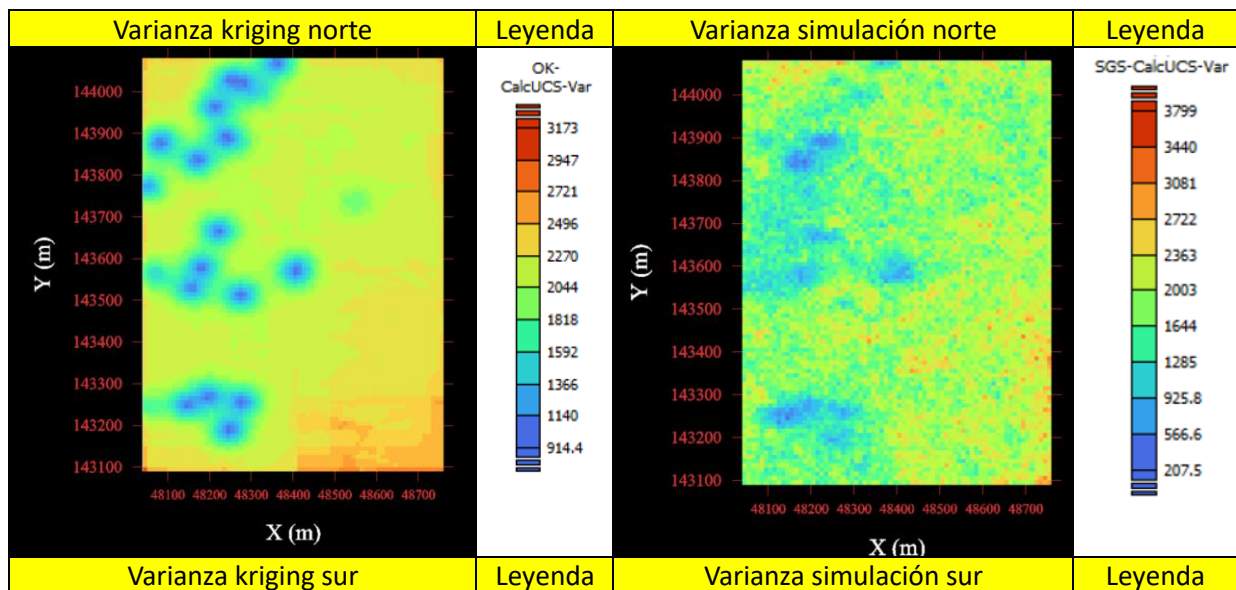


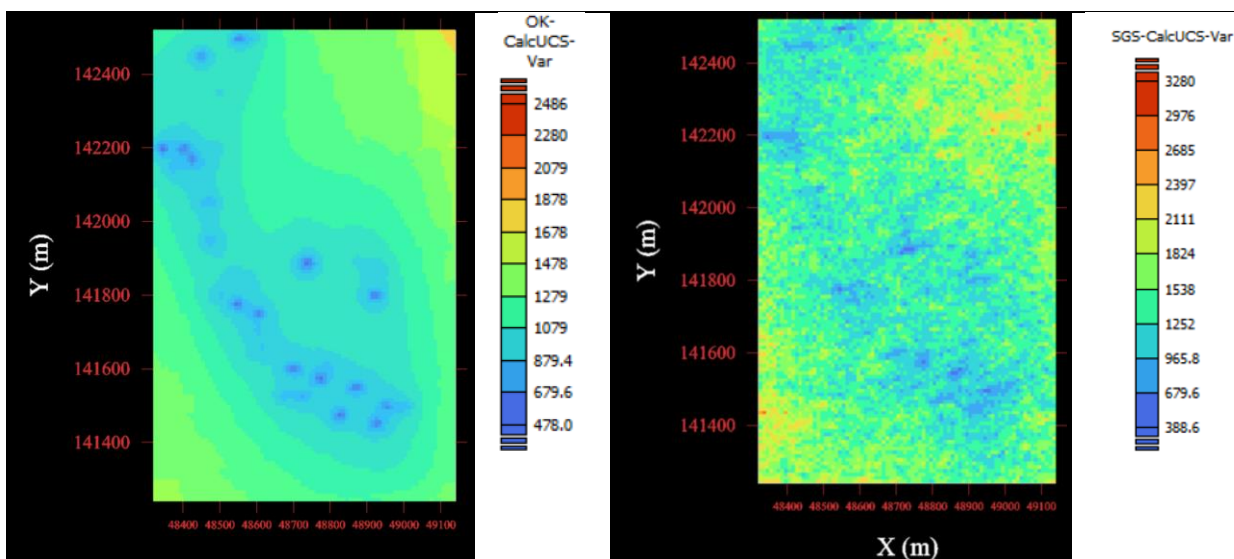
Vistas varianza kriging ordinario zona norte.
Fuente: Elaboración propia



Vistas varianza simulación gaussiana secuencial zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

10.3. Varianza de kriging y simulación en cota 2150 msnm.





Varianza de kriging zona norte y sur.
Fuente: Elaboración propia.

10.4. Parametros de cálculo profundidad de falla

Tabla con parámetros de cálculo para profundidad de falla

Parámetros cálculo profundidad de falla:		
Aceleración gravedad (G)	9.8	m/s ²
Densidad (ρ)	2.7	ton/m ³
Factor esfuerzo	1.4	-
Diámetro túneles (a)	10	m
Cota mina	2580	m. s. n. m.
σ_c (UCS)	120	MPa