



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



MODELAMIENTO IMPLÍCITO DE RESISTENCIA DE ROCA EN MINERA LOS PELAMBRES MEDIANTE ESTIMACIÓN POR INVERSO A LA DISTANCIA Y KRIGING ORDINARIO

Memoria para optar al Título de Geólogo

Fernando Antonio Saavedra Schmidt

Profesor Patrocinante: MSc. Abraham Elías González Martínez
Profesores Comisión: Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra
Dr. Jorge Andrés Quezada Flory

Concepción, 2019



“That's all it is. A leap of faith”

Peter B. Parker

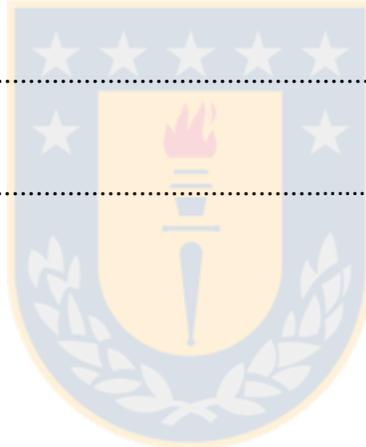
ÍNDICE

| | Página |
|---|--------|
| RESUMEN | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. GENERALIDADES | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 2 |
| 1.2.1. Objetivo General | 2 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos | 2 |
| 1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS | 2 |
| 1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO | 4 |
| 1.4.1. Etapa Bibliográfica | 4 |
| 1.4.2. Etapa de Revisión y Análisis de Datos | 4 |
| 1.4.3. Etapa de Modelamiento | 4 |
| 1.4.4. Etapa de Validación del Modelo | 5 |
| 1.5. CLIMA, FLORA Y FAUNA | 5 |
| 1.5.1. Clima | 5 |
| 1.5.2. Flora y Fauna | 6 |
| 1.6. TRABAJOS ANTERIORES | 6 |
| 1.7. AGRADECIMIENTOS | 8 |
| 2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL | 10 |
| 2.1. GENERALIDADES | 10 |
| 2.2. ROCAS ESTRATIFICADAS | 10 |
| 2.2.1. Secuencias Sedimentarias del Paleozoico superior | 10 |
| 2.2.2. Grupo Choiyoi | 11 |
| 2.2.3. Formación Rancho de Lata | 11 |
| 2.2.4. Formación Patillos | 12 |
| 2.2.5. Formación La Manga | 12 |
| 2.2.6. Formación Auquilco | 12 |
| 2.2.7. Formación Tordillo | 13 |
| 2.2.8. Formación Diamante | 13 |
| 2.2.9. Formación Quebrada Marquesa | 14 |
| 2.2.10. Formación Pucalume | 14 |
| 2.2.11. Formación Viñita | 15 |
| 2.2.12. Formación Salamanca | 15 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.13. Estratos de Almendrillo | 16 |
| 2.2.14. Formación Estero Cenicero | 16 |
| 2.2.15. Estratos de Río Chicharra | 17 |
| 2.2.16. “Formación” Los Pelambres | 17 |
| 2.2.17. Formación Pachón | 18 |
| 2.2.18. Estratos de Mondaca | 19 |
| 2.2.19. Secuencia Volcánica Laguna del Pelado | 20 |
| 2.2.20. Complejo Volcánico El Yunque | 20 |
| 2.2.21. Depósitos Cuaternarios | 21 |
| 2.3. ROCAS INTRUSIVAS | 21 |
| 2.3.1. Batolito Pico Los Sapos | 21 |
| 2.3.2. Granitoides del Campaniano-Maastrichtiano | 22 |
| 2.3.3. Pórfido Riolítico Los Pelambres | 22 |
| 2.3.4. Plutones Zapallar y Manque Bajo | 23 |
| 2.3.5. Plutón Cuncumén | 23 |
| 2.3.6. Plutón Cerro Ossandón | 23 |
| 2.3.7. Plutón El Encanto | 24 |
| 2.3.8. Plutón Fredes e intrusivos asociados | 24 |
| 2.3.9. Plutones Leiva, Totoral y Río Negro | 25 |
| 2.3.10. Complejo Intrusivo Chalinga | 25 |
| 2.3.11. Pórfidos dioríticos de Tres Quebradas | 26 |
| 2.3.12. Intrusivos hipabisales de Río Santa Cruz | 26 |
| 2.3.13. Stock Pelambres | 26 |
| 2.3.14. Pórfidos mineralizados de Primavera de Cuncumén | 27 |
| 2.3.15. Pórfidos Cerro Bayo del Cobre | 27 |
| 2.3.16. Pórfidos de Los Pelambres, El Pachón y El Altar-Piuquenes | 28 |
| 2.4. ESTRUCTURAS | 29 |
| | |
| 3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO (MLP) | 31 |
| 3.1 GENERALIDADES | 31 |
| 3.2 LITOLOGÍA | 31 |
| 3.3 ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN | 34 |
| 3.3.1 Alteración | 34 |
| 3.3.2. Mineralización | 35 |
| 3.4 DOMINIOS ESTRUCTURALES | 36 |

| | |
|---|----|
| 4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL YACIMIENTO | 39 |
| 4.1. Generalidades | 39 |
| 4.2. Unidades Geotécnicas (UGT) | 39 |
| 5. MARCO TEÓRICO | 43 |
| 5.1 ENSAYOS DE RESISTENCIA DE ROCA | 43 |
| 5.1.1. Ensayo de Compresión Uniaxial Simple (UCS) | 43 |
| 5.1.2. Carga Puntual | 44 |
| 5.1.3. Relación entre UCS y Carga Puntual | 46 |
| 5.2 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN | 47 |
| 5.2.1. Inverso a la Distancia | 48 |
| 5.2.2. Kriging Ordinario | 49 |
| 5.2.2.1. Variografía | 52 |
| 6. MODELAMIENTO DE RESISTENCIA DE ROCA EN MINERA LOS PELAMBRES | 54 |
| 6.1. MODELAMIENTO CON DATOS UCS PUROS | 54 |
| 6.1.1. Análisis Exploratorio de datos (EDA) y Definición de dominios..... | 55 |
| 6.1.1.1. Unidades Geotécnicas (UGT) | 56 |
| 6.1.1.2. Litología | 57 |
| 6.1.1.3. Alteración | 59 |
| 6.1.1.4. Zona Mineral | 61 |
| 6.1.1.5. Unidades Geometalúrgicas (M) | 62 |
| 6.1.2. Estadísticas por Dominio | 64 |
| 6.1.3. Correlación Espacial | 66 |
| 6.1.4. Análisis de Contacto | 68 |
| 6.1.5. Control de Outliers | 71 |
| 6.1.6. Plan de Estimación | 73 |
| 6.1.7. Estimación de los Modelos | 74 |
| 6.1.8. Validación de los Modelos | 74 |
| 6.1.8.1. Validación Visual | 75 |
| 6.1.8.2. Validación Estadística | 76 |
| 6.1.8.3. Gráficos de Deriva | 79 |
| 6.2. MODELAMIENTO CON DATOS UCS+PLT | 81 |
| 6.2.1. Relación entre UCS y PLT | 82 |
| 6.2.2. Análisis Exploratorio de datos (EDA) y Definición de dominios..... | 86 |
| 6.2.3. Estadísticas por Dominio | 88 |

| | |
|---|-----|
| 6.2.4. Correlación Espacial | 90 |
| 6.2.5. Análisis de Contacto | 90 |
| 6.2.6. Control de Outliers | 92 |
| 6.2.7. Plan de estimación | 92 |
| 6.2.8. Estimación de los Modelos | 94 |
| 6.2.9. Validación de los Modelos | 94 |
| 6.2.9.1. Validación Visual | 95 |
| 6.2.9.2. Validación Estadística | 96 |
| 6.2.9.3. Gráficos de Deriva | 98 |
| | |
| 7. RESULTADOS | 100 |
| 7.1. ELECCIÓN DEL MODELO DE ESTIMACIÓN FINAL | 100 |
| | |
| 8. CONCLUSIONES | 105 |
| | |
| 9. REFERENCIAS | 107 |
| | |
| ANEXO | |



ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|---------------|---|---------------|
| 1.01. | Mapa Ubicación Rajo Mina Los Pelambres | 3 |
| 2.01. | Geología Regional Los Pelambres | 30 |
| 3.01. | Modelo litológico de Minera Los Pelambres | 32 |
| 3.02. | Modelo de alteración de Minera Los Pelambres | 35 |
| 3.03. | Estereogramas por Unidades Geotécnicas | 38 |
| 4.01. | Unidades Geotécnicas de Los Pelambres | 42 |
| 4.02. | Perfil esquemático de una sección NE-SW de la mina con las UGT en profundidad | 42 |
| 5.01. | Configuración de carga y requerimientos en la forma de los testigos | 45 |
| 5.02. | Modos típicos de falla para muestras válidas e inválidas | 46 |
| 5.03. | Esquema Zona V | 49 |
| 5.04. | Forma típica de un variograma con sus rasgos característicos | 53 |
| 5.05. | Variograma experimental junto a su modelo | 53 |
| 6.01. | Probabilidad de UCS | 56 |
| 6.02. | Probabilidad de UCS por UGT | 57 |
| 6.03. | Desviación estándar versus promedio de las distintas UGT | 58 |
| 6.04. | Probabilidad de UCS por Litología | 58 |
| 6.05. | Desviación estándar versus promedio de las distintas litologías | 59 |
| 6.06. | Probabilidad de UCS por Alteración | 60 |
| 6.07. | Desviación estándar versus promedio de las distintas alteraciones | 60 |
| 6.08. | Probabilidad de UCS por Zona Mineral | 61 |
| 6.09. | Desviación estándar versus promedio de las distintas zonas minerales | 62 |
| 6.10. | Probabilidad de UCS por M | 63 |
| 6.11. | Desviación estándar versus promedio de las distintas M | 64 |
| 6.12. | Probabilidad de UCS por Dominio Blando | 65 |
| 6.13. | Probabilidad de UCS por Dominio Duro | 65 |
| 6.14. | Correlogramas en tres direcciones ortogonales para el Dominio Blando | 66 |
| 6.15. | Correlogramas en tres direcciones ortogonales para el Dominio Duro | 67 |
| 6.16. | Perfil de contacto entre Lixiviado Total y Lixiviado Parcial | 68 |
| 6.17. | Perfil de contacto entre Lixiviado Parcial y Secundario | 69 |
| 6.18. | Perfil de contacto entre Secundario y Primario Sin Anhidrita | 69 |
| 6.19. | Perfil de contacto entre Primario Sin Anhidrita y Primario Con Anhidrita | 70 |
| 6.20. | Perfil de contacto entre Dominio Blando y Dominio Duro | 71 |
| 6.21. | Valores outliers para el Dominio Blando | 72 |
| 6.22. | Valores outliers para el Dominio Duro | 72 |
| 6.23. | Validación visual del modelo de bloques en perfil sección 89.840 del modelo ID de UCS Puros | 75 |
| 6.24. | Validación visual del modelo de bloques en nivel 3.360 del modelo ID de UCS Puros | 76 |
| 6.25. | Porcentaje y número de bloques estimados por pasada en la estimación con datos UCS Puros | 77 |
| 6.26. | Promedio UCS estimado y Muestras por Zona Mineral y pasadas para la estimación por inverso a la distancia con los datos UCS Puros | 78 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.27. | Gráficos de deriva del modelo ID con datos UCS Puros | 80 |
| 6.28. | Ensayos UCS y PLT en UGT-1 | 84 |
| 6.29. | Ensayos UCS y PLT en UGT-9 | 84 |
| 6.30. | Probabilidad de UCS por Zona Mineral | 87 |
| 6.31. | Desviación estándar versus promedio de las distintas zonas minerales | 87 |
| 6.32. | Probabilidad de UCS por Dominio Blando | 88 |
| 6.33. | Probabilidad de UCS por Dominio Intermedio | 89 |
| 6.34. | Probabilidad de UCS por Dominio Duro | 89 |
| 6.35. | Perfil de contacto entre Dominio Blando y Dominio Intermedio | 91 |
| 6.36. | Perfil de contacto entre Dominio Intermedio y Dominio Duro | 91 |
| 6.37. | Valores outliers para el Dominio Blando | 92 |
| 6.38. | Valores outliers para el Dominio Intermedio | 93 |
| 6.39. | Valores outliers para el Dominio Duro | 93 |
| 6.40. | Validación visual del modelo de bloques en perfil sección 89.840 del modelo ID de UCS+PLT | 95 |
| 6.41. | Validación visual del modelo de bloques en nivel 3.360 del modelo ID de UCS+PLT | 96 |
| 6.42. | Porcentaje y número de bloques estimados por pasada en la estimación con datos UCS+PLT | 97 |
| 6.43. | Promedio UCS estimado y Muestras por Zona Mineral y pasadas para la estimación por inverso a la distancia con los datos UCS+PLT | 97 |
| 6.44. | Gráficos de deriva del modelo ID con datos UCS+PLT | 99 |
| 7.01. | Comparación entre los modelos con UCS Puro y UCS+PLT frente a las Velocidades de Perforación (Perforadora 21, Operador Jonathan Lara) | 102 |
| 7.02. | Comparación entre los modelos con UCS Puro y UCS+PLT frente a las Velocidades de Perforación (Perforadora 24, Operador Rodrigo Araya) | 103 |
| 7.03. | Comparación valores UCS modelos UCS Puro y UCS+PLT con velocidades de perforación | 104 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | | Página |
|--------------|--|---------------|
| 6.01. | Número de ensayos UCS válidos por cada UGT | 55 |
| 6.02. | Tabla resumen con valores de correlogramas para ambos dominios | 67 |
| 6.03. | Tabla resumen Plan de Estimación | 73 |
| 6.04. | Número de ensayos PLT válidos por cada UGT | 81 |
| 6.05. | UCS y Is50 promedio por UGT, con respectivo número de datos y factor entre ambos | 82 |
| 6.06. | Número de ensayos UCS más ensayos PLT transformados por cada UGT | 86 |
| 6.07. | Tabla resumen con valores de correlogramas para los tres dominios | 90 |
| 6.08. | Tabla resumen plan de estimación | 94 |

RESUMEN

Minera Los Pelambres se encuentra dentro de los cinco primeros productores de cobre de Chile, lo que hace que este yacimiento corresponda a una excelente zona de estudio, sobre todo en ámbitos como mineralogía, litología, alteraciones y estructuras.

Este yacimiento tipo pórfido cuprífero, con rocas que abarcan del Cretácico al Holoceno, cuenta para su desarrollo y estructura de varias áreas, las que trabajan en conjunto para que los objetivos se cumplan a medida que avanza el proyecto. Dentro de estas áreas se encuentra la Gerencia de Mantenimiento, encargada de la mantención de equipos y componentes, procurando el buen uso de estos, evitando las fallas de equipo y tratando de que los tiempos de las mismas sean los menores posibles, debido a que afectan a toda la línea de trabajo.

Para poder lograr una optimización a la hora de realizar trabajos de perforación, es necesario conocer los parámetros operacionales que deben ser ocupados para las distintas resistencias que ejercen las diversas rocas del yacimiento, por lo anterior, se hace necesario un modelo que indique para cada sector de la mina, el valor de estas resistencias. Por medio de la revisión y filtración de base de datos de ensayos de mecánica de roca, se busca realizar este modelo. Para lo anterior, se utilizan datos de ensayos de compresión uniaxial y de carga puntal, además de ocupar dos métodos de estimación distintos (inverso a la distancia y kriging ordinario) que permitan realizar comparaciones y así, evaluar cual modelo se ajusta más a la realidad.

Las bases de datos se analizan con el fin de establecer dominios de estimación, para esto, se estudian las diversas variables geológicas que afectan a la resistencia de roca, determinando que las zonas minerales comprenden el mejor criterio que controla dicho parámetro dentro del yacimiento. Una vez obtenidos estos dominios y revisando el comportamiento de los datos en cuanto a su estadística, relación espacial, datos outliers, zonas de contactos, entre otros, se utiliza el *software* Vulcan 9.0.2. para realizar el modelamiento implícito que permita estimar valores en donde no los hay y, además, visualizar la información en tres dimensiones.

Una vez obtenidos cuatro modelos de estimación, dos para los datos de ensayos de compresión uniaxial puros y dos para los datos combinados con los de carga puntal, se procede a compararlos y buscar cuál de ellos, para el caso de Minera Los Pelambres, corresponde al mejor modelo. Esta comparación comprende estudios estadísticos entre los valores de las muestras ocupadas con los bloques estimados en el modelo. Por otra parte, se analiza toda la información utilizada para buscar ventajas y falencias al momento de estimar. Por último, y al no tener datos recientes de ensayos de resistencia, se utilizan datos de velocidad de perforación para indicar la relación existente entre el valor calculado y las velocidades obtenidas en terreno.

Finalmente, al comparar los dos métodos ocupados y los dos tipos de datos (puros y combinados), se concluye que para el caso de Minera Los Pelambres, el mejor método de estimación para los datos es por inverso a la distancia, utilizando datos puros de ensayos de compresión uniaxial.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Minera Los Pelambres se encuentra dentro de las empresas productoras de cobre más importantes de Chile, por lo mismo, ha sido estudiada en muchas ocasiones y en diferentes ámbitos. Aun así, hay diversos tópicos que aún no han sido estudiados o bien, han sido descartados, priorizando aquellos que generen un valor económico o aporten significativamente a la producción de la minera.

Pese a que lleva más de 19 años produciendo, la minera aún no cuenta con un modelo implícito de resistencia de roca, que permita conocer el mejor valor estimado *in situ* y ser ocupado para las diferentes tareas de las distintas áreas, como lo son las perforaciones y tronaduras, por ejemplo. Para lo anterior, ocupan un modelo geotécnico que, si bien se realizó con ensayos de laboratorio, entrega un amplio rango de valores para un mismo sector (las denominadas Unidades Geotécnicas), haciendo que el valor de resistencia de roca sea variable y no un valor puntual.

Otra de las tareas importantes realizadas diariamente en la mina es la mantención de los equipos, producida por diversos factores, entre ellos, la mala selección del instrumental a ocupar por el desconocimiento de los parámetros operacionales y las características del terreno. Por lo tanto, y sumado a lo anteriormente mencionado, se hace necesario la realización de un modelo que pueda ayudar a conocer el valor de resistencia *in situ* y que pueda ser ocupado junto a las Unidades Geotécnicas para tener un mayor control y planificación de las diversas tareas, y también, que ayude en la selección de instrumental para optimizar y disminuir los periodos de mantención.

Con este objetivo, se pretende estudiar los ensayos de resistencia realizados durante los años que la mina lleva en producción y relacionarlos entre sí, además de realizar modelos de estimación mediante dos métodos distintos, con el fin de comparar y analizar cual se ajusta mejor a los parámetros y valores de terreno, para poder utilizarlo en procesos de mantención de los equipos y de perforación y tronadura.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Generar un modelo predictivo de resistencia de roca en Minera Los Pelambres utilizando la estimación por inverso a la distancia y kriging ordinario mediante el *software* Vulcan 9.0.2.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Generar una base de datos tanto de UCS (Uniaxial Compressive Strength) como PLT (Point Load Test), filtrando la información a utilizar para la realización del modelo y validándola con la geología de la mina.
2. Identificar diferencias y similitudes entre la estimación por inverso a la distancia y kriging ordinario, tanto para la estimación UCS como PLT.
3. Identificar diferencias y similitudes entre los valores de los ensayos UCS y PLT, tanto cualitativa como cuantitativamente.
4. Analizar la posible relación entre los ensayos UCS y PLT con el fin de aumentar la cantidad de datos y unificarlos en un solo modelo final.
5. Validar el modelo de resistencia de roca mediante datos de terreno e identificar sus posibles usos dentro de la minera, en especial en el área de mantenimiento.

1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS

Minera Los Pelambres se ubica a 240 km al norte de la ciudad de Santiago y 45 km al este de Salamanca, Provincia de Choapa, al sur de la Región de Coquimbo. El rajo actual de la mina se encuentra en plena Cordillera de los Andes a una altitud que varía entre 2.500 a 4.000 m s.n.m. (Figura 1.01.). Referencialmente se pueden indicar las coordenadas UTM (WGS84) 6.490.300 norte y 358.900 este como la parte central del rajo.

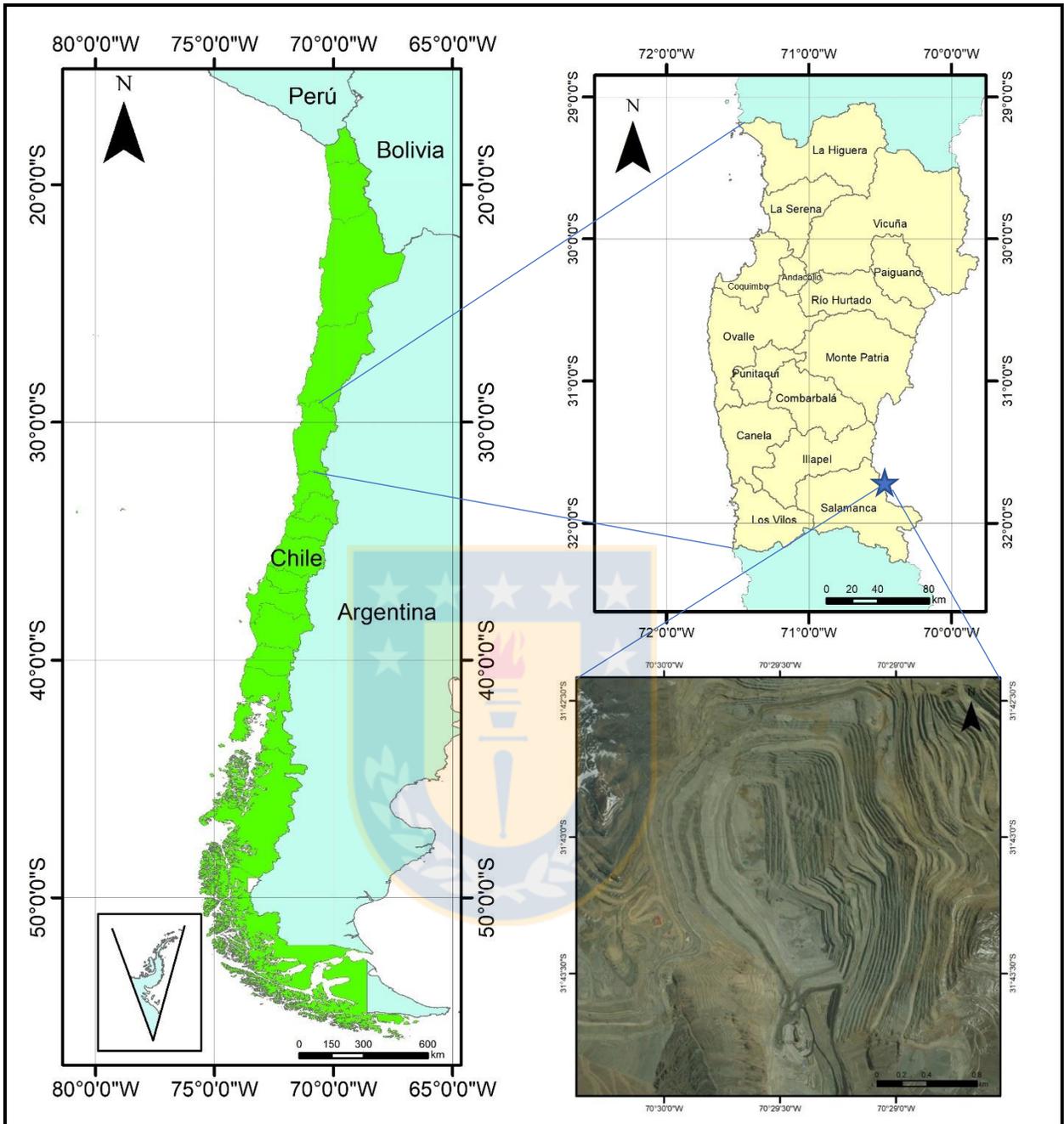


Figura 1.01. Mapa Ubicación Rajo Mina Los Pelambres

Para acceder por tierra, se debe utilizar la ruta 5 norte y luego desde Los Vilos tomar la ruta D-85 o bien, desde Huentelauquén la ruta D-75. Ambas rutas conectan con Salamanca, desde aquí, se debe tomar la ruta D-835 que conecta con la ruta D-871, la cual llega a Portones, lugar de acceso a las instalaciones de Minera Los Pelambres. Otra alternativa es el acceso mediante avión, ya que la minera cuenta con aeródromo.

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

1.4.1. Etapa Bibliográfica

Comprende la recopilación y selección de informes geológicos y geotécnicos asociados a Minera Los Pelambres, con el fin de conocer la metodología de la mina, además de filtrar la información a ocupar en la posterior realización del modelo. De manera complementaria, se realiza el estudio de la teoría asociada al proceso de modelamiento implícito. Por otro lado, se recopila la base de datos de ensayos UCS y PLT.

1.4.2. Etapa de Revisión y Análisis de Datos

Comprende la revisión de la base de datos de ensayos UCS y PLT junto a la estructuración de dicha información y a la posterior creación de las nuevas bases de datos que se utilizarán en el modelo. Paralelamente se realiza el análisis exploratorio de datos (EDA) que incluye la confección de gráficos a partir de los cuales se identifican dominios de estimación, relacionados con atributos como alteración, mineralización y litología. Por último, en esta etapa se contempla buscar la relación matemática entre ambos tipos de ensayos con el fin de generar un modelo global que contenga la mayor cantidad de información.

1.4.3. Etapa de Modelamiento

Esta etapa corresponde a la creación del modelo de estimación para UCS y PLT, tanto por inverso a la distancia como por kriging ordinario. La finalidad de esta etapa es determinar qué tipo de estimación es más precisa y que valores de ensayo de resistencia se acomoda más a la realidad.

1.4.4. Etapa de Validación del Modelo

Etapa final que abarca la validación del modelo mediante datos de perforación para determinar la precisión de este. Se utilizarán los datos y otros parámetros mecánicos con el fin de validar si la información del modelo es correcta, en caso contrario se agregará la información obtenida en terreno al modelo con el fin de actualizarlo y mejorarlo.

1.5. CLIMA, FLORA Y FAUNA

1.5.1. Clima

Minera Los Pelambres tiene sus instalaciones en distintos sectores de la Provincia de Choapa, por lo que dependiendo del sector el clima varía, pudiendo ser Clima de Estepa Cálido con Precipitaciones Invernales, Clima Estepárico Costero o Nuboso, o bien, Clima Templado Frío de Altura, siendo este último el dominante en el sector mina.

- **Clima Templado Frío de Altura:** Este tipo de clima se localiza en la Cordillera de Los Andes, sobre los 3.000 m s.n.m. con características de altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieves permanentes que constituyen un aporte significativo de agua en el período estival. Clima predominante en el rajo.
- **Clima de Estepa Cálido con Precipitaciones Invernales:** Clima ubicado en la parte interior de la cuenca, por sobre los 800 m s.n.m. Se caracteriza por ausencia de nubosidad y sequedad del aire. Sus temperaturas son mayores que en la costa, con precipitaciones poco abundantes y períodos de sequía característicos. Este clima predomina en las instalaciones del campamento Chacay.
- **Clima Estepárico Costero o Nuboso:** Presente a lo largo de toda la costa. Su influencia llega hasta el interior hasta 40 km, por medio de los valles transversales y quebradas. Su mayor característica es la abundante nubosidad, humedad y temperaturas moderadas, con

un promedio de precipitaciones de 130 mm anuales y un período seco de 8 a 9 meses. Clima predominante en las instalaciones del Puerto Punta Chungo en Los Vilos.

1.5.2. Flora y Fauna

Minera Los Pelambres posee una diversidad de flora y fauna típica de la zona cordillerana en donde se ubica. Dentro de la fauna existente destacan: guanaco (*Lama guanicoe*), cóndor (*Vultur gryphus*), vizcacha (*Lagidium viscacia*), zorro culpeo (*Lycalopex culpaeus*) y puma (*Puma concolor*). Por otro lado, dentro de la flora presente en las instalaciones de la minera destacan el quillay (*Quillaja saponaria*), espino (*Acacia caven*), maqui (*Aristotelia chilensis*), arbustos como el romerillo (*Baccharis linearis*), matico (*Buddleja globosa*), chacay (*Ochetophila trinervis*) y suculentas como sandillón (*Eriogyne aurata*), quisco (*Trichocereus chiloensis*) y quisquito (*Pyrrhocactus curvispinus*)

1.6. TRABAJOS ANTERIORES

Los estudios en el sector de Minera Los Pelambres comienzan en 1914, cuando William Braden Burford explora el área del depósito. Entre los primeros estudios geológicos realizados en el yacimiento destacan el de Quirt *et al.* (1971) quienes dataron radiométricamente cuerpos intrusivos hipabisales, que afloran en el área del yacimiento; y el informe técnico N°21 preparado por las Naciones Unidas para el Gobierno de Chile en 1971, el cual presenta una compilación de antecedentes técnicos geofísicos, geológicos y geoquímicos, obtenidos de las investigaciones llevadas a cabo por el Proyecto Chile-28 NU-ENAMI en el Yacimiento Los Pelambres.

Posteriormente, Vicente (1972) describe la geología regional del área con énfasis en la estratigrafía de las rocas jurásicas y cretácicas, y Sillitoe (1973) describe por su parte la geología, alteración hidrotermal y mineralización de Los Pelambres.

En la década de los 80', luego de que Anaconda S.A. adquiriera a ENAMI los derechos sobre Los Pelambres se realizan una serie estudios por parte de la empresa cuya finalidad era la evaluación geotécnica de estabilidad de taludes en el *open pit* del Proyecto Los Pelambres. Entre estos estudios se encuentran:

- Anaconda S.A., octubre de 1980: Determinación de propiedades físico-mecánicas en muestras de sondajes del yacimiento Los Pelambres.
- Anaconda S.A., mayo de 1981: Determinación de parámetros físico-mecánicos de muestras de rocas del yacimiento Los Pelambres.
- Anaconda S.A., octubre de 1981: Determinaciones de edades en K/Ar realizadas en muestras de superficie de rocas intrusivas del Proyecto Los Pelambres.
- Anaconda S.A., marzo de 1982: Determinación de fatigas *in situ* en el Yacimiento Los Pelambres.
- Anaconda S.A., octubre de 1982: Informe de avance del Proyecto Geotécnico Los Pelambres, en el cual se muestra en plantas escala 1:10.000 (niveles de 3.600 al 2.960 m s.n.m.) la zonificación de los macizos rocosos en base a su comportamiento y propiedades geomecánicas.

Rivano y Sepúlveda (1991), entregan información sobre el marco geológico regional del Yacimiento Los Pelambres en la Hoja de Illapel de la Carta Geológica de Chile a escala 1:250.000, definiendo las principales unidades intrusivas y estratificadas.

En 1993, Minera Los Pelambres realizó ensayos de mecánica de rocas en muestras del Sector Este del Yacimiento Los Pelambres. Desde este año al 2014 se realizaron los ensayos mecánicos utilizados en la realización de esta memoria de título.

Reich *et al.* (2003) estudian las implicancias metalogénicas de las señales adakíticas de las intrusiones miocenas tardías del depósito Los Pelambres. Por otro lado, Bertens *et al.* (2003, 2006) estudian la geocronología y evolución del pórfido Los Pelambres-El Pachón. Mpodozis *et al.* (2009) estudian las implicancias para la evolución cenozoica de Los Andes del centro de Chile y Argentina, utilizando geocronología U/Pb y tectónica de la región de Los Pelambres-Cerro

Mercedario. Perelló *et al.* (2012) estudian la configuración y evolución de los depósitos de pórfidos cobre-molibdeno y cobre-oro en el yacimiento.

En el año 2013, la empresa E-Mining realiza el Estudio Geotécnico Pre-factibilidad: proyecto expansión Rajo Minera Los Pelambres, orientado a analizar la estabilidad del diseño propuesto del Rajo Expansión. El 2015, la misma empresa presenta su Informe: Modelo Geotécnico Factibilidad PIP 2015 Rajo Los Pelambres en donde muestra los resultados de la actualización del Modelo Geotécnico, correspondiente a la Etapa de Ingeniería de Factibilidad del Proyecto Integrado Pelambres.

Mpodozis (2015) estudia el área y realiza el Mapa Geológico Regional del Área de Los Pelambres (escala 1:75.000), Bergoeing (2016) en su memoria de título, menciona las implicancias para la evolución tectónica y metalogénica de los andes de Chile Central mediante el estudio de la evolución geoquímica del magmatismo de la región de los pelambres (31°S) entre el Cretácico Superior y el Mioceno Superior. Finalmente, Tapia *et al.* (2016) determina los efectos de la alteración hidrotermal en las propiedades magnéticas de Los Pelambres.

1.7. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a todo el personal de Minera Los Pelambres que me ayudó de alguna u otra forma a que esta memoria viera la luz. A mi tutor César Zepeda, por el conocimiento compartido, por su voluntad y entrega, y por ser un apoyo fundamental en mi desarrollo como futuro profesional. A los geólogos de la Superintendencia de Geotecnia, César Contreras, Williams Ferrada y Felipe Spiess por todas las veces que me escucharon y me ayudaron en lo que les solicité, por las risas compartidas y por siempre estar con la mejor disposición. A don Roberto Valdés, cuya gran ayuda hizo posible la realización de esta memoria, sin su tiempo y sus enseñanzas hubiese sido muy difícil realizar mi investigación y nunca podría haber aprendido tanto como lo hice. A Rossana Caroca por su amabilidad, simpatía y preocupación y a Leslie Paredes por la ayuda entregada.

A los memoristas, Fernanda Vera, Mauricio Díaz, Ángel Báez, Juan Pablo Reyes, Sebastián Rejas, Lorenzo Molina e Ibrahim Alé por todos los gratos momentos durante mi estadía en Minera Los Pelambres, por las conversaciones de pasillo, por los cigarros en la escalera y por más de una vez soportar mi ánimo y mis cambios de humor. Muchas gracias por tanto.

A los profesores y personal del Departamento Ciencias de la Tierra, que durante estos años me han entregado el conocimiento necesario para poder desempeñarme en el ámbito laboral. Agradezco con especial cariño al profesor Óscar Figueroa, por creer en mi desde los primeros años de carrera y darme la oportunidad de ser ayudante de sus ramos y al profesor Abraham González por aceptar ser mi profesor patrocinante.

Agradecimientos infinitos a Carlos Zuleta y Paula Farias, por la gestión y la confianza depositada en mí, sin ustedes no habría podido ingresar a MLP y desarrollar mi memoria.

A mis amigos, por su apoyo incondicional durante el tiempo que han sido parte de mi vida. A Andy Lagos, Catalina Cabello, Sebastián Inostroza, Catalina Díaz, Camilo Gormaz, Juan Pablo Bascur, Javiera Nazar, Belén Jerez, Vanessa Vargas y Conzuelo Silva, por estar en las buenas y en las malas, por conocerme y aún así seguir en mi vida. Por ver siempre lo bueno en mí y seguir haciéndolo, aún con mis mil y una caídas. Gracias por sus consejos, por sus muestras de cariño, por estar aún en la distancia.

Gracias a mi familia, a mi padre Juan Fernando y a mi madre Marianne, a mis hermanas Mariana y Ana Cecilia y a mi hermano Álvaro, que como buen ángel me ha acompañado en todo momento. Gracias Anita e Ignacio por soportarme durante tantos meses en Santiago y a Germán e Isabel por ser la alegría del departamento.

Gracias a Dios, por permitirme estar vivo y disfrutar cada día lo que tiene para ofrecerme. Por ponerme a prueba y hacer crecer mi fe con cada desafío. Por siempre estar cuando lo necesito.

A todas las personas que han pasado por mi vida y me han dejado algo para seguir creciendo. A los que llegaron hace poco, a los que se fueron, a los que van y vienen, y a los que vendrán. Gracias.

2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1. GENERALIDADES

A modo general, la geología de la Cordillera de los Andes a la latitud de Minera Los Pelambres consiste en rocas del basamento Paleozoico que se encuentran intruídas por rocas del orógeno Andino cuyas edades varían del Jurásico al Holoceno. Específicamente, en el sector del rajo, afloran rocas sedimentarias que van desde el Cretácico e intrusivas principalmente del Mioceno.

Algunos trabajos que describen la geología regional de Minera Los Pelambres son los de Rivano y Sepúlveda (1991), Álvarez (1996, 2006), Cristallini *et al.* (1995), Mpodozis *et al.* (2009), Perelló *et al.* (2012), Mpodozis y Cornejo (2012), entre otros. El trabajo más reciente corresponde a Mpodozis (2015) en el contexto de la elaboración del Mapa de Los Pelambres, escala 1:75.000; al ser la información más actualizada y completa se utilizará ésta como referencia para el marco geológico regional.

2.2. ROCAS ESTRATIFICADAS

2.2.1. Secuencias Sedimentarias del Paleozoico superior

Areniscas micáceas (grauvacas) de grano fino a medio y lutitas de color gris verdoso, en parte córneas, afectadas por metamorfismo regional de bajo grado, que afloran entre los ríos Carnicerías y Mondaca, al sur y en la zona de quebrada El Colorado, al norte del río de La Pantanosa. Musso *et al.* (2012) denominan a estas rocas como “Complejo Alfarcillo”. En cuanto a su relación espacial, estas secuencias no presentan base expuesta y están intruidas por los granitoides del Batolito Pico Los Sapos, además de encontrarse cubiertas, en discordancia, por la Formación Rancho de Lata. En Pérez y Ramos (1996) y Heredia *et al.* (2002) estudian secuencias de características similares, que incluyen diamictitas, y que han sido, generalmente, atribuidas al Carbonífero. Éstas son de común ocurrencia en la Cordillera Frontal donde están cubiertas en discordancia angular por el Grupo Choyoi.

2.2.2. Grupo Choiyoi

Potente sucesión de rocas volcánicas y piroclásticas de más de 2.000 m de espesor según Álvarez (2006) que alcanza gran desarrollo en la Cordillera de Santa Cruz en donde no presenta base expuesta y está intruida por granitoides atribuidos al Paleozoico superior. Afloramientos de menor volumen ocurren al oeste de la Falla Mondaca, donde están intruidos por los granitoides del Batolito Pico Los Sapos.

La unidad está formada principalmente por brechas piroclásticas, tobas soldadas y tobas de caída, de composición riolítica con característicos ojos de cuarzo; e incluye intercalaciones de areniscas y conglomerados. Se le atribuye en literatura una edad permo-triásica o triásica (por ejemplo, en Pérez y Ramos, 1996), aun así, las relaciones espaciales observadas en la región indican que su edad no sería más joven que el Pérmico inferior, pudiendo ser incluso más antigua.

2.2.3. Formación Rancho de Lata

Rocas piroclásticas y sedimentarias continentales de hasta 400 m. Forman el relleno de un sistema de cuencas extensionales limitadas por fallas normales, labradas en el Grupo Choiyoi en la ladera occidental de la Cordillera de Santa Cruz (“Sistema de Rift del Mercedario”, Álvarez y Ramos, 1999; Cristallini y Ramos, 2000). Se dispone, al oeste de la Falla Mondaca, en forma subhorizontal y en discordancia sobre los granitoides pérmicos del Batolito Pico Los Sapos y metareniscas del Paleozoico superior.

Se constituye por tobas soldadas, tobas de caída y brechas piroclásticas riolíticas que alternan con conglomerados, areniscas y lutitas lacustres con restos vegetales fósiles e intercalaciones de lavas y sills basálticos. Álvarez *et al.* (1995) y Álvarez (2006) interpretan esta formación como una secuencia de “*synrift*” y la atribuyen al Triásico Medio a Superior, acotándose esta edad a $239,1 \pm 4,5$ Ma (Ladiniano), por la datación U-Pb de una muestra de toba riolítica, recolectada cerca de la confluencia del río del Yeso y el río Carnicerías.

2.2.4. Formación Patillos

Alternancia de calizas bioclásticas arenosas, areniscas bioclásticas, calcilutitas, areniscas y areniscas tobáceas, limolitas y conglomerados de color gris a pardo rojizo, acumuladas en un ambiente marino litoral. Se encuentra en discordancia sobre la Formación Rancho de Lata y forma una delgada franja NS de afloramientos a lo largo del valle del río Santa Cruz. Alcanza cerca de 200 m de espesor en la zona de río Mercedario, acunándose hacia el norte hasta desaparecer al norte del río Carnicerías. Su contenido fosilífero le atribuye la edad Pliensbachiano-Caloviano (Álvarez, 2006).

2.2.5. Formación La Manga

Unidad calcárea de hasta 100 m de espesor que sobreyace concordante a la Formación Los Patillos. Forma una característica cornisa calcárea de color gris expuesta a lo largo del valle del río Santa Cruz cuyo espesor disminuye hacia el norte hasta desaparecer al norte del río Carnicerías. Según Álvarez (2006) está constituida por una alternancia de calizas bioclásticas, calizas oolíticas, brechas calcáreas y flujos de detritos calcáreos. En la confluencia de los ríos Santa Cruz y Pachón contiene niveles de coquinas de equinodermos. Álvarez *et al.* (1995) indica que esta formación representaría un periodo de sedimentación de gran energía durante un estadio de mar bajo.

2.2.6. Formación Auquilco

Unidad de hasta 100 m de espesor constituida exclusivamente por evaporitas (yeso, anhidrita y halita) dispuesta concordantes sobre la Formación La Manga, en el valle del río Mercedario, formando grandes complejos diapíricos en el flanco occidental del Cordón de La Ramada (Cristallini y Ramos, 2000). Se acuña y desaparece al norte de Laguna del Pelado. Al oeste de la Falla Mondaca forma pequeños diapiros emplazados en la Formación La Manga, en los valles de los ríos Alitre y Pachón y también en la Formación Pachón (río del Yeso). De acuerdo con Álvarez

et al. (1995) y Cristallini y Ramos (2000) tendría una edad comprendida entre el Oxfordiano y el Kimmeridgiano inferior.

2.2.7. Formación Tordillo

Secuencia de conglomerados, areniscas y lutitas rojas continentales que, al sur de Laguna del Pelado, sobrepasa los 500 m de espesor y se apoya concordantemente sobre las evaporitas de la Formación Auquilco. Al norte de Laguna del Pelado, en el valle del río Santa Cruz, descansa en discordancia de erosión sobre la Formación La Manga y constituye una faja de afloramientos de rumbo norte-sur cuyo espesor disminuye hasta desaparecer por completo al norte del río de La Pantanosa. Según Álvarez (1996) corresponde a una asociación de facies de abanicos aluviales, ríos entrelazados y depósitos de playa lake cuya edad estaría comprendida entre el Kimmeridgiano y el Titoniano.



2.2.8. Formación Diamante

Unidad sedimentaria de espesor variable que no supera los 300 m de potencia, formada por areniscas rojas y conglomerados de grano fino a medio. Aflora al sur de Laguna del Pelado y en el valle del río Mercedario, donde se dispone concordantemente sobre las evaporitas de la Formación Auquilco, mientras que al norte, en las nacientes del río Santa Cruz, descansa directamente sobre las areniscas de la Formación Tordillo. Según Álvarez (2006) y Guitart (2007) incluye algunos niveles de tobas de caída. Estas rocas sedimentarias representan principalmente a depósitos de origen fluvial (abanicos aluviales y ríos entrelazados a mendriformes) de acuerdo con Cristallini y Ramos (1996). Si bien se apoyan concordantemente sobre calizas marinas neocomianas (Grupo Mendoza, Aguirre-Ureta y Lo Forte, 1996) las relaciones de terreno observadas en la zona del río Santa Cruz sólo permiten atribuirle, con reservas, una probable edad cretácica inferior.

2.2.9. Formación Quebrada Marquesa

Secuencia de conglomerados rojos continentales que aflora al oeste de Coirón, entre el valle del Choapa y el estero Quelén. Su base no está expuesta y se encuentra cubierta en discordancia angular suave por la Formación Salamanca. Rivano y Sepúlveda (1991) incluyeron estos afloramientos dentro de “Miembro Quelén” (superior) de la formación, el cual según señalan, comprende además de rocas clásticas, niveles de andesitas y brechas piroclásticas de color rojo. Su edad se ubicaría de acuerdo a relaciones espaciales regionales entre el Barremiano y el Aptiano (Rivano y Sepúlveda, 1991) o bien, en el valle de Limarí entre el Hauteriviano y el Albiano (Pineda y Calderón, 2008). Estas asignaciones son consistentes con el hecho que, en la zona de Salamanca, la formación esté intruida por el Plutón Illapel, en el cual se han obtenido numerosas edades K/Ar, Ar/Ar y U-Pb cercanas a los 100 Ma (Ferrando *et al.* 2014).

2.2.10. Formación Pucalume

Alternancia bien estratificada de areniscas rojas (volcarenitas y grauvacas andesíticas), limolitas laminadas (en parte calcáreas) con ostrácodos, calizas y conglomerados finos que aflora a lo largo del cordón limítrofe chileno-argentino entre el río Chalinga y las nacientes del río Tascadero. Sus afloramientos forman parte de una faja de dirección NNW comprendido entre las Fallas Pantanosa, al este y Tres Quebradas, al oeste, que constituye la prolongación hacia el norte de los afloramientos de estratos intensamente deformados de la “Formación” Los Pelambres. Aunque dentro de la zona deformada, su base no está expuesta, según Rivano y Sepúlveda (1991) en la zona de río Tascadero, la Formación Pucalume se apoya, concordantemente sobre rocas neocomianas de la Formación Río Tascadero. No existen antecedentes directos que permitan precisar su edad, Barremiano-Albiano? según Rivano y Sepúlveda (1991) o Aptiano-Cenomaniano? de acuerdo a Pineda y Calderón (2008).

2.2.11. Formación Viñita

Secuencia volcánica que aflora en las cercanías o a lo largo de la frontera Chile-Argentina, entre el Estero Puentecillas y las nacientes del río Tascadero, y que se apoya aparentemente en discordancia sobre la Formación Pucalume. Está compuesta principalmente por basaltos y andesitas basálticas de olivino y dos piroxenos, andesitas, intercalaciones de tobas líticas y volcarenitas andesíticas y diques máficos. Su edad es difícil de determinar ya que no se cuenta con datos radiométricos directos. En las nacientes del Estero Cenicero está cubierta en discordancia por los Estratos de Almendrillo (Campaniano-Maastrichtiano). Su posición estratigráfica permitiría considerar a esta formación, como un equivalente temporal de la Formación Salamanca. Afloramientos ubicados en la región de Montepatria-El Maqui fueron atribuidos por Pineda y Calderón (2008) al Turoniano?-Campaniano, señalando que, aún más al norte (zona de Pichasca) se obtuvo dentro de la Formación Viñita una datación U-Pb en circones de $86,8 \pm 0,8$ Ma (Coniaciano).

2.2.12. Formación Salamanca

Secuencia volcánica continental bien estratificada de más de 1.000 m de espesor. Forma un monoclinial con suave manteo al este ($10-15^\circ\text{E}$) y que, en la zona de Coirón, se apoya en leve discordancia angular sobre la Formación Quebrada Marquesa. Descrita originalmente por Rivano y Sepúlveda (1991), está formada principalmente por andesitas y andesitas basálticas porfídicas y afaníticas, brechas andesíticas y en menor proporción intercalaciones sedimentarias, las cuales están generalmente alteradas (clorita, epidota, actinolita e incluso zeolitas). En la zona de Coirón su base corresponde a un nivel de tobas con abundantes líticos y pómez en las cuales se obtuvo una edad U-Pb en circones de $90,6 \pm 1,3$ Ma. Otra datación U-Pb realizada en una muestra de andesitas proveniente del valle del río del Sobrante indicó una edad de $84,5 + 1,2 / - 1,4$ Ma. Una edad aún más joven obtenida de igual forma se obtuvo al sur del río Manque $77 \pm 1,1$ Ma. Los datos anteriores son consistentes con el hecho de que la formación está intruida por granitoides datados entre 74 y 70 Ma (Plutón Zapallar, por ejemplo) e indica que su edad estaría comprendida entre el Turoniano y el Campaniano. Su posición estratigráfica y edad permiten correlacionarla con la Formación Viñita, expuesta más al este, en el cordón limítrofe con Argentina.

2.2.13. Estratos de Almendrillo

Secuencia volcánica, piroclástica y sedimentaria, de espesor variable y más de 500 m de potencia que cubre en discordancia angular a la Formación Salamanca entre los ríos Chalinga y Manque, y que hacia el sur, está en contacto con la misma formación por medio de la Falla Pocuro. Comprende dos niveles estratigráficos de litología característica y edad diferente.

- Nivel Inferior (75-74 Ma) constituido por una secuencia bien estratificada de rocas piroclásticas con intercalaciones de niveles sedimentarios.
- Nivel Superior (72-70 Ma) formado principalmente por lavas básicas y algunas intercalaciones de tobas. Las lavas corresponden a andesitas basálticas y basaltos de olivino (alterados a bowlingita e iddingsita) y piroxeno.

Dentro de Estratos de Almendrillo se ha incluido, aunque con reservas debido a la falta de dataciones radiométricas, una unidad estratificada, con fuerte manteo al este que forma un lente tectónico entre las Fallas González y Totoral y cuya relación estratigráfica con el resto de la unidad es difícil de establecer.

2.2.14. Formación Estero Cenicero

Secuencia de hasta 400 m de espesor formada por una sucesión bien estratificada y subhorizontal de lavas máficas con intercalaciones de brechas volcánicas y areniscas volcano-detríticas que aflora entre el río Carén, por el sur y el estero Cenicero, por el norte. Esta unidad se apoya en discordancia angular sobre la Formación Salamanca y los Estratos de Almendrillo y está intruida por plutones del Eoceno medio. Se constituye principalmente por coladas vesiculares y/o macizas de no más de 5 m de potencia, porfídicas y/o afaníticas, de andesitas basálticas y andesitas básicas de olivino y piroxeno, lavas andesíticas traquíticas e intercalaciones de dacitas y volcarenitas y brechas andesíticas que presentan una alteración moderada a intensa a epidota, clorita, carbonatos, cuarzo, magnetita y actinolita. La datación U-Pb de una colada, proveniente del valle del río Tres Quebradas indicó una edad $63,6 \pm 1,4 / -1,0$ Ma (Paleoceno inferior), consistente con sus relaciones estratigráficas.

2.2.15. Estratos de Río Chicharra

Secuencia volcánica de varios cientos de metros de espesor, dispuesta en discordancia angular sobre los Estratos de Almendrillo en la zona de los ríos González, Totoral y Chicharra donde está intruida por granitoides del Mioceno inferior (Plutón Totoral). Sus afloramientos, que hacia el sur guardan continuidad con series volcánicas atribuidas a la Formación Abanico (Aguirre, 1960; Rivano, 1996; Jara y Charrrier, 2014) están limitados, hacia el este, por las trazas de las fallas González y Totoral. Litológicamente incluye desde basaltos a andesitas porfídicas de orto y clinopiroxeno (\pm biotita) en parte amigdaloidales, con intercalaciones de niveles autobrechosos y sills microdioríticos de piroxeno y pórfidos andesítico-basálticos de piroxeno y olivino. Las lavas se presentan, generalmente, alteradas a clorita, epidota y carbonatos (\pm zeolitas). Los afloramientos más orientales de la unidad incluyen en las nacientes del río Chicharra, un característico nivel de tobas líticas andesíticas escoriáceas de color pardo rojizo. Dos dataciones U-Pb en circones de muestras recolectadas en el valle del río Chicharra indicaron edades de $24,9 \pm 0,5$ y $22,2 \pm 0,4$ Ma.

2.2.16. “Formación” Los Pelambres

Unidad definida originalmente por Rivano y Sepúlveda (1991), quienes emplearon este nombre para referirse a una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias intensamente deformadas que afloran tanto en el Estero Pelambres como en el valle del río Totoral, en donde incluye niveles calcáreos. Esta última característica los llevó a correlacionarlas con unidades volcano-sedimentarias neocomianas tales como la Formación Juncal, aflorante en la vertiente argentina de la región de Aconcagua-La Ramada (Cristallini y Ramos, 1996, 2000). Sin embargo, Mpodozis (2015) indica que esta formación sin base ni techo conocidos corresponde en realidad a una unidad tectónica que forma parte de una estrecha banda de rumbo NNW, de no más de 3 km de ancho, constituida por estratos muy deformados, limitados al oeste y este por las Fallas Totoral y Los Pelambres, las cuales las ponen en contacto con rocas mucho menos deformadas tanto al oriente (Formación Pachón) como al poniente (Estratos de Almendrillo). Entre ambas fallas, las rocas de la “Formación” Los Pelambres presentan manteos muy elevados, generalmente hacia el oeste y están plegadas de manera compleja, incluyendo pliegues sub-isoclinales y láminas internas de

corrimiento que definen una zona de cizalle de alto strain que probablemente correspondería a una zona de sutura ente los bloques rígidos de la Cordillera de la Costa y la Cordillera Frontal. Litológicamente la unidad es variada, incluyendo andesitas basálticas de olivino y piroxeno, lavas andesíticas y traquílicas de piroxeno, brechas volcanoclásticas, tobas daciandesíticas a riolíticas soldadas, sills andesíticos a riolíticos, volcarenitas y niveles de calizas lacustres con ostrácodos. Generalmente las rocas están alteradas (clorita, epidota, calcita, \pm cuarzo, \pm albita) y en algunos sectores transformadas a hornfels de biotita y magnetita. Dataciones U-Pb en circones indican, en general, edades comprendidas entre el Oligoceno inferior y el Mioceno inferior. Aun así, una edad U-Pb en circones detríticos de una muestra proveniente del Estero Las Hualtatas, al oeste de Los Pelambres, que muestran un peak muy bien definido del Paleoceno ($60,5 \pm 1,2$ Ma) deja abierta la posibilidad de que la “Formación” Los Pelambres incluya componentes detríticos derivados de la erosión de la Formación Estero Cenicero o bien, que rocas de esta última hayan sido incorporadas como lentes tectónicas dentro la zona deformada.

2.2.17. Formación Pachón

Secuencia volcánica cuyo nombre fue propuesto originalmente por Lencinas y Tonel (1993), que forma una faja continua de rumbo NNW de 5 a 10 km de ancho, limitada por el oeste por la traza de la Falla Pelambres. Los afloramientos en la zona norte, entre los ríos Piuquenes y Carnicería, están en contacto hacia el este con los intrusivos pérmicos del Batolito Pico Los Sapos y la Formación Rancho de Lata, a través de una falla normal de alto ángulo inclinada al oeste (Falla Pachón). Entre los ríos Carnicería y Mondaca, la Formación Pachón cubre en discordancia angular a las formaciones La Manga y Tordillo y más al sur aparece en contacto por falla inversa vergente al este (Falla Mondaquita) sobre los Estratos de Mondaca y la Secuencia de Laguna del Pelado. La Formación Pachón está constituida por una alternancia de delgadas coladas de lavas básicas y, en menor proporción intercalaciones de niveles tobáceos, junto a areniscas y conglomerados rojos, los cuales forman un nivel continuo en la base expuesta de la secuencia entre los ríos Totoral y Teatinos. Las lavas corresponden principalmente a andesitas basálticas de olivino y piroxeno amigdaloidales, afaníticas y porfídicas, generalmente alteradas a clorita, epidota, calcita y zeolitas que también forman parte del relleno de las amígdalas. Las intercalaciones tobáceas, de

característico color blanquecino incluyen tobas riolíticas cristalopumíceas, soldadas con cuarzo, sanidina y biotita. Al norte del río La Pantanosa, la formación incluye un domo ácido (Domo El Altar) cuyas facies intrusivas corresponden a pórfidos riolíticos de biotita, al cual se asocian lavas domo, tobas y brechas piroclásticas riolíticas, pumíceas con cuarzo, sanidina y biotita. Éstas forman un nivel lenticular intercalado en las andesitas basálticas que constituyen la mayor parte de la formación. La datación más antigua disponible corresponde a una edad U-Pb de $24,02 \pm 0,56$ Ma obtenida por Bertens *et al.* (2003, 2006), en Argentina, al norte del río Carnicería. En las cercanías del yacimiento Los Pelambres, numerosas edades U-Pb reportadas por Perelló *et al.* (2012) se disponen entre los $22,7 \pm 0,2$ y $21,36 \pm 0,8$.

2.2.18. Estratos de Mondaca

Secuencia de más de 200 m de espesor que aflora al oeste del río Santa Cruz, entre el Paso de las Ojotas y el río de la Pantanosa, y al sur de la Laguna del Pelado, al este del río Teatinos. Sobreyace en discordancia angular a las formaciones Tordillo y Diamante y está cubierta, en leve discordancia angular por la Secuencia Volcánica de Laguna del Pelado. Incluye dos niveles estratigráficos: El nivel basal comprende un nivel de conglomerados rojos gruesos, areniscas y brechas con clastos volcánicos, atribuidos anteriormente a la “Formación Cristo Redentor” por Álvarez (2006) y Guitart (2007) quienes le asignaron una edad cretácica. El nivel superior está formado por una alternancia de tobas, brechas piroclásticas y aglomerados volcánicos incluyendo depósitos de tipo *block and ash* con clastos que pueden alcanzar más de 1 m de diámetro. La petrografía de esta formación varía desde andesitas brechosas de dos piroxenos hasta tobas riolíticas cristalopumíceas con cuarzo, sanidina y biotita, aunque las facies dominantes corresponden a daciandesitas y dacitas de oxihorblenda. Dos dataciones U-Pb en circones para muestras recolectadas en la zona del río Santa Cruz indicaron valores concordantes de $21,6 \pm 0,4$ y $22,1 \pm 0,4$ Ma, más jóvenes que una edad K-Ar en biotita de $25,2 \pm 0,4$ Ma reportada, para tobas recolectadas en el valle del río Carnicería por Munizaga y Vicente (1982). Otra datación U-Pb en circones de las tobas expuestas al sur de Laguna del Pelado indicó una edad de $21,3 \pm 0,4/-0,3$ Ma, consistente con las anteriores.

2.2.19. Secuencia Volcánica Laguna del Pelado

Serie volcánica de más de 500 m de espesor que aflora en la zona de Laguna del Pelado y que fue anteriormente atribuida a la “Formación Farellones” por Munizaga y Vicente (1982), Rivano y Sepúlveda (1991) y Guitart (2007). Está constituida por estratos suavemente inclinados al oeste que se apoyan en discordancia angular sobre los conglomerados y tobas de los Estratos de Mondaca. Al sur de Laguna del Pelado está intruida por pórfidos del Mioceno superior. La secuencia volcánica está constituida por gruesos niveles de aglomerados volcánicos y coladas cuya litología corresponde, principalmente a daciandesitas de oxihornblenda y dos piroxenos, con algunas variedades de andesitas basálticas con olivino, piroxeno y hornblenda. Al norte de Laguna del Pelado se obtuvieron dos edades U-Pb en circones de $18,3 \pm 0,4$ y $18,4 \pm 0,4$ Ma. Éstas son ligeramente más antiguas que la edad K-Ar (roca total) de $17,0 \pm 2$ Ma reportada por Munizaga y Vicente (1982) para un nivel de tobas muestreado, al este de Laguna del Pelado, en las cercanías del Paso de las Ojotas.

2.2.20. Complejo Volcánico El Yunque

Centro volcánico erosionado cuyos productos se disponen en forma discordante, sobre los Estratos de Mondaca por el norte y la Secuencia Volcánica Laguna del Pelado, por el sur. El sistema incluye una sucesión volcánica y piroclástica cuya parte inferior presenta discordancias internas y pliegues sindeposicionales de origen tectónico o gravitacional y comprende hasta 700 m de tobas de lapilli, tobas líticas pumíceas, riolíticas, brechas volcánicas, tobas de cristales e intercalaciones de coladas andesíticas. La parte superior de varios cientos de metros de potencia está constituida por depósitos piroclásticos proximales y gruesas coladas andesíticas y dacíticas. Las rocas volcánicas se hallan intruidas por un grupo de intrusivos hipabisales y domos, asociados a una extensa zona de alteración hidrotermal que forman el núcleo del complejo y presentan foliación subvertical paralela a sus contactos. Su composición varía desde andesitas a dacitas de hornblenda y biotita, en algunos casos con ojos de cuarzo. Están cortados por un enjambre de diques porfídicos elongados en dirección NE-SW portadores de la mineralización cuprífera del Prospecto El Yunque, de composición granodiorítica, diorítica cuarcífera y dacítica, con anfíbola y biotita. La datación U-

Pb en circones de una muestra de tobas de lapilli del nivel inferior indicó una edad de $14,9 \pm 0,3$ Ma, similar a la de uno de los domos dacíticos, ($15,0 \pm 0,3$ Ma). Dataciones U-Pb para los pórfidos asociados a la mineralización indican edades de $14,3 \pm 0,2$ y $14,6 \pm 0,3$ Ma (pórfidos tempranos a intraminerales) y $14,5 \pm 0,2$, $14,3 \pm 0,2$ y $14,0 \pm 0,2$ Ma (pórfidos tardimerales). Biotita hidrotermal de un pórfido diorítico alterado indicó una edad Ar/Ar de $14,85 \pm 0,07$ Ma. Seis dataciones Re/Os en molibdenita indican que la mineralización ocurrió entre los $14,79 \pm 0,06$ y $14,18 \pm 0,06$ Ma.

2.2.21. Depósitos Cuaternarios

Corresponden a depósitos no consolidados provenientes de la meteorización de las rocas existentes. Sus orígenes son variados, existiendo dentro del yacimiento depósitos de terrazas fluviales y por remoción en masa, así como también casquetes de hielo, glaciares de roca, depósitos morrénicos, sedimentos aluviales, coluvios y escombros de falda. Su espesor no supera los 50 metros y se encuentran sobre las demás unidades.

2.3. ROCAS INTRUSIVAS

2.3.1. Batolito Pico Los Sapos

Extenso complejo plutónico que se extiende a lo largo de una faja NS de 40 km de largo y hasta 5 km de ancho entre la quebrada Piuquenes al norte, hasta el río Mondaca por el sur. Descrito por primera vez por Mpodozis *et al.* (1976), comprende intrusivos leucocráticos que intruyen a las lutitas y grauvacas neopaleozoicas y las riolitas del Grupo Choiyoi. Hacia el este está en contacto por falla inversa (Falla Mondaca) sobre los Estratos de Mondaca (Mioceno inferior). En su flanco occidental está cubierto en discordancia por rocas piroclásticas y sedimentarias de la Formación Rancho de Lata. Está constituido, fundamentalmente, por granodioritas a tonalitas de hornblenda y biotita de grano medio a grueso y algunas fases monzograníticas. Incluye además stocks discretos de granitos gráficos y pórfidos riolíticos rosados. La datación U-Pb en circones de una muestra tomada de tonalitas recolectada en la ladera norte del estero Pachón indicó una edad de $280,2 \pm 5,7$

Ma, mientras que en otra proveniente de la zona de confluencia entre los ríos Salinas y Piuquenes se obtuvo una edad de $297,3 \pm 4,4 / -4,4$ Ma, ambas del Pérmico inferior. Musso *et al.* (2012) reporta una edad ligeramente más antigua ($301,4 \pm 2,3$ Ma, Pennsylvaniano tardío) para granitos que afloran en la zona del río La Pantanosa, al este de El Altar.

2.3.2. Granitoides del Campaniano-Maastrichtiano

Grupo de plutones de mediano tamaño que intruyen a la Formación Salamanca y a las formaciones Pucalume y Viñita. Sus edades U-Pb son similares a las obtenidas en los Estratos de Almendrillo. Destacan en este grupo los plutones Manque y Quelén, los que afloran junto a otros, tales como los plutones Río Tascadero, Carén y un intrusivo de menor tamaño expuesto en la Quebrada Pirquenes. Presentan un amplio rango de composición (dioritas a granitos) siendo de común ocurrencia, la presencia de piroxeno. Sus facies varían desde dioritas de piroxeno, monzodioritas cuarcíferas de dos piroxenos, monzogranitos gráficas y dioritas de piroxeno y biotita, hasta dioritas de piroxeno y granodioritas de piroxeno y biotita. Las rocas más evolucionadas corresponden a las del plutón Río Tascadero formado por granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.

2.3.3. Pórfido Riolítico Los Pelambres

Corresponde a rocas intensamente recristalizadas y deformadas que forman un pequeño afloramiento, inmediatamente al sur del *open pit* de la mina Los Pelambres. Están cubiertas en discordancia por la “Formación” Los Pelambres y hacia el este, se encuentra en contacto por falla (Falla Los Pelambres) sobre estratos de la Formación Pachón. Presentan fenocristales de plagioclasa en cúmulos (4-5 mm) recristalizados y argilizados con sobreposición de biotita y algunos pequeños ojos de cuarzo (0,5 mm). Las fases intersticiales cuarzo-feldespáticas presentan texturas mirmequíticas y micrográfica, y bandas oscuras de biotita-epidota. Una datación U-Pb en circones indicó un valor de $70,1 \pm 1,5$ Ma. Otra datación obtenida, anteriormente por Bertens (inédito) indicó un valor de $72,12 \pm 0,41$ Ma.

2.3.4. Plutones Zapallar y Manque Bajo

Granitoides que intruyen a la Formación Salamanca en la zona occidental de la región. El plutón Zapallar es un intrusivo de grano medio a grueso, con inclusiones microdioríticas, formado por monzogranitos de biotita y hornblenda (edad U-Pb en circones: $67,7 \pm 1,8$ Ma, concordante con una edad K-Ar (biotita) de $67,0 \pm 1,6$ Ma reportada por Rivano y Sepúlveda, 1991), el núcleo de este plutón está afectado en el valle de Chalinga por una zona de intensa alteración hidrotermal cuarzo-sericítica, con turmalina. El Plutón Manque Bajo por otra parte, está compuesto por monzodioritas cuarcíferas con piroxeno, reemplazado por anfíbola uralítica, y biotita que incluye facies aplíticas.

2.3.5. Plutón Cuncumén

Cuerpo intrusivo de gran volumen y forma triangular descrito por Rivano y Sepúlveda (1991) como “Plutón Chillepín-Cuncumén” que aflora en las partes bajas de las laderas de los valles de los ríos Choapa, Cuncumén, Totoral y del Valle, al este de Tranquilla, donde intruye a rocas volcánicas de la Formación Salamanca y hacia el este, a los Estratos de Almendrillo. Gran parte de sus afloramientos se encuentran limitados por el este por la traza NS de la Falla Pocuro, lugar donde las rocas están muy fracturadas, alteradas (argilizadas) e intruidas por enjambres de diques de composición muy variable. El plutón está formado por rocas leucocráticas de grano medio a grueso, en parte con inclusiones microdioríticas, cuya composición varía desde monzodioritas cuarcíferas hasta dioritas cuarcíferas y granodioritas, con orto y clinopiroxeno, alterados y reemplazados localmente por anfíbola uralítica, hornblenda y biotita. Cuatro dataciones U-Pb en circones indican valores de $60 \pm 0,9$; $59,4 \pm 1,0$ /-1,2; $59,33 \pm 0,9$ y $58,1 \pm 1,2$ Ma. Estas son más antiguas que la edad K-Ar (biotita) de $53,6 \pm 1,4$ Ma obtenida por Rivano y Sepúlveda (1991) en las cercanías de Batuco.

2.3.6. Plutón Cerro Ossandón

Intrusivo de forma aproximadamente rectangular, que intruye a la Formación Salamanca al oeste de Almendrillo y que en su borde oriental se asocia a una extensa zona de alteración hidrotermal

argílica. Está formado por rocas leucocráticas de grano medio (tonalitas-granodioritas) en las cuales se obtuvo una edad U-Pb en circones de $48,2 \pm 1,1$ Ma.

2.3.7. Plutón El Encanto

Pequeño stock que intruye a la Formación Estero Cenicero y que está en contacto por falla hacia el este (Falla Tres Quebradas) con rocas volcánicas atribuidas a la Formación Viñita. Rodeado por una zona de alteración hidrotermal, el intrusivo está compuesto por rocas leucocráticas de grano medio a grueso, principalmente granodioritas a monzonitas cuarcíferas de hornblenda y biotita. Una datación U-Pb en circones indicó una edad de $43,1 + 1,2 / - 0,8$ Ma.

2.3.8. Plutón Fredes e intrusivos asociados

Conjunto formado por tres intrusivos que afloran en el extremo norte de la región. El grupo está dominado por un gran cuerpo de dimensiones batolíticas (Plutón Fredes de Rivano y Sepúlveda, 1991) cuyos afloramientos se extienden desde el valle de Tres Quebradas hasta la zona de Tuluahuén, en el valle de Limarí y un cuerpo satélite del anterior (Plutón Tres Quebradas) expuesto en el valle homónimo. Ambos cuerpos intruyen a los Estratos de Almendrillo y a la Formación Salamanca. Un pequeño stock de la misma edad (Plutón del Medio) intruye, más al este, en el cordón fronterizo con Argentina, a las formaciones cretácicas Pucalume y Viñita, y desarrolla una extensa aureola de metamorfismo de contacto. Los dos plutones mayores están formados por granodioritas a tonalitas de hornblenda y biotita de grano medio a grueso con núcleos relictos de piroxeno en los cristales de anfíbola. El Plutón del Medio, está constituido, en cambio, por tonalitas de hornblenda y biotita, sin piroxeno, de grano medio a fino, con plagioclasas zonadas con inclusiones de hornblenda y magnetita. Una datación U-Pb en circones de una muestra del extremo sur del Plutón Fredes recolectada en el valle del río Tres Quebradas indicó una edad de $35,5 + 0,6 / - 0,7$ Ma. Ésta es concordante con la edad U-Pb obtenida para una muestra del Plutón del Medio ($34,1 + 0,9 / - 0,9$ Ma). Ambas son más jóvenes que una edad K-Ar en biotita ($38,4 \pm 0,5$ Ma) reportada por Rivano y Sepúlveda (1991) para el Plutón Tres Quebradas.

2.3.9. Plutones Leiva, Totoral y Río Negro

Conjunto de tres cuerpos intrusivos, dos de ellos afloran en el extremo sur de la región; el Plutón Leiva (edad K-Ar biotita, $17,2 \pm 0,8$ Ma, Rivano, 1996) y el Plutón Totoral (U-Pb, $18,5 \pm 0,4$ Ma), expuesto en el cañón del río homónimo, donde intruye a los Estratos de Almendrillo y a los Estratos de Río Chicharra, constituido por monzogranitos de piroxeno y hornblenda y biotita. El último cuerpo aflora en el extremo norte, donde intruye a areniscas y lutitas rojas de la Formación Pucalume y forma un cuerpo de dimensiones batolíticas. Éste alcanza gran desarrollo al norte de El Altar, en Argentina, donde intruye a los afloramientos más septentrionales de la Formación Pachón. Está formado por granodioritas y dioritas de hornblenda y biotita, con núcleos relictos de piroxeno y turmalina intersticial. Una datación U-Pb en las nacientes del río Negro indicó una edad de $18,7 + 0,3 / - 0,3$ Ma, mientras otra muestra, de una diorita recolectada al este de la mina de lapislázuli Flor de los Andes indicó un valor de $21,5 + 0,5 / - 0,3$ Ma. En el borde occidental del plutón, (en las nacientes del Río Tascadero) el borde del intrusivo incluye un conjunto de intrusivos hipabisales y diques andesíticos, con los cuales está, probablemente genéticamente relacionados.

2.3.10. Complejo Intrusivo Chalinga

Cuerpo intrusivo multiplutónico de forma tabular y eje mayor orientado en sentido NNW, de 30 km de largo y hasta 5 km de ancho que aflora entre las nacientes del río Tres Quebradas, por el norte, hasta el Estero Los Pelambres, por el sur. Intruye a rocas volcánicas del Cretácico (Formación Salamanca), Paleoceno (Formación Estero Cenicero) y Oligoceno-Mioceno inferior (“Formación” Los Pelambres). El complejo, precursor de los intrusivos asociados a la mineralización en el yacimiento Los Pelambres, comprende más de quince plutones individuales, con edades U-Pb comprendidas entre los 23 y 14 Ma, cuya composición varía desde gabros hasta monzogranitos. Éstos derivan de tres pulsos discretos de magmatismo ocurridos en el Mioceno inferior y medio (23-20 Ma, 18 Ma y 16 Ma). Los plutones mas antiguos están cortados por las trazas de falla Totoral, mientras que los más jóvenes se emplazaron con posterioridad a la última fase de movimiento observada en las fallas Tres Quebradas y La Pantanosa.

2.3.11. Pórfidos dioríticos de Tres Quebradas

Pequeños afloramientos que intruyen a la formación Pucalume y Viñita a lo largo del cordón limítrofe, tanto en Chile como en Argentina en las nacientes del río Tres Quebradas. Uno de estos está emplazado directamente sobre la traza de la falla Tres Quebradas. Están formados por rocas máficas, principalmente pórfidos dioríticos y dioritas de dos piroxenos, de grano fino a medio. Aunque no se cuente con antecedentes cronológicos directos, sus relaciones de campo permiten sugerir una probable edad miocena.

2.3.12. Intrusivos hipabisales de Río Santa Cruz

Conjunto de intrusivos epizonales a subvolcánicos, de pequeño volumen, que incluye numerosos stocks, sills y diques de dioritas porfídicas y pórfidos dacíticos de hornblenda y biotita de grano grueso, que forman una faja orientada aproximadamente en dirección NNW-SSE de 40 km de largo, emplazada tanto en el basamento paleozoico como en las secuencias sedimentarias mesozoicas y volcánicas miocenas. Dos dataciones U-Pb en circones indicaron edades de $15,4 \pm 0,4$ Ma.

2.3.13. Stock Pelambres

Intrusivo de 4,5 x 2,5 km de largo elongado en dirección NS, emplazado al este del Complejo Intrusivo Chalinga sobre la traza de la Falla Los Pelambres, que pone en contacto a la Formación Pachón, al este, con la “Formación” Los Pelambres y pórfidos riolíticos cretácicos, al oeste. Este intrusivo forma la mayor parte de la roca huésped de los pórfidos mineralizados del yacimiento Los Pelambres y está constituido por dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita, rocas leucocráticas de grano fino a medio y textura variable desde equigranular a porfídica en las cuales el cuarzo y feldespato potásico aparecen en forma intersticial. Las facies porfídicas presentan masa fundamental aplítica. Dos dataciones U-Pb en circones reportadas por Perelló *et al.* (2012), indican valores de $13,60 \pm 0,30$ y $13,0 \pm 0,70$ Ma, consistentes con las edades (U-Pb, en circón) de

13,92±0,15 a 12,51±0,17 Ma, publicadas con anterioridad por Bertens *et al.* (2003, 2006). Las edades U-Pb disponibles para el stock Pelambres son similares a las obtenidas en el pórfido cuprífero Primavera de Cuncumén (río González) donde el análisis de tres muestras de pórfidos granodioríticos recolectadas de sondajes indicó edades U-Pb comprendidas entre 13,72±0,23 y 13,39±0,21 Ma. Estas son ligeramente más antiguas que dos edades Re-Os en molibdenita de 13,2±0,1 Ma provenientes de venillas que, en los intrusivos, están asociadas a la mineralización cuprífera.

2.3.14. Pórfidos mineralizados de Primavera de Cuncumén

Complejo intrusivo hipabisal de pequeño volumen, aflorante en las nacientes del río González (Vega Redonda) emplazado en los Estratos de Almendrillo y “Formación” Los Pelambres, cerca de la traza de la Falla González, y asociado a una aureola de rocas córneas con desarrollo de skarn granatíferos en niveles sedimentarios carbonatados. Presenta mineralización tipo pórfido cuprífero. En superficie afloran principalmente granodioritas porfídicas y dioritas, mientras que en sondajes se reconocen facies de pórfidos granodioríticos y dacíticos de hornblenda y biotita, con anhidrita. Dataciones U-Pb indicaron edades de 13,72±0,23 (granodiorita de hornblenda), 13,40±0,14 Ma (pórfido daci-andesítico de hornblenda y biotita) y 13,39 ± 0,21 Ma (pórfido dacítico de hornblenda y biotita, con anhidrita tardimagmática). Dataciones Ar/Ar en sericita hidrotermal indicaron valores de 13,49 ±0,6 Ma y 14,03±0,11 Ma. Dos edades, idénticas, de Re-Os en molibdenita (13,2±0,1 Ma) señalan la edad de mineralización. Estas edades, similares a las del Stock Pelambres (estéril), son, sin embargo, más antiguas a las del evento principal de mineralización de Los Pelambres.

2.3.15. Pórfidos Cerro Bayo del Cobre

Conjunto de stocks de mediano volumen, diques y sills que intruyen al Complejo Volcánico Laguna del Pelado, Formación Pachón y Estratos de Mondada entre Laguna del Pelado y las nacientes del río Teatinos asociados, en algunos casos, a brechas magmáticas, tobas y zonas de alteración hidrotermal tales como las de Cerro Bayo del Cobre y Trinidad, en las nacientes del Río

Teatinos. Están formados por rocas porfídicas de grano medio a grueso, con grandes cristales de anfíbola y fenocristales de plagioclasa, hornblenda, biotita y pequeños cristales de cuarzo. Tres dataciones U-Pb en circones indican valores de $11,8\pm 0,3$; $10,73\pm 0,25$ y $10,02\pm 0,28$ Ma.

2.3.16. Pórfidos de Los Pelambres, El Pachón y El Altar-Piuquenes

Grupo formado por intrusivos hipabisales y diques afectados por alteración hidrotermal, portadores de la mineralización cuprífera en los yacimientos Los Pelambres, El Pachón, El Altar y Piuquenes. En Los Pelambres forman un clúster de pórfidos asociados a brechas magmáticas e hidrotermales emplazados dentro del Stock Pelambres y lavas andesíticas de la formación Pachón. Según Perelló *et al.* (2012), en Los Pelambres incluyen dos familias de intrusivos mineralizados: pórfidos dacíticos de hornblenda, biotita y cuarzo, y pórfidos andesíticos de biotita (\pm cuarzo) ambas acompañadas de diques microdioríticos tardíos. Análisis químicos indican un predominio de las composiciones dacíticas con altos contenidos de potasio. Quince edades U-Pb en circones, entre los $12,30\pm 0,30$ y $10,53\pm 0,14$ Ma, son concordantes con doce dataciones Re-Os en molibdenita comprendidas entre los $11,81\pm 0,06$ y $10,14\pm 0,04$ Ma (Perelló *et al.*, 2012). Estas edades son, sin embargo, más antiguas que edades Re-Os del yacimiento Pachón (9,16 y 8,43 Ma) reportadas por Bertens *et al.* (2006). Este grupo de intrusivos incluye también los pórfidos del yacimiento El Altar, emplazado dentro de rocas volcánicas ácidas de la Formación Pachón. Los pórfidos de El Altar, asociados a brechas magmáticas e hidrotermales, comprenden, según Maygadán (2011) al menos cinco fases cuya composición varía desde pórfidos dacíticos hasta pórfidos andesíticos. Rocas de esta última litología constituyen un intrusivo ubicado al NW de El Altar. Cuatro dataciones U-Pb, reportadas para El Altar por Maygadán (2011) están comprendidas entre los $11,75\pm 0,24$ y $10,35\pm 0,32$ Ma, concordantes con una nueva edad U-Pb de $10,7\pm 0,4$ Ma obtenida para los pórfidos de Piuquenes. La edad U-Pb más joven de esa zona, proviene de una brecha magmática tardía de El Altar ($8,9\pm 0,4$ Ma, Maygadán, 2011), similar a las edades Re-Os en molibdenita reportadas previamente para El Pachón por Bertens *et al.* (2006).

2.4. ESTRUCTURAS

A nivel regional, se observan tres grandes paneles estructurales limitados por sistemas de fallas inversas, de rumbo dominante norte-sur (Figura 2.01.). Estos paneles son: panel occidental, panel central y el panel oriental. El yacimiento Los Pelambres se encuentra en el panel central, en contacto con la falla homónima.

El Panel Occidental, está limitado por las fallas Pocuro al oeste y Hualtatas al este. Está compuesto por rocas volcánicas y volcanosedimentarias agrupadas en dos formaciones principales, la Formación Salamanca y la Formación Abanico, ambas intruídas por el Plutón Hualtatas. El Panel Central, está definido por las fallas Hualtatas al oeste y Los Pelambres al este, y se compone por las rocas de la Formación Los Pelambres, las que son intruídas por el complejo intrusivo de Los Pelambres y cuerpos menores de cuarzo-feldespato. Por último, el Panel Oriental se limita por las fallas Los Pelambres al oeste y El Fierro al este, ésta última ubicada en el sector argentino. Esta unidad estructural está compuesta principalmente por rocas de la Formación Abanico.

En cuanto a las fallas, todas son de tipo inverso de alto ángulo, que se interpretan como reactivaciones de fallas normales antiguas, que habrían controlado el desarrollo de cuencas cretácicas y terciarias. La Falla Pocuro posee un manteo de 50 a 60° hacia el este y alza rocas de las formaciones Abanico y Salamanca y del Plutón Fredes. Esta estructura se interpreta como existente en el momento del emplazamiento del Plutón Fredes, debido a que los intrusivos de esta unidad marcan su traza en superficie y subsuperficie. La Falla Hualtatas tiene un manteo entre 60 a 80° al oeste y alza rocas del Plutón Hualtatas (perteneciente al Complejo Intrusivo Chalinga) sobre unidades de la Formación Los Pelambres y Abanico. Por relaciones de contacto esta falla habría emplazado sintectónicamente al Plutón Hualtatas, ayudando a la actividad de la falla. Por otro lado, la Falla Los Pelambres mantea 50 a 60° al oeste y alza rocas de la Formación Abanico sobre Los Pelambres. Esta falla fue utilizada por el Pórfido Cuarzo-Feldespático (PQF, Capítulo Geología del Yacimiento (MLP)) durante su ascenso antes de seguir como filón en unidades sedimentarias. La relación entre la falla Los Pelambres y el pórfido homónimo, indican una estrecha relación genética entre ambos, en la que el sistema porfídico se interpreta como relleno y canalizado de la falla, en un ambiente de emplazamiento sintectónico.

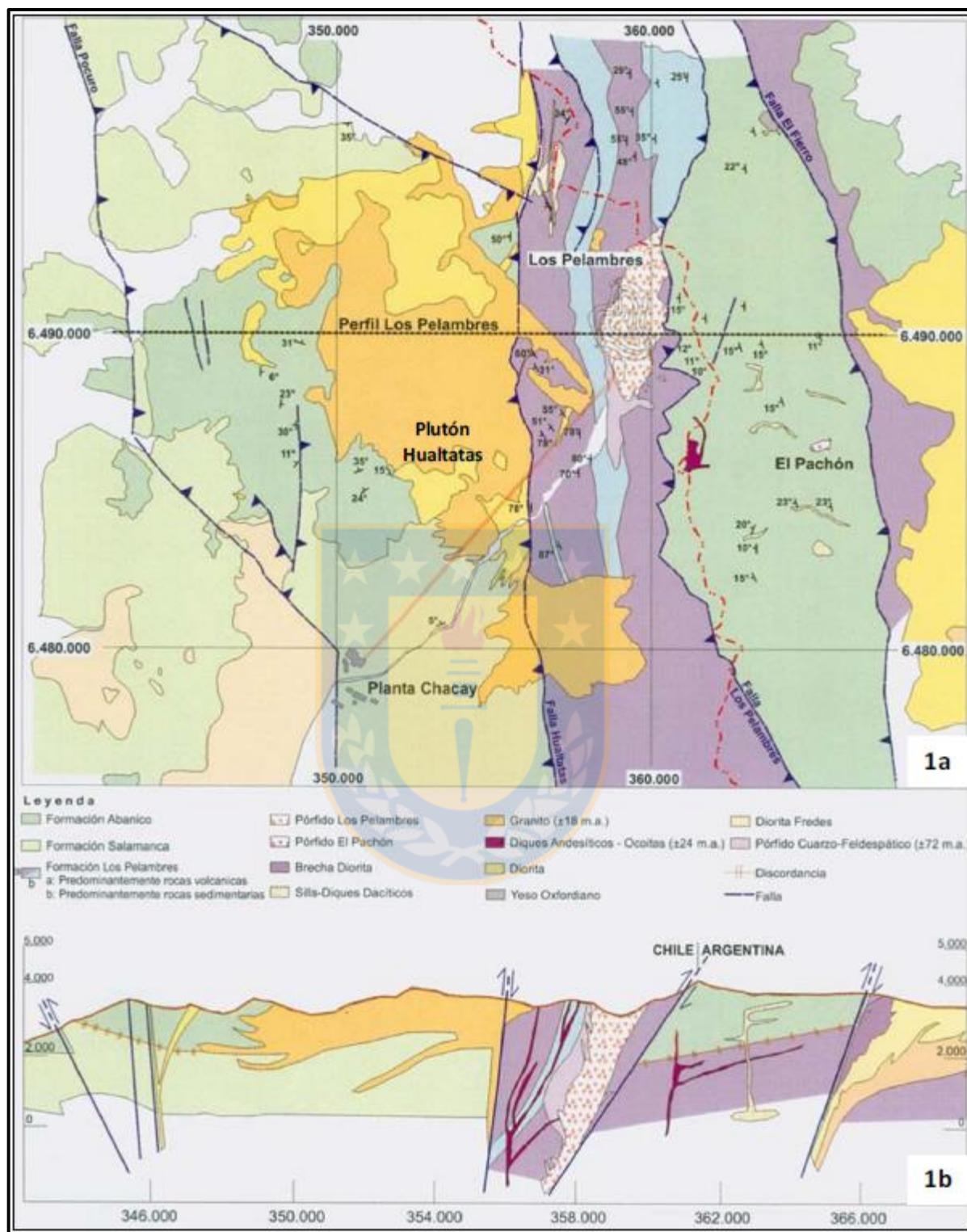


Figura 2.01. Geología Regional Los Pelambres. (1a) Mapa geológico. (1b) Perfil geológico (Modificado de Castelli, 2006 y Brockway, 2008)

3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO (MLP)

3.1 GENERALIDADES

El yacimiento Los Pelambres en general, muestra grandes similitudes con los esquemas típicos de pórfidos cupríferos en cuanto a alteración y mineralización. Pertenece a la franja metalogénica del Mioceno superior – Plioceno y se encuentra en el extremo norte de ésta, en los Andes Centrales, al interior de un extenso valle glacial inmediatamente al oeste del límite con la República Argentina, a altitudes que varían entre los 2.500 y 4.000 m s.n.m. A 3 km hacia el este de Los Pelambres, se encuentra el yacimiento El Pachón juntos forman el clúster de sistemas porfídicos de cobre y molibdeno con características geológicas similares (Camus, 2002).

3.2 LITOLOGÍA

En el Marco Geológico Regional se detalla la litología existente en la región aledaña al yacimiento Los Pelambres, con las formaciones sedimentarias y rocas intrusivas presentes. Aun así, en la mina se utiliza un modelo litológico propio (Figura 3.01.) proveniente de las principales unidades litológicas. Este modelo engloba parte de las formaciones y rocas intrusivas del marco geológico, sin embargo, son nombradas de acuerdo a su composición o textura, teniendo así una nomenclatura única que pueda ser ocupada por las diversas áreas de la mina y, además, ser reconocibles de manera más sencilla en terreno. Algunas de estas litologías se dividen de acuerdo al sector o bien, de acuerdo a su cronología.

- **Diorita Cuarcifera (DIQ):** Roca de textura fanerítica, inequigranular de grano medio, en ocasiones pobremente porfídica. En algunos sectores de la mina aparece una diorita de textura porfídica, a la que se le ha denominado Pórfido Diorita Cuarcifera (PDIQ).
- **Pórfido A (PA):** Intrusivo de composición andesítica, de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, biotitas y anfíbola reemplazadas por un agregado de biotita secundaria.

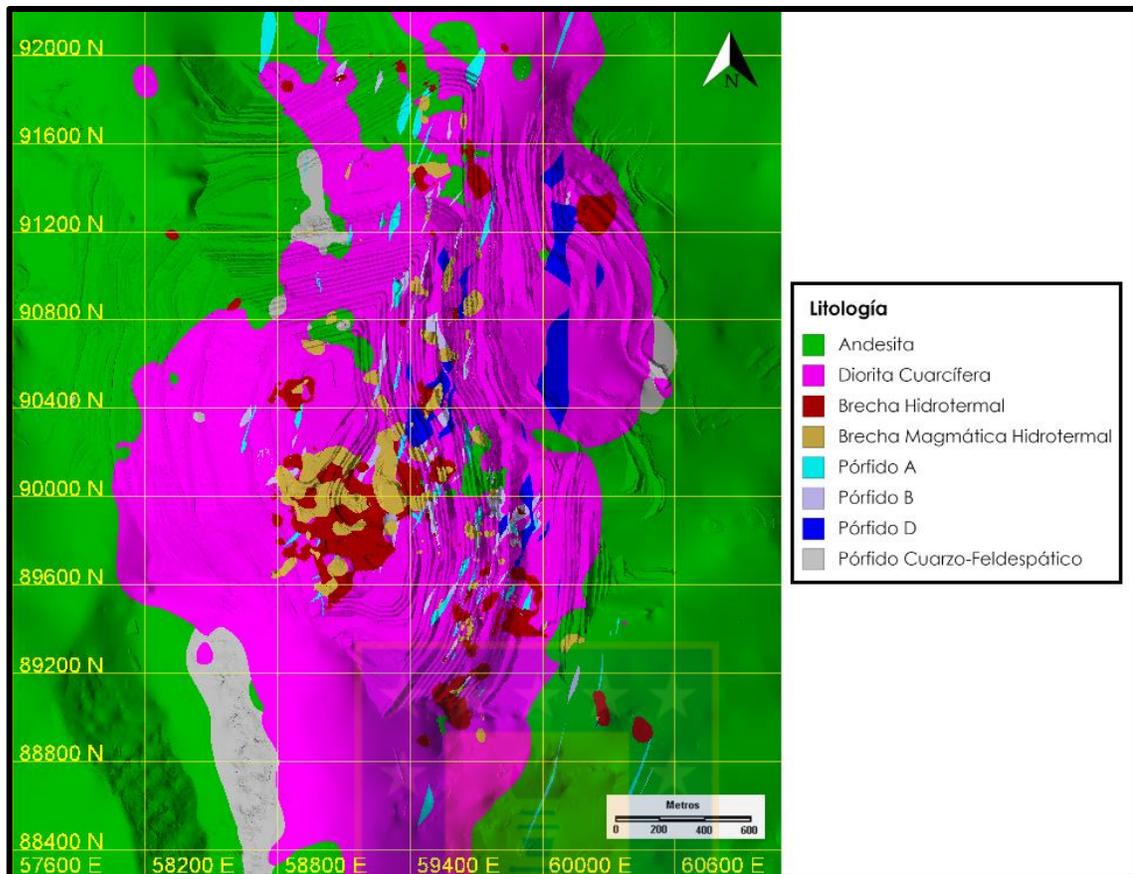


Figura 3.01. Modelo litológico de Minera Los Pelambres (sin Coluvio)

- **Pórfido B (PB):** Corresponde a un intrusivo de composición dacítica, de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, máficos y escasos ojos de cuarzo. La masa fundamental está constituida por un agregado microcristalino de cuarzo-feldespato y biotita secundaria.
- **Pórfido D (PD):** Corresponde a intrusivos tardíos de composición diorítica, microdiorítica y dacítica. Contiene un 70% de fenocristales, mayoritariamente de plagioclasa. La matriz contiene biotita, plagioclasa y anfíboles.
- **Pórfido Cuarzo-Feldespático (PQF):** Pórfido de carácter granítico. Presenta textura porfídica de grano medio, compuesto por fenocristales de plagioclasa y ojos de cuarzo que presentan ocasionales embahiamientos. En la mayoría de los casos, los máficos se encuentran totalmente alterados a sericita o sericita-clorita. Se diferencian dos cuerpos principales: PQF norte y PQF sur.

- **Brechas Hidrotermales (BH):** Brechas mayoritariamente clasto-soportadas y subordinadamente matriz-soportadas. Los clastos angulosos a subredondeados incluyen los tipos litológicos Diorita Cuarcifera, Pórfidos A, B y D y Andesitas. Las brechas están cementadas por turmalina, anhidrita y biotita.
- **Brecha Magmática Hidrotermal (BMH):** Roca compuesta por una matriz ígnea conformada principalmente por Pórfido A o B y clastos de roca encajante, además de restos de vetillas tipo T4, A y D. Los clastos líticos tienen bordes difusos, mientras que los clastos de vetillas muestran bordes angulosos.
- **Pegmatitas (PEG):** Agregados finos y gruesos de feldespatos. Se dispone principalmente en las zonas de contacto de PB y PA y son interpretadas como acumulaciones marginales de fluidos magmáticos. Su mineralogía está compuesta por cuarzo, feldespatos potásico, biotita, turmalina, anhidrita, bornita y calcopirita.
- **Andesita Pachón y Andesita Pelambres (AND):** Rocas de textura porfídica, compuestas por fenocristales de plagioclasa y fenocristales de biotita. La matriz tiene textura intergranular y está compuesta por microlitos de plagioclasa, escaso cuarzo intersticial y abundante biotita fina diseminada. Cronológicamente, han sido divididas en las unidades Andesita Pachón y Andesita Pelambres.
- **Coluvio (COL):** Depósitos matriz-soportados tipo grava con matriz de limos y arenas. La proporción de fracciones gruesas y finas es 20-80 respectivamente. El tamaño medio de partículas es de 0,5 – 1 cm, llegando a tamaños máximos de 5 cm. No se observa presencia de agua y el material presenta una buena compacidad.

3.3 ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN

3.3.1 Alteración

Como se mencionó anteriormente, el yacimiento tiene las características típicas de los sistemas de alteración hidrotermal presente en depósitos tipo pórfidos cupríferos. Las alteraciones muestran un patrón concéntrico, centrado en el stock diorítico. En el centro del yacimiento, se expone una zona de alteración potásico-silíceo rodeada por otra de tipo fílica en un halo de aproximadamente 500 m. Hacia los bordes aparece una zona de alteración propilítica subordinada a la roca caja del stock diorítico.

De acuerdo con el modelo de alteración del yacimiento (Figura 3.02.) la zona central, restringida al stock diorítico, corresponde a alteración potásica, siendo ésta la de mayor extensión y, además, la de mayor importancia económica dado que aloja casi toda la mineralización de cobre y molibdeno. Esta alteración está definida por la presencia de feldespato potásico junto con biotita hidrotermal. Localmente incluye parches de una masa aplítica formada por cuarzo, feldespato potásico, biotita, anhidrita y sulfuros. La mineralización asociada a esta zona consiste en calcopirita y bornita, con pirita en vetillas, molibdenita y esfalerita asociadas. Se observa zonación lateral de los minerales mencionados, en donde la bornita y calcopirita se encuentran al centro y la pirita hacia los bordes, aumentando progresivamente.

La zona de alteración fílica, está compuesta por cuarzo y sericita, con clorita, turmalina, epidota y yeso subordinados. Se encuentra en el sector NW de la mina y la mineralización asociada a esta alteración corresponde a pirita (en vetillas y diseminada), junto con calcopirita, molibdenita y magnetita.

En cuanto a la alteración propilítica, ésta se encuentra en la zona externa del rajo, afectando a las rocas volcánicas. Los minerales presentes corresponden a clorita, epidota y pirita subordinada, con trazas de calcita en amígdalas y vetillas.

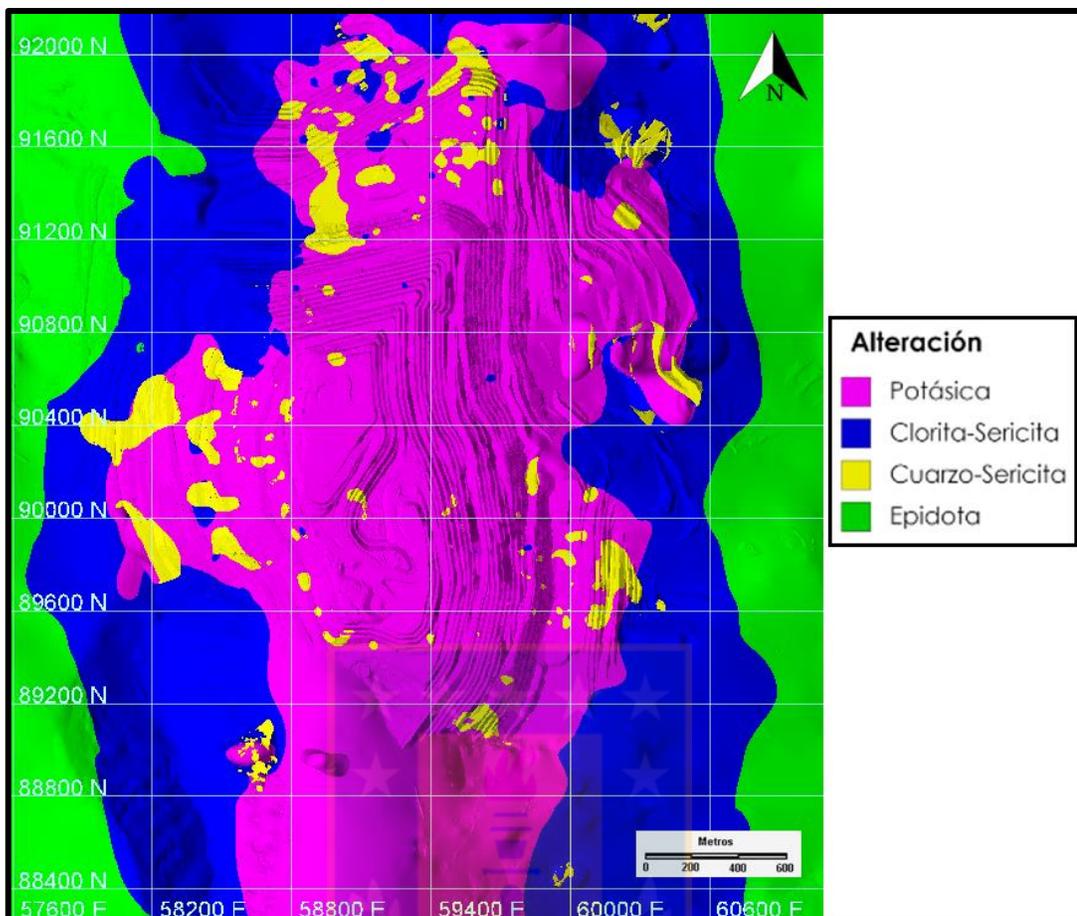


Figura 3.02. Modelo de alteración de Minera Los Pelambres

3.3.2. Mineralización

En Los Pelambres, el modelo de mineralización corresponde a las envolventes de los principales minerales presentes en el yacimiento, divididos en primarios: bornita, calcopirita y pirita, y secundarios: calcosina y covelina. Cada uno de estos minerales tiene una abundancia absoluta definida, que puede ser Alta ($>0,5\%$), Media ($0,1-0,5\%$) o Baja ($<0,1\%$).

- **Bornita:** Este mineral presenta sus mayores concentraciones en dos núcleos ubicados en la parte central y SE del yacimiento. El núcleo central tiene dimensiones de 1,1 km de largo por 0,8 km de ancho, mientras que el núcleo SE es de 0,9 km de largo por 0,5 km de ancho.

Concentraciones menores de bornita se distribuyen como envolventes a los núcleos de mayor concentración

- **Calcopirita:** Se distribuye en toda la Diorita Cuarcífera, formando una banda de orientación general NE, con dimensiones de 4 km de largo y 1,8 km de ancho. La zona de mayor concentración se ubica en la parte oeste de la Diorita Cuarcífera, formando una banda de orientación NS
- **Pirita:** Evento de mineralización primaria más tardío. Se distribuye ampliamente en todo el yacimiento, abarcando las rocas intrusivas y volcánicas. En estas últimas es donde se encuentra la mayor concentración, mientras que la zona de concentración media está asociada a la Diorita Cuarcífera.
- **Calcosina:** Mineral secundario generado a partir de la acción de aguas meteóricas, lo que genera que su concentración, tanto alta como media, se encuentre formando una franja de orientación NS que coincide con la ubicación de la Quebrada Pelambres.
- **Covelina:** Corresponde también a un mineral de enriquecimiento secundario, que se distribuye de igual forma que la calcosina, en una franja de orientación NS. Presenta un núcleo ubicado en el sector SE de la mina.

3.4 DOMINIOS ESTRUCTURALES

Desde 1999 se han definido distintos dominios estructurales en Los Pelambres, utilizando rasgos morfológicos, contactos litológicos y elementos estructurales mayores. El año 2015, se definieron cinco nuevos dominios estructurales. Para poder delimitar estos dominios se utilizaron seis elementos estructurales identificados en el yacimiento, los cuales son coherentes con el análisis estructural a escala regional.

Posterior a este estudio, durante diciembre del 2017 y febrero del 2018 se realizó una campaña de mapeo de terreno en el marco del proyecto de actualización del modelo estructural de MLP, desarrollado por la Superintendencia de Geotecnia. Durante esta campaña se realizaron 19 traversas de mapeo, con un total de 16 km lineales recorridos y 97 estaciones de trabajo. Dentro de las conclusiones de este estudio, se invalidaron límites de dominios estructurales que antes habían sido considerados, como lo son las quebradas NE, NW y Pelambres, debido a que no se observó en ellas elementos estructurales significativos.

Dentro de la misma actualización, fueron incorporadas zonas de foliación intensa, las cuales son importantes para establecer los eventos deformativos del yacimiento. Es gracias a esto, y considerando la presencia de foliación tanto en andesita como en el cuerpo intrusivo, que se puede suponer que el evento deformacional ocurre posterior o contemporáneamente con la intrusión del stock diorítico, afectando a ambos cuerpos de roca.

Al utilizar la información estructural superficial (discontinuidades intermedias y menores), se reconoce la presencia de un sistema estructural principal de dirección NE-SW. Este sistema afecta a todas las unidades litológicas y, por consiguiente, debiese ser posterior a la intrusión de la Diorita en el ambiente volcánico. Además, este sistema presenta pequeñas variaciones en su orientación promedio, asociadas al ambiente lito-mineral (Unidades Geotécnicas o UGT), pudiendo deberse a la respuesta variable de cada unidad ante esfuerzos regionales o locales.

De acuerdo con lo anterior, y utilizando la información estructural recopilada más el modelo geotécnico, se genera una base de datos de estructuras con UGT. A partir de la base de datos anterior se generan estereogramas por UGT (Figura 3.03.), definiendo *cluster* o familias con la densidad, variabilidad respectiva y espaciamiento.

A partir de la distribución estereográfica de las familias definidas por lo antecedentes de superficie, se generan estereogramas sintéticos, utilizando el promedio de la orientación de cada familia y la variabilidad de su similar de sondajes, equiparando la densidad de polos asociados a *cluster* para todas las fuentes. El estereograma final resulta de la integración de estos estereogramas.

Algo a tener en consideración es que las UGT 7, 8, 10 y 11 no presentación información suficiente para elaborar este tipo de análisis. Además, el análisis de la UGT-9 presenta variaciones relevantes, por lo que fue separada en 9N y 9S, asociado, quizás, a la presencia de sectores de brechas lixiviadas que aparecen aproximadamente al norte de la coordenada N90.000.

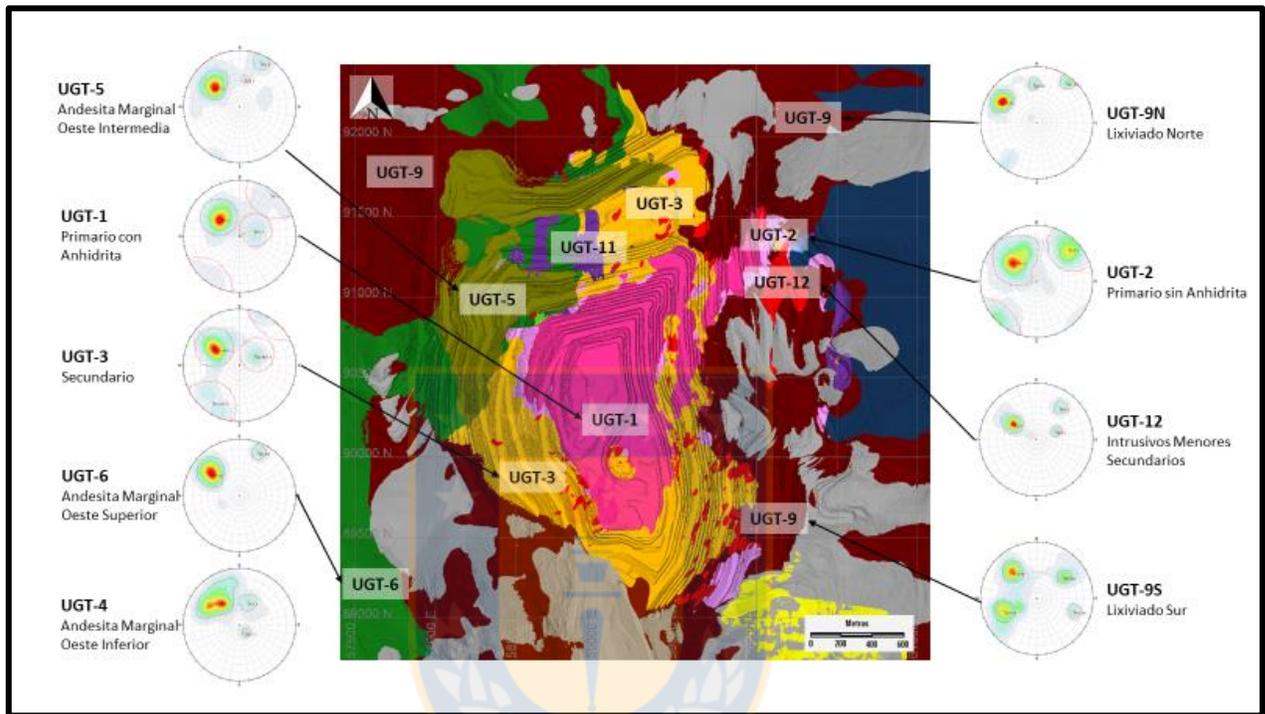


Figura 3.03. Estereogramas por Unidad Geotécnica

Del estudio anterior se pudo concluir que las quebradas NE, NW y Pelambres no evidencian estar asociadas a elementos estructurales significativos, por lo tanto, no se consideran límites de dominios estructurales válidos. Además, no se observa actualmente en el yacimiento fallas mayores que sean límites de dominios.

El sistema estructural principal reconocido corresponde a uno de dirección NE, que afecta a todas las unidades de lito-mineral. Este sistema, a nivel yacimiento, puede ser interpretado como un único ambiente estructural, que presenta variaciones asociadas a las distintas UGT. Por último, a nivel de taludes, la variabilidad del sistema principal para cada UGT se reconoce importante para la determinación de inestabilidades, por lo que cada unidad representaría un dominio estructural por separado.

4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL YACIMIENTO

4.1. GENERALIDADES

En Minera Los Pelambres, se han definido doce Unidades Geotécnicas (UGT) caracterizadas por sus respectivos índices de calidad de macizo rocoso RMR (Rock Mass Rating), GSI (Geologic Strength Index), RQD (Rock Quality Designation) y FF (Fracture Frequency). Los valores promedios, mínimos y máximos de los índices antes mencionados han sido determinados a partir del análisis estadístico de los datos. Como parte del modelo geotécnico se considera la presencia de materiales no consolidados (Coluvio) como una decimotercera unidad geotécnica.

4.2. UNIDADES GEOTÉCNICAS (UGT)

- **Primario Con Anhidrita (UGT-1):** Unidad compuesta principalmente por diorita con alteración potásica y stockwork de vetillas, correspondiendo a la zona de mineralización hipógena bajo el límite del techo de anhidrita. Presenta un RQD promedio de 99 y un RMR promedio de 82, caracterizando esta unidad como una zona de muy buena calidad geotécnica.
- **Primario Sin Anhidrita (UGT-2):** Al igual que la UGT-1, esta unidad está compuesta principalmente por diorita con alteración potásica y stockwork de vetillas, correspondiendo a la zona de mineralización hipógena, pero sobre el límite del techo de anhidrita. Presenta un RQD promedio de 82 y un RMR promedio de 69, caracterizando esta unidad como una zona de buena calidad geotécnica, con un mayor fracturamiento y menor resistencia que la UGT-1.
- **Secundario (UGT-3):** Esta unidad se compone litológicamente de diorita, brechas y pórfidos con alteración potásica y cuarzo-sericítica. Corresponde a una zona de mineralización supérgena, ubicada sobre el techo de anhidrita. Presenta un RQD promedio

de 79 y un RMR promedio de 61, caracterizando esta unidad como una zona de buena a regular calidad geotécnica.

- **Andesita Marginal Oeste Inferior (UGT-4):** Unidad compuesta litológicamente por rocas volcánicas, principalmente andesitas, con alteración potásica ubicadas en el sector oeste del rajo Los Pelambres bajo el límite del techo de anhidrita. Presenta un RQD promedio de 97 y un RMR promedio de 77, por lo que se caracteriza por ser una zona de buena calidad geotécnica.
- **Andesita Marginal Oeste Intermedia (UGT-5):** Esta unidad se compone litológicamente por rocas volcánico-sedimentarias con alteración propilítica ubicadas en el sector oeste del rajo Los Pelambres, sobre y bajo el techo de anhidrita. Se caracteriza por ser una zona de mala a regular calidad geotécnica, con un RQD promedio de 29 y un RMR promedio de 43.
- **Andesita Marginal Oeste Superior (UGT-6):** Se compone litológicamente por rocas volcánicas, principalmente andesitas, con alteración propilítica, ubicadas en el sector oeste del rajo Los Pelambres, sobre el límite del techo de anhidrita. Es una zona de regular calidad geotécnica con un RQD promedio de 55 y un RMR promedio de 54.
- **Andesita Marginal Este Inferior (UGT-7):** Unidad compuesta litológicamente por rocas volcánicas, principalmente andesitas, con alteración propilítica, ubicadas en el sector este del rajo Los Pelambres bajo el límite del techo de anhidrita. Presenta un RQD promedio de 100 y un RMR promedio de 82, caracterizando esta unidad como una zona de muy buena calidad geotécnica.
- **Andesita Marginal Este Superior (UGT-8):** Esta unidad está compuesta litológicamente por rocas volcánicas, principalmente andesitas, ubicadas al sector este del rajo Los Pelambres, sobre el límite del techo de anhidrita. Se presenta como una zona de regular calidad geotécnica, con un RQD promedio de 52 y un RMR promedio de 50.

- **Lixiviado (UGT-9):** Esta unidad incluye todas las litologías (andesitas, diorita, brechas y pórfidos) con alteración cuarzo-sericítica, presente en la zona superior de todo el rajo, bajo la zona de coluvio, correspondiendo al macizo rocoso afectado por procesos de lixiviación en el depósito. Su RQD promedio es de 77 y su RMR promedio es de 57, representando una zona de regular calidad geotécnica.
- **Lixiviado Sureste (UGT-10):** Corresponde a la zona lixiviada de andesitas con alteración cuarzo-sericítica, ubicada en el sector sureste del rajo, con un espesor promedio de 50 metros. Presenta un RQD promedio de 42 y un RMR promedio de 42, caracterizándose como una zona de mala a regular calidad geotécnica.
- **PQF Secundario (UGT-11):** Unidad compuesta por pórfidos cuarzo-feldespáticos con alteración potásica y cuarzo-sericítica, presentes sobre el límite del techo de anhidrita, distribuidos espacialmente en la zona norte del rajo. Tiene un RQD promedio de 78 y un RMR promedio de 64, por lo que corresponde a una zona de buena calidad geotécnica.
- **Intrusivos Menores Secundario (UGT-12):** Esta unidad corresponde a pórfidos de composición andesítica y dacítica, y brechas magmáticas y/o hidrotermales con alteración potásica y cuarzo-sericítica. Se encuentran ubicados en las paredes este, norte y sur del rajo, y en menor proporción en la pared Oeste. Es una zona de regular a buena calidad geotécnica, con un RQD promedio de 84 y un RMR promedio de 62.
- **Coluvio (UGT-13):** Se considera parte de esta unidad al material estéril correspondiente a sedimentos no consolidados que cubren gran parte de la superficie del área, con un espesor promedio de 50 metros.

La Figura 4.01. contiene el mapa de las Unidades Geotécnicas del yacimiento, mientras que la Figura 4.02. corresponde a un perfil esquemático donde se observan las distintas unidades en profundidad.

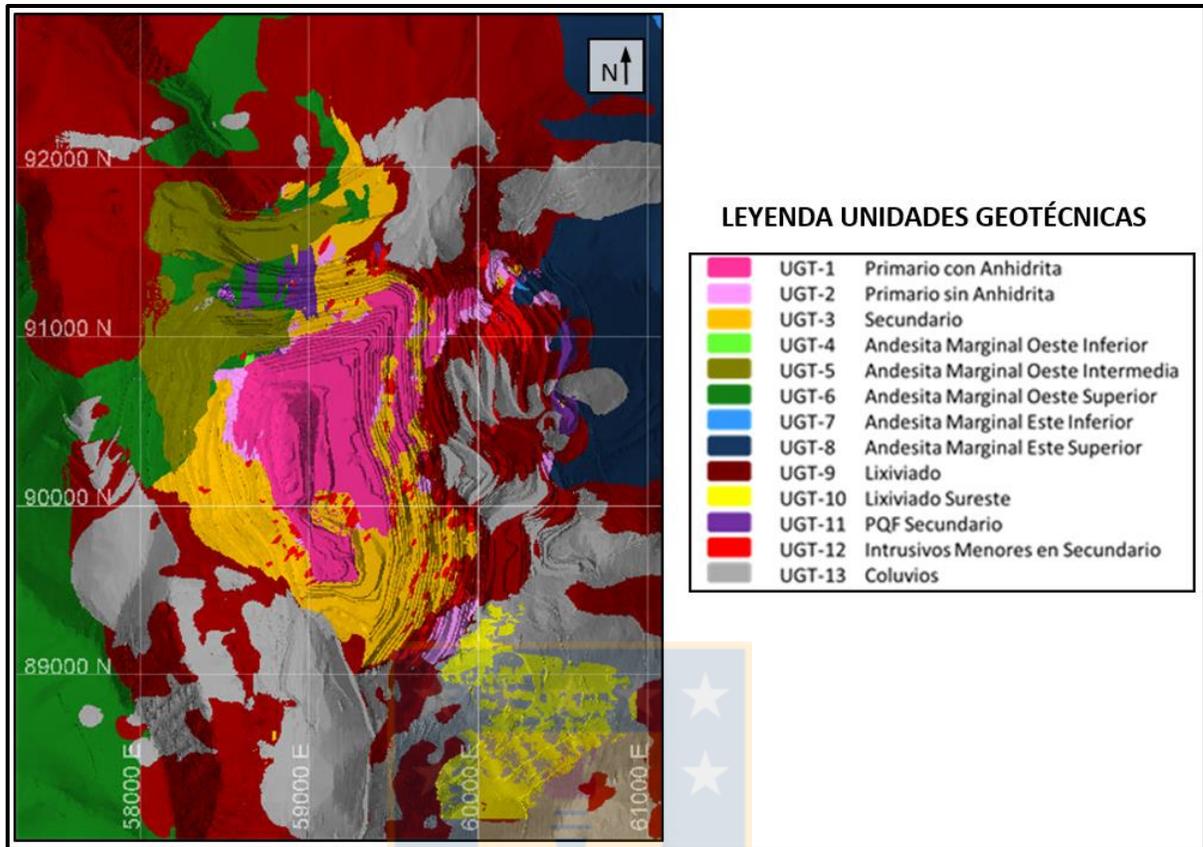


Figura 4.01. Unidades Geotécnicas de Los Pelambres (Tomado del “Modelo Macizo Rocoso 2018”).

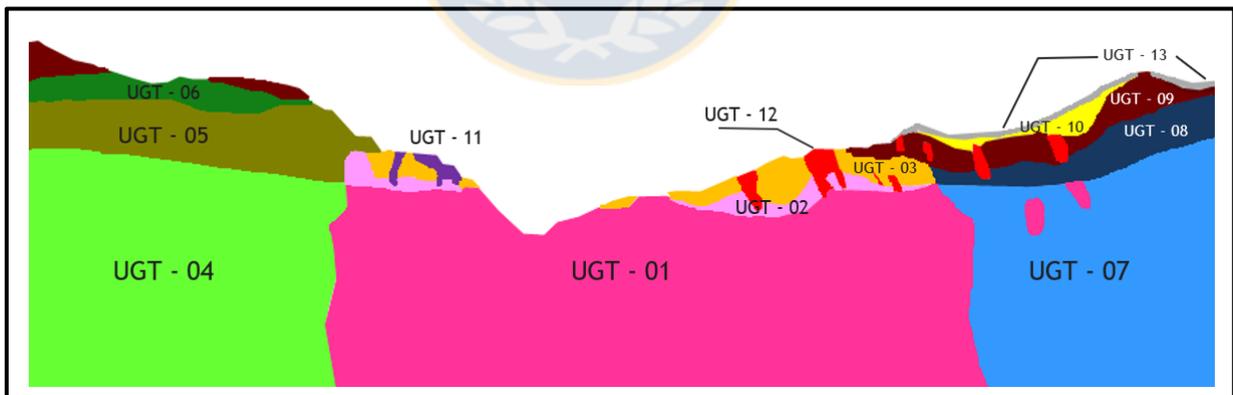


Figura 4.02. Perfil esquemático de una sección NE-SW de la mina con las UGT en profundidad (Tomado del “Modelo Macizo Rocoso 2018”).

5. MARCO TEÓRICO

5.1 ENSAYOS DE RESISTENCIA DE ROCA

El comportamiento mecánico de las rocas está definido por su resistencia y deformabilidad, siendo el primer parámetro el esfuerzo que soporta una roca para determinadas deformaciones. Para determinar este valor existen una serie de ensayos, tanto de laboratorio como de terreno que se realizan bajo ciertos parámetros establecidos y normados. Cuando se mide en probetas de roca sin confinar se denomina resistencia a compresión simple y su valor se emplea para la clasificación geotécnica de las rocas.

La resistencia es función de las fuerzas cohesivas y friccionales del material (además de otros valores extrínsecos al material rocoso). La cohesión, c , corresponde a la fuerza de unión entre las partículas minerales que conforman la roca. El ángulo de fricción interna, ϕ , es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca, suele variar entre 25° y 45° .

Aparte de los valores antes mencionados, cuan resistente es una roca dependerá de otras condiciones, como la magnitud de los esfuerzos confinantes, la presencia de agua en los poros o la velocidad de aplicación de la carga de rotura. Incluso para rocas aparentemente isotrópicas y homogéneas, los valores c y ϕ pueden variar según el grado de cementación o variaciones en la composición mineralógica.

5.1.1. Ensayo de Compresión Uniaxial Simple (UCS)

Este ensayo permite determinar en laboratorio la resistencia uniaxial no confinada de la roca, o a la compresión simple σ_c (González de Vallejo, 2002). La relación entre los esfuerzos aplicados en el ensayo es:

$$\sigma_1 \neq 0; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

En este ensayo se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Razón largo/ancho de la probeta debe ser 2.5:1 a 3:1.
- Los extremos de la probeta deben ser paralelos y pulidos, sin grietas.
- El ancho de muestra debe ser mayor a 10 veces el tamaño medio del grano.

El ensayo trata de la aplicación gradual de una fuerza axial a un cilindro de roca, hasta que se produce su rotura.

El procedimiento consiste en, primeramente, concebir una idea general de la roca en cuanto a su litología y estructuras. Luego de identificar las muestras se miden sus dimensiones para validar si satisfacen las condiciones antes mencionadas. Posterior a esto, se recubre la muestra con una membrana cuyo fin será el de evitar que al momento de fallar la roca no salten fragmentos y dañen a personas u objetos de alrededor.

Se debe situar el testigo de tal forma que el pistón de la máquina quede paralelo a las caras transversales de la muestra.

Una persona se encarga de medir la presión a la cual está siendo sometida la muestra mediante un manómetro conectado a la prensa hidráulica, la presión debe ser medida a cada instante ya que, al momento de fallar, la aguja que indica el valor de la carga vuelve al punto de partida. Una segunda persona será la encargada de ir aumentando paulatinamente la presión en la prensa hidráulica.

Una vez que el testigo falle, se retira y se analizan las condiciones y modo de ruptura.

5.1.2. Carga Puntual

El ensayo de carga puntual o PLT (Point Load Test) se utiliza para determinar la resistencia a la compresión simple de fragmentos irregulares de roca, testigos cilíndricos de sondajes o bloques, a partir del índice de resistencia a la carga puntual (I_s), de tal forma que el stress aplicado se convierte a valores aproximados de UCS según el diámetro de la muestra (Broch y Franklin, 1972). El

procedimiento consiste en romper una muestra entre dos puntas metálicas accionadas por una prensa. Las ventajas de este ensayo son que se pueden usar muestras de roca irregulares sin preparación previa alguna y que la máquina es portátil, por lo cual es un ensayo que se puede realizar en terreno.

Para realizar el ensayo, se debe primero identificar las muestras midiendo sus dimensiones. Dependiendo del tipo de muestra (Figura 5.01.), se sitúa el testigo entre las puntas cónicas de la máquina, resguardando que se cumplan las configuraciones de carga y requerimientos de forma del testigo. La máquina se cubre con una bolsa resistente cuyo fin será el de evitar que, al momento de fallar la roca, salten fragmentos y dañen a personas u objetos aledaños.

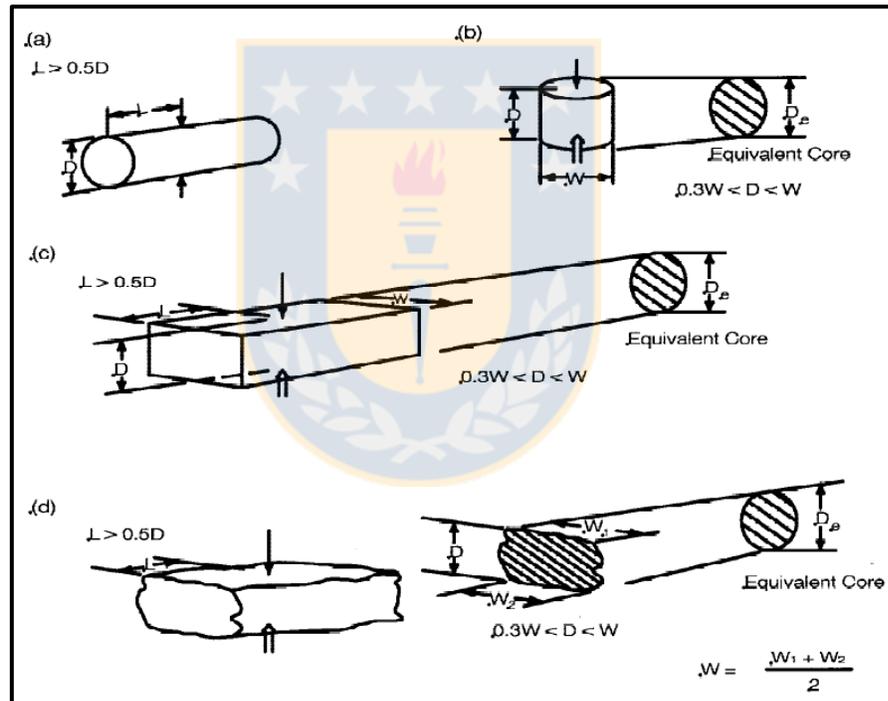


Figura 5.01. Configuración de carga y requerimientos en la forma de los testigos (a) muestra diametral, (b) muestra axial, (c) bloque y (d) muestra irregular. L = largo, W = ancho, D = diámetro, y D_e = diámetro del núcleo equivalente

Una persona se encarga de medir la presión a la cual está siendo sometida la muestra mediante un manómetro conectado directamente a la prensa hidráulica, mientras que otra se encarga de ir

aumentando paulatinamente la presión en la prensa hasta que la muestra falle. Una vez que esto pase, se retira la muestra y se analizan las condiciones y modo de ruptura (Figura 5.02.)

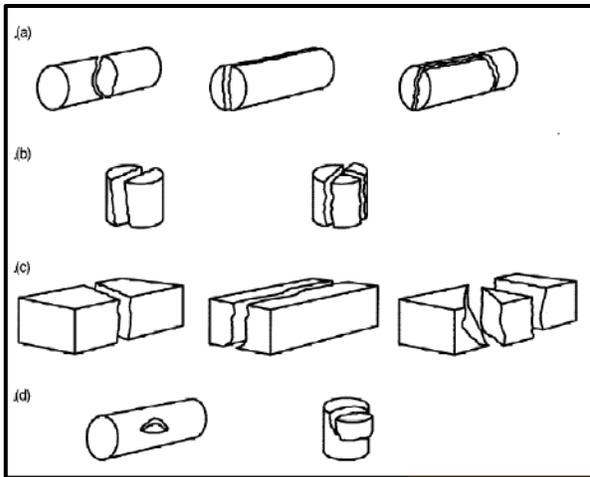


Figura 5.02. Modos típicos de falla para muestras válidas e inválidas (a) muestras diametrales válidas; (b) muestras axiales válidas; (c) bloques válidos; (d) muestras inválidas.

5.1.3. Relación entre UCS y Carga Puntual

Una vez realizado el ensayo de carga puntual, el índice de carga puntual sin corrección se calcula de la siguiente manera:

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

Donde:

P = carga de falla en N (debido a que la presión se realiza a través de puntas cónicas, es necesario realizar una corrección, la cual es: $P = \text{valor medido en la maquina} \times 14,426 \text{ cm}^2$)

De = diámetro del núcleo equivalente = D para muestras diametrales (Figura 5.01.), m, y es dada por:

$$De^2 = D^2 \text{ para muestras diametrales, } mm^2,$$

$$De^2 = 4A/\pi \text{ para muestras irregulares, axiales o bloques, } mm^2;$$

Donde:

$A = WD$ = área de la sección transversal mínima (Figura 5.01.)

Una vez obtenido el I_s , lo siguiente es realizar una corrección debido a que este valor varía en función de D en muestras diametrales y de D_e en muestras axiales, irregulares y bloques.

El índice de resistencia a la carga puntual corregido ($I_{s(50)}$) es definido como el valor de I_s medido en muestras diametrales con $D = 50$ mm. Cuando se tienen muestras de variados diámetros, distintos a 50 mm, se debe realizar un gráfico log-log con los valores P y D_e^2 como ejes y con una regresión lineal se puede determinar el valor de $I_{s(50)}$. El valor promedio de $I_{s(50)}$ se calcula eliminando los dos valores más altos y los dos más bajos de diez o más ensayos válidos. Si pocas muestras fueron testeadas, solamente el valor más alto y más bajo se descarta y se promedian el resto.

Por último para transformar el valor de $I_{s(50)}$ a UCS se ocupa un factor, que se puede obtener utilizando diversos métodos matemáticos (gráficos, comparación de promedio, estadística, etc.) o bien, utilizando alguno propuesto por algún autor.

5.2 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN

En términos geoestadísticos, la predicción o estimación busca evaluar de manera precisa un valor que no ha sido muestreado ni medido a partir de datos disponibles. Con lo anterior, los métodos geoestadísticos buscan construir estimadores, sin dejar de lado una medida de la precisión de la estimación, ocupando para esto herramientas probabilísticas (varianzas o intervalos de confianza, por ejemplo).

Se pueden distinguir dos tipos de estimaciones, globales y locales. El primer tipo tiene como fin caracterizar un campo o área con un valor único (por ejemplo, el promedio de la variable regionalizada en estudio) o por una distribución estadística (histograma), provocando que normalmente la estimación generada sea insuficiente. Por otro lado, la estimación local evalúa diferentes sectores o regiones de la zona de estudio. En general, se busca evaluar un valor en un sitio que no ha sido muestreado o el valor promedio de un bloque cuyo soporte es mayor que el soporte de los datos.

Existen varios métodos de estimación distintos. En este trabajo se ocuparon dos: inverso a la distancia y kriging ordinario

5.2.1. Inverso a la Distancia

Método de estimación consistente en estimar un valor \hat{Y} en una ubicación S_0 en base a los valores del muestreo en las ubicaciones S_i . Este método es considerado de fácil implementación y poco intensivo computacionalmente, ocupado por defecto por usuarios GIS (sistema de información geográfica) para generar superficies en base a los valores disponibles por muestreo. La ecuación para determinar el valor para cada posición es la siguiente:

$$\hat{Y}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times y(S_i)$$

Donde λ_i corresponde al peso del valor (y) en la ubicación S_i

De lo anterior se puede observar que el valor estimado \hat{Y} en la ubicación S_0 es una combinación lineal entre pesos y los valores observados o muestreados. La forma de calcular el peso de cada muestra para una ubicación S_i es:

$$\lambda_i = \frac{d_{0i}^{-\alpha}}{\sum_i^n d_{0i}^{-\alpha}}$$

Siendo d_{0i} la distancia entre la ubicación S_0 y la ubicación S_i y α la potencia de ajuste (por ejemplo 2 como inverso de la distancia al cuadrado y 3 como inverso a la distancia al cubo).

El ponderador o peso sigue la restricción:

$$\sum_i^n \lambda_i = 1$$

Se puede afirmar entonces que el supuesto de inverso a la distancia es simple debido a que no aplica procedimientos de computación intensivos, como, por ejemplo, invertir la matriz de covarianza en kriging. Aun así presenta varios inconvenientes, siendo uno de los más característicos que los pesos de cada muestra no están determinados por los datos empíricos del área de estudio, por lo que el inverso a la distancia no tiene en cuenta la variabilidad espacial de la relación de distancia del fenómeno en estudio, en su lugar, supone que la estructura de decaimiento de la distancia es uniforme en toda el área de estudio y las formas de ponderación son representaciones correctas de la estructura de correlación espacial.

A modo de comparación con kriging ordinario, Lu y Wong (2008) demostraron de manera empírica que, si en la interpolación de los datos no existe una estructura de correlación espacial prominente, o que, si los datos no son adecuados para soportar el kriging, una estimación por inverso a la distancia entregaría predicciones más precisas.

5.2.2. Kriging Ordinario

Este método de estimación busca encontrar la mejor estimación lineal insesgada de un bloque o Zona V considerando la información disponible, es decir, las muestras interiores y exteriores a V (Figura 5.03.).

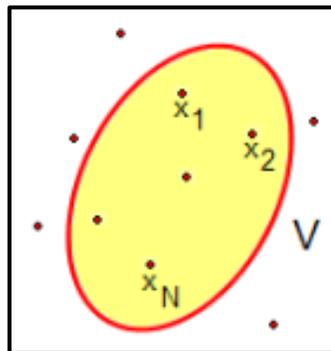


Figura 5.03. Esquema Zona V

De manera similar al método del inverso a la distancia, el kriging atribuye un peso λ_i a la muestra $Z(x_i)$, pero estos se calculan de manera diferente, buscando el modo de minimizar la varianza del

error cometido. El objetivo del kriging proviene de su misma definición, al minimizar la varianza se da la certeza de obtener la estimación más precisa posible de la vecindad. El interés práctico más importante del kriging proviene no del hecho que asegura la mejor precisión posible, sino más bien de que permite evitar un error sistemático.

Una consideración importante que se debe tener en cuenta para que el kriging tenga un sentido físico, es que la variable estudiada sea aditiva, esto quiere decir, que su valor en la unión de varios dominios sea igual a la media de sus valores sobre cada uno de ellos.

Los ponderados y la varianza de kriging toman en cuenta:

1) Las distancias entre el sitio a estimar y los sitios con datos, mediante los términos:

$$C(x_\alpha - x_\beta) \text{ ó } \gamma(x_\alpha - x_\beta)$$

2) La configuración geométrica de los sitios con datos y la posible redundancia de la información que contienen, por medio de los mismos términos mencionados en el punto 1.

3) La continuidad espacial de la variable, descrita por la función de covarianza C o por el variograma γ .

Para determinar el estimador, el kriging experimenta tres etapas: linealidad, insesgo y optimalidad. En este caso se explicarán para él método de kriging ordinario, que es el utilizado en este trabajo.

1) Linealidad: El estimador tiene que ser una combinación lineal ponderada (promedio ponderado) de los datos.

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

Donde: x_0 es el sitio donde se quiere estimar, x_α el sitio donde se conoce el valor Z y λ_α el ponderador según la ubicación α .

2) Insesgo: Esta etapa consiste en expresar el error de la estimación con esperanza nula:

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

Para el caso del kriging ordinario se tiene:

$$E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = a + \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \times E[Z(x_{\alpha}) - Z(x_0)] = a + \left(\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} - 1 \right) m$$

Con $m = \text{media}$.

Para que se cumpla el insesgo y el valor esperado sea nulo se tiene que cumplir.

$$a = \left(1 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \right) m$$

3) Optimalidad: Etapa que consiste en buscar ponderadores que minimizan la varianza del error de estimación.

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

Para el caso del kriging ordinario la varianza anterior debe ser igual a

$$= C(0) + \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha} - x_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha} - x_0) + 2\mu \left(\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} - 1 \right)$$

Luego esto se traduce a la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \cdots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \cdots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x_0) \\ 0 \end{pmatrix}$$

5.2.2.1 Variografía

En términos prácticos, en el campo geológico-minero, el variograma constituye una función de una característica geológica (o cualquier otra variable regionalizada) en el espacio, que representa el grado de continuidad de la variable bajo estudio. La función que define a un variograma o semivariograma es:

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

Donde E corresponde a la esperanza matemática, Z la función aleatoria, x una posición en el espacio y h el incremento.

Se define a una función aleatoria como estacionaria dentro de un dominio, si su función de densidad acumulada es invariante a cualquiera translación de coordenadas S (Deutsch y Journel, 1998).

Para una función aleatoria estacionaria:

$$\gamma(x) = K(0) - K(x), \text{ donde } K = \text{Covarianza}$$

$$\gamma(x) \leq K(0), \text{ y naturalmente}$$

$$\gamma(0) = 0$$

Como consecuencia de lo anterior, el semivariograma de una función aleatoria está necesariamente acotado (por ejemplo, cuando alcanza una meseta o *sill* (Figura 5.04.)). Sin embargo, existen variogramas que no exhiben una meseta. Ellos no proporcionan el valor $K(0)$ y de este modo ellos no responden a la hipótesis estacionaria.

El alcance se define como la distancia a la cual el variograma se estabiliza. La meseta o *sill* se define como el valor constante que toma el variograma en distancias mayores que el alcance. Cuando una discontinuidad se presenta en las vecindades del origen, reflejando con esto un traspaso de un valor a otro a una muy pequeña distancia, se está en presencia del denominado efecto pepita.

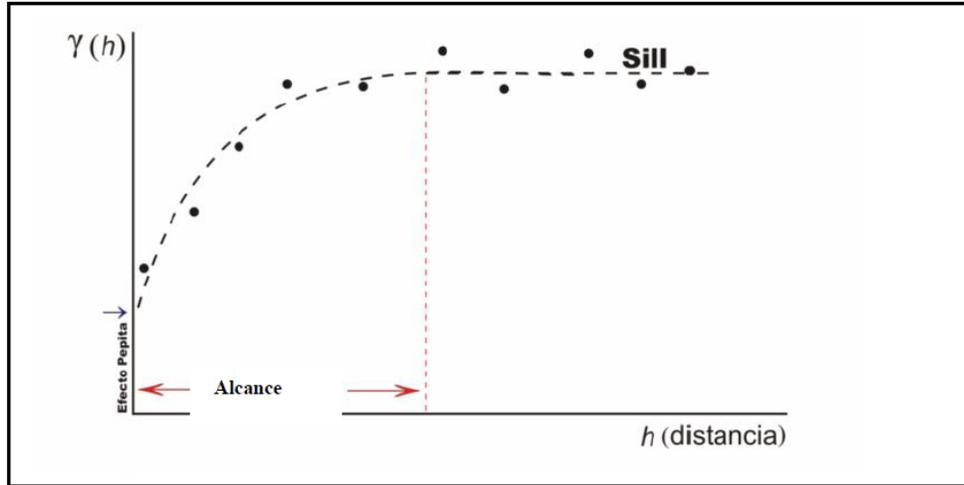


Figura 5.04. Forma típica de un variograma con sus rasgos característicos

Al obtener el variograma experimental es necesario construir un modelo (Figura 5.05.) debido a que por sí solo el variograma experimental no se puede evaluar en distancias o direcciones intermedias. Además, una interpolación entre los puntos del variograma experimental no garantiza la existencia y unicidad de la solución del sistema de kriging.

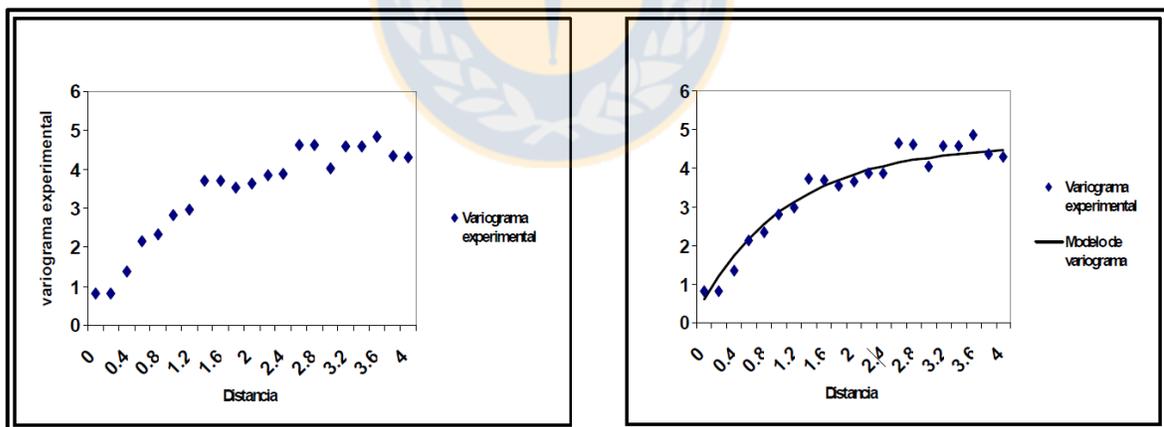


Figura 5.05. Variograma experimental (izquierda) junto a su modelo (derecha)

Otras razones por las que es necesario la creación del modelo, es que la interpolación y/o el variograma experimental no satisfacen las condiciones que todo variograma debe satisfacer.

6. MODELAMIENTO DE RESISTENCIA DE ROCA EN MINERA LOS PELAMBRES

6.1. MODELAMIENTO CON DATOS UCS PUROS

Para la construcción de la base de datos se ocupó una base existente con información correspondiente a ensayos de laboratorio en roca intacta ordenados por UGT (realizados desde el año 1993 hasta 2014). Esta base de datos contiene los resultados de ensayos de resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y triaxial, ensayos de tracción directa e indirecta, y otros valores asociados a las características mecánicas de las muestras.

El primer paso fue seleccionar los datos correspondientes a ensayos UCS, dejando solamente aquellos cuyo tipo de rotura fuese por matriz, es decir, descartando las roturas por estructura o los ensayos inválidos (si bien Superintendencia de Geotecnia no descarta los ensayos por estructura, se realizó de este modo para generar un modelo homogéneo del yacimiento, sin considerar estructuras). Aquellos datos que no poseían información sobre el tipo de rotura se consideraron que rompían por matriz.

Luego de este primer filtro, se buscan y eliminan los datos duplicados. En algunos casos, para las mismas coordenadas existían dos valores UCS. Para estos ensayos se dejó el promedio de los valores. En otros casos, para dos UGT distintas correspondían las mismas coordenadas y mismos valores UCS, en este caso se dejó la UGT observada en el modelo geotécnico del yacimiento.

Finalmente, se descartaron los valores UCS mayores a 350 y 250 MPa para las UGT 4 y 6 respectivamente, esto debido a que, dentro de la base de datos, estos valores correspondían a los más altos y no eran concordantes con los demás (anómalos).

Una vez realizada la revisión y filtrado de datos, el número de ensayos UCS válidos para cada UGT quedó como se muestra en la Tabla 6.01.

Tabla 6.01. Número de ensayos UCS válidos por cada UGT

| UGT | UGT-1 | UGT-2 | UGT-3 | UGT-4 | UGT-5 | UGT-6 | UGT-7 | UGT-8 | UGT-9 | UGT-10 | UGT-11 | UGT-12 | Total |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| N° de ensayos | 107 | 17 | 40 | 8 | 4 | 15 | 5 | 2 | 29 | 2 | 12 | 48 | 289 |

6.1.1. Análisis Exploratorio de datos (EDA) y Definición de dominios

Una vez filtrada la base de datos, lo siguiente es buscar el parámetro o característica del yacimiento que ajuste mejor los datos de resistencia de roca, es decir, un rasgo que controle o represente de mejor manera este valor dentro de la mina.

Dentro de los rasgos geológicos a considerar se encuentra la litología, alteración y mineralización del yacimiento, así como también las unidades creadas por Minera Los Pelambres que integran los rasgos anteriores y sirven para clasificar y unificar la información geológica de la mina, como lo son las UGT (Unidades Geotécnicas) y las M (Unidades Geometalúrgicas).

Para poder integrar la información de estos parámetros a la base de datos se utiliza el *software* Vulcan 9.0.2. Mediante este programa la información de litología, alteración, zona mineral y unidades geometalúrgicas provenientes del modelo de corto plazo es agregada a la base mediante un proceso llamado flageo. Con el modelo anteriormente mencionado, algunas muestras quedaron sin información en algún rasgo geológico, por lo que fue necesario volver a realizar el proceso, esta vez con los modelos puros de litología y zona mineral (modelos de largo plazo).

Para representar la información de manera gráfica, se utilizó el *software* Minitab 18.1, el cual genera, entre otras cosas, gráficos de probabilidad (Figura 6.01.) que facilitan el manejo de información y la toma de decisiones al momento de definir dominios de estimación. Para lo anterior, el programa grafica la variable UCS y la “quiebra” por el criterio geológico a ocupar, entregando, por ejemplo, la probabilidad de UCS para cada UGT o litología presente en el yacimiento en el mismo gráfico.

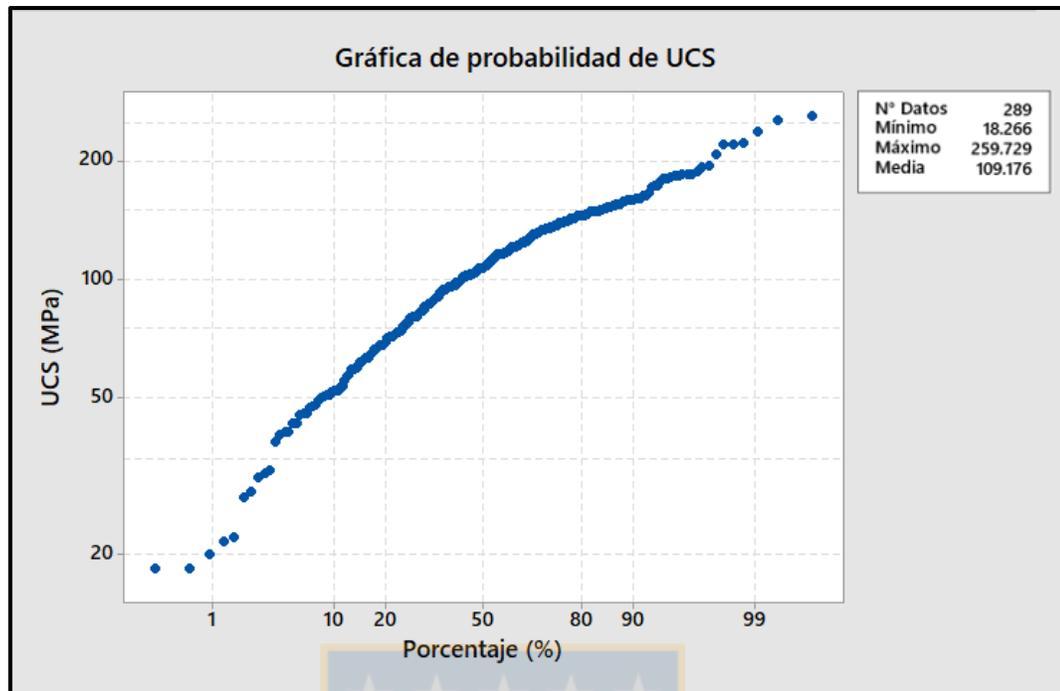


Figura 6.01. Probabilidad de UCS

6.1.1.1. Unidades Geotécnicas (UGT)

Los ensayos UCS están ordenados en la base de datos original por UGT, por lo mismo, esta clasificación es la primera a tomar en cuenta al momento de observar cómo se distribuyen los valores de resistencia y si constituye un parámetro que determine tendencias distintas.

En la Figura 6.02. se muestra la probabilidad de UCS por UGT, en él las 12 UGT (no se considera la UGT-13 Coluvio) se ordenan de acuerdo a sus valores de resistencia. Los valores más altos a nivel general corresponden a la UGT 1 y 6, mientras que los valores más bajos se encuentran en las UGT superiores, lo que es concordante con la información geotécnica del yacimiento. Las tendencias presentes en el gráfico, a grandes rasgos, son dos (líneas punteadas roja y azul), de las cuales se podrían establecer dos tendencias de comportamiento. Lamentablemente estas tendencias no son congruentes en cuanto a la relación espacial de las UGT en el yacimiento y no son representativas de la misma. Aparte, hay que tener en consideración que las unidades ya integran información litológica, de alteración y zona mineral, entre otras. Por las razones anteriores se

considera que las UGT no son un parámetro que controle la resistencia de la roca en la mina, por lo que no fueron consideradas para la definición de dominios.

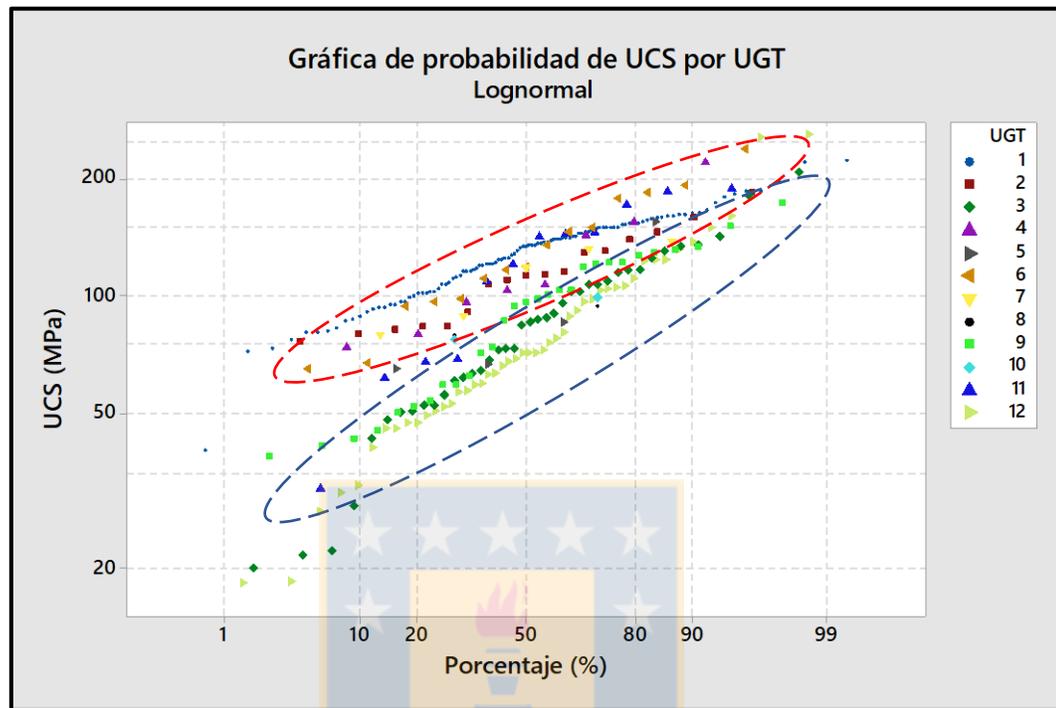


Figura 6.02. Probabilidad de UCS por UGT

Otra forma gráfica de observar las relaciones entre las distintas UGT es con un gráfico que muestre la distribución por UGT de sus desviaciones estándar versus los promedios correspondientes (Figura 6.03.). Mediante este tipo de gráficos es posible determinar que UGT se comporta similar a otra y poder así definir grupos de comportamiento semejante. En este caso en particular, aun habiendo comportamientos parecidos (valores cercanos de promedio y desviación estándar) entre algunas de ellas, especialmente no se relacionan entre sí, siendo esto un criterio importante para descartar la definición de dominios por UGT.

6.1.1.2. Litología

Al ordenar la probabilidad de UCS por litología (Figura 6.04.), se observa claramente una tendencia general para las muestras, predominando entre sus valores la Diorita Cuarcífera. Lo anterior tiene

que ver con que esta litología es la predominante en el yacimiento, ocupando espacialmente gran proporción de éste. Con respecto a las demás litologías, presentan un comportamiento similar con la Diorita Cuarcifera, razón por la cual la litología no es buen criterio para definir dominios de estimación, ya que sólo existe una tendencia (línea punteada azul).

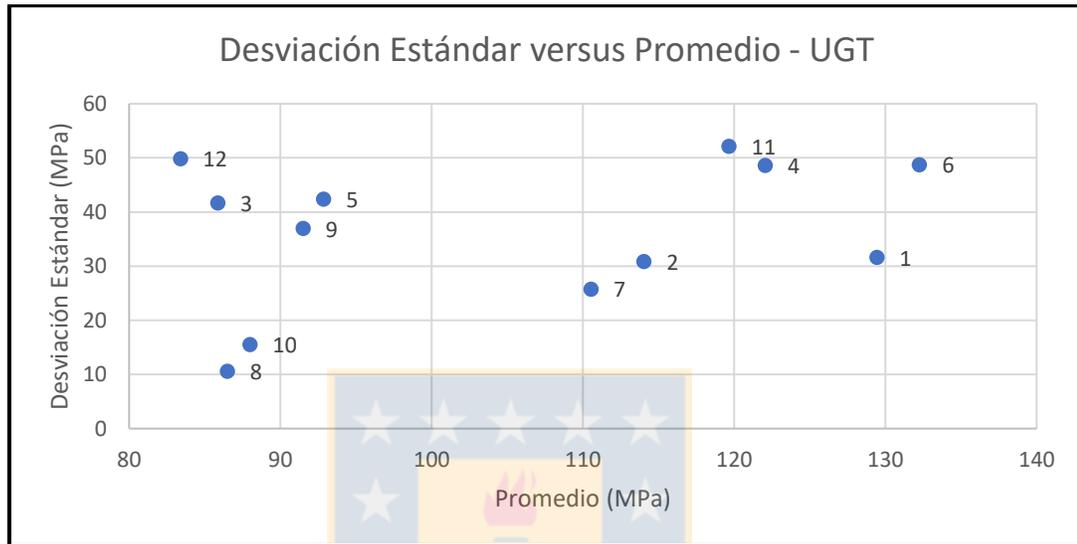


Figura 6.03. Desviación estándar versus promedio de las distintas UGT

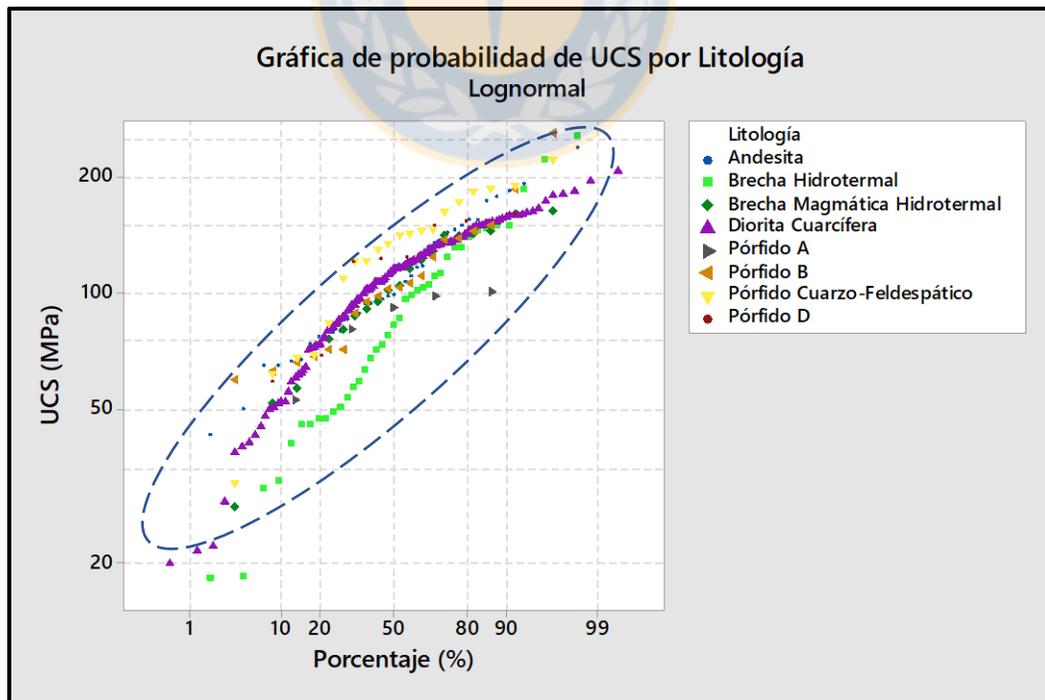


Figura 6.04. Probabilidad de UCS por Litología

Por otro lado, el gráfico desviación estándar versus promedio (Figura 6.05.) muestra también una tendencia general cercana a la Diorita Cuarcifera, separándose del grupo el Pórfido A y la Brecha Hidrotermal, con menor resistencia y el Pórfido Cuarzo-Feldespático con mayor resistencia. Esto puede deberse a las dimensiones de estos cuerpos, que son de menor tamaño dentro del yacimiento.

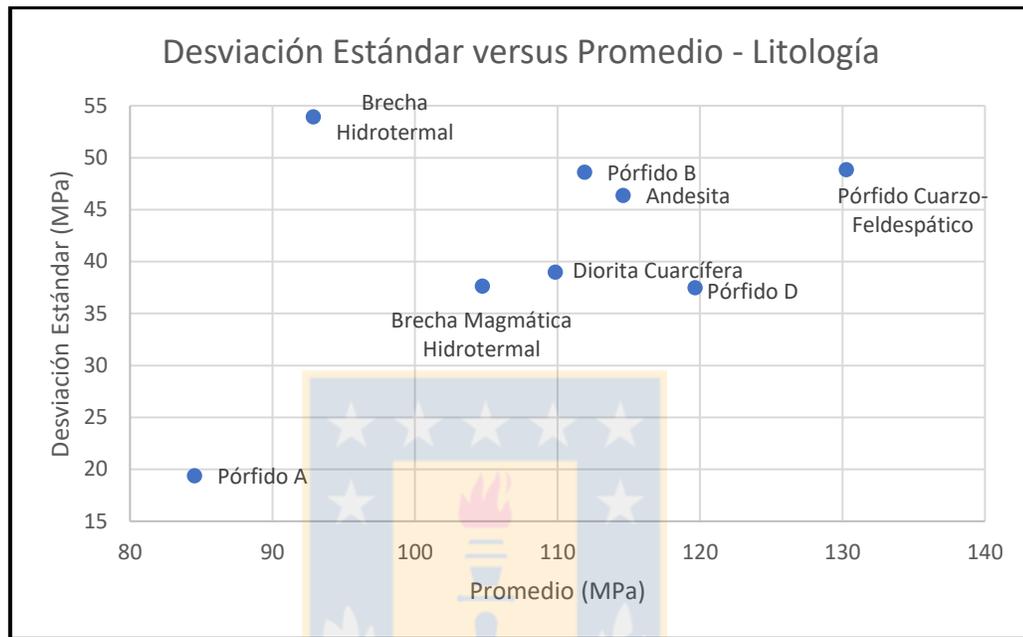


Figura 6.05. Desviación estándar versus promedio de las distintas litologías

6.1.1.3. Alteración

La alteración presenta un comportamiento similar a la litología, pero aún más marcado. En la Figura 6.06. se observa que la Alteración Potásica resalta sobre las demás. Esto, al igual que en el caso de la Diorita Cuarcifera, ocurre por el hecho de que esta alteración tiene el volumen más grande dentro del yacimiento, por lo que gran parte de las muestras se ubican dentro de esta zona. Como es de esperar en el gráfico hay una sola tendencia general (línea punteada azul) que abarca a todas las alteraciones (con valores un poco más altos la alteración Epidota).

En cuanto al gráfico desviación estándar versus promedio (Figura 6.07.) la tendencia es similar al anterior, destacando la gran diferencia de la alteración Epidota con las otras tres. Esta diferencia se debe a que esta alteración se encuentra en las periferias del yacimiento, lejos del núcleo de

alteración, por lo que la roca no se encuentra tan afectada y, por lo tanto, su nivel de resistencia es mayor que a las rocas afectadas por alteraciones cercanas al núcleo.

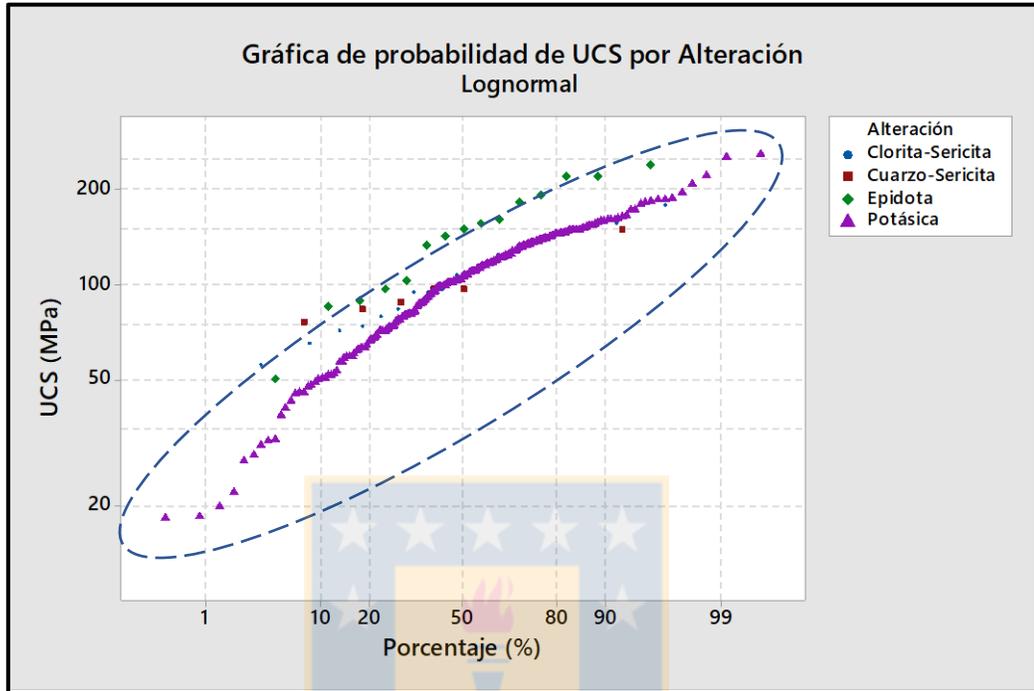


Figura 6.06. Probabilidad de UCS por Alteración

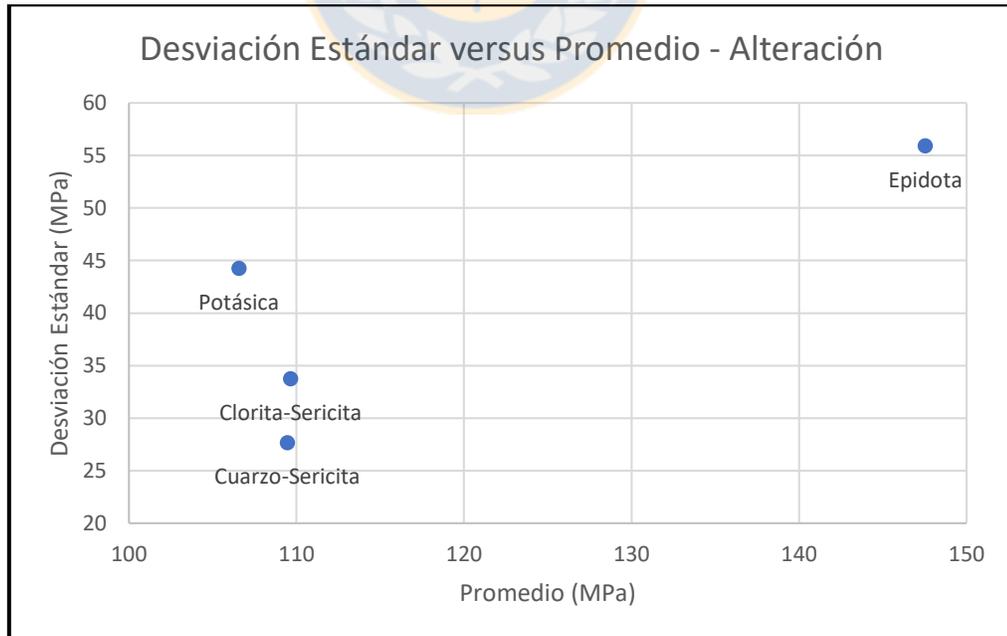


Figura 6.07. Desviación estándar versus promedio de las distintas alteraciones

6.1.1.4. Zona Mineral

En Minera Los Pelambres las zonas minerales son en orden ascendente: Primario con Anhidrita, Primario Sin Anhidrita, Secundario, Lixiviado Parcial, Lixiviado Total y Coluvio (esta última no se considera debido a no ser roca consolidada). Al graficar la probabilidad de UCS por zona mineral se obtiene, dentro de todos los parámetros estudiados, la mejor distribución de durezas. En la Figura 6.08. las muestras correspondientes al Primario Con Anhidrita y Primario Sin Anhidrita constituyen una tendencia que presenta los valores de resistencia más altos (de media aproximada 150 MPa), con una distribución similar entre ambas zonas (línea punteada roja). Por otro lado, con valores más bajos (media cercana a 80 MPa), existe otra tendencia (línea punteada azul) marcada fuertemente por el Secundario, por el número de muestras que representa, acompañada del Lixiviado Total y Parcial. Esto, aparte de ser geológicamente predecible, es concordante con el modelo de Unidades Geometalúrgicas o M, que ocupa como parámetro principal la zona mineral como base para la definición de dominios, aunque con algunas importantes diferencias. Por lo anterior, se define la zona mineral como la característica geológica de Minera Los Pelambres que será ocupada para definir los dominios de estimación para la realización del modelo de UCS.

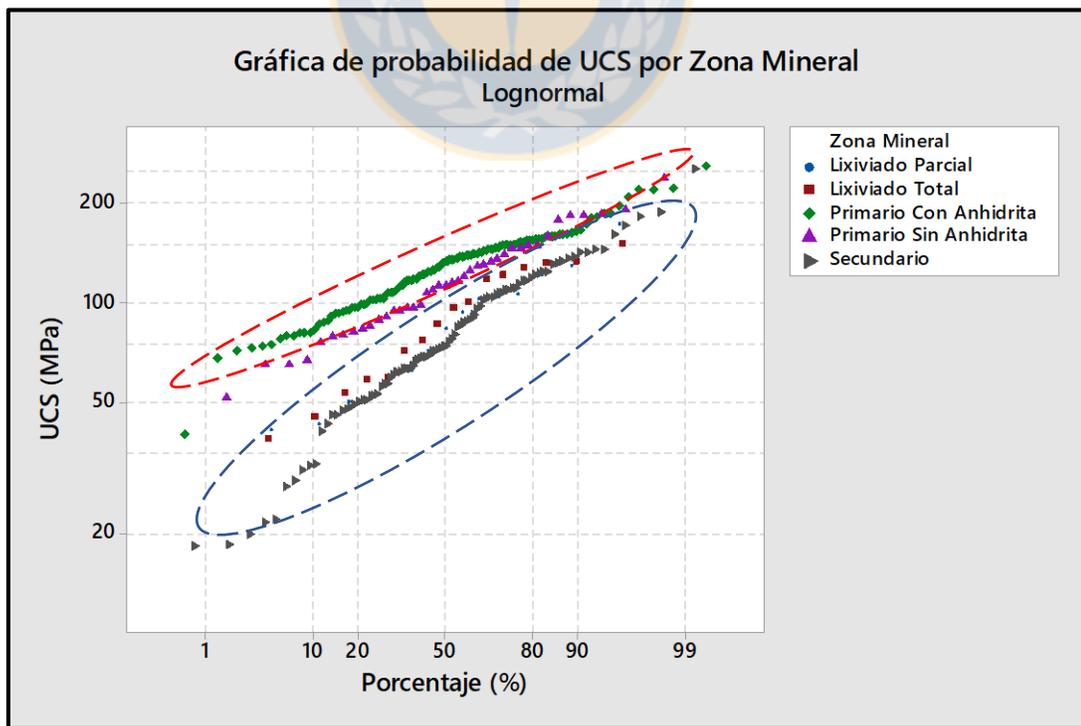


Figura 6.08. Probabilidad de UCS por Zona Mineral

Concordante con el gráfico anterior, la Figura 6.09. muestra una distribución similar. Las zonas primarias corresponden a las zonas de mayor resistencia, conformando así un dominio de estimación. El otro dominio estaría constituido, por la zona secundaria y los lixiviados. Con respecto a la desviación estándar de las zonas que podrían separarlas dentro del mismo dominio, al no poseer suficientes muestras es normal que este valor pueda variar, sobre todo cuando en una zona el número de muestras no es suficiente. Por lo mismo, quedan determinados los dominios de estimación como Dominio Blando (Secundario, Lixiviado Parcial, Lixiviado Total) y Dominio Duro (Primario con y sin Anhidrita).

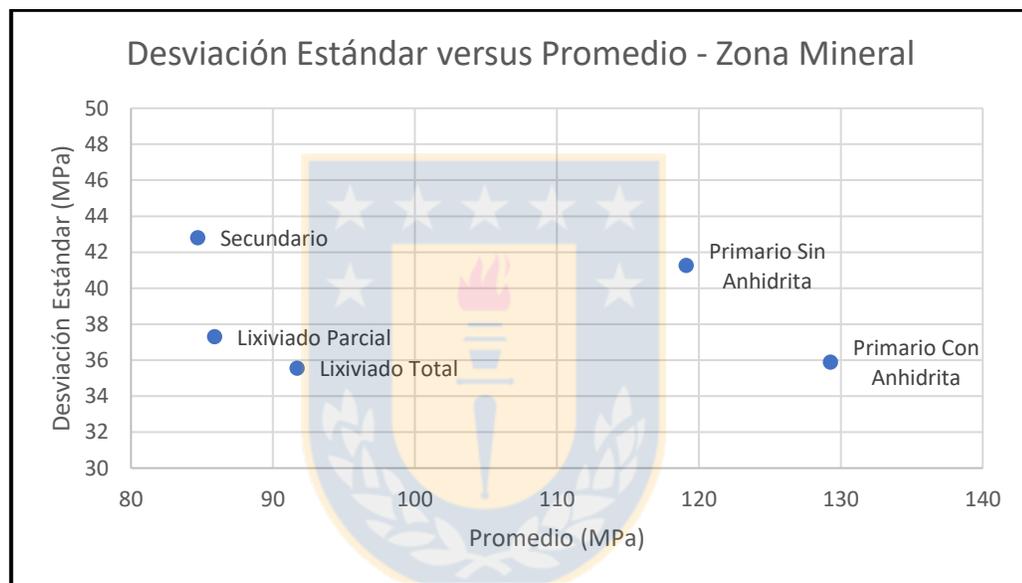


Figura 6.09. Desviación estándar versus promedio de las distintas zonas minerales

6.1.1.5. Unidades Geometalúrgicas (M)

Por último, se consideran las Unidades Geometalúrgicas, que corresponden a un criterio de clasificación consistente en separar el material en duro o blando de acuerdo con su comportamiento en el molino SAG (semiautógeno) de la concentradora (utilizando eso sí, solo material primario o secundario). Mediante una serie de pruebas al material, las unidades se agruparon en M, correspondiendo a las unidades blandas las M 1, 2 y 8, mientras que las duras son las 3, 4 y 7. En la Figura 6.10 se puede observar esta división, siendo las M 2 y 1 las más blandas, y las M 3, 4 y 7 las más duras. Para el caso de la M 8 el comportamiento no es el esperado, pero esto se debe a que,

aunque corresponda a roca dura en cuanto a su resistencia, debido a su granulometría el comportamiento en el molino SAG es alto, lo que le confiere la característica de roca blanda de acuerdo con esta división.

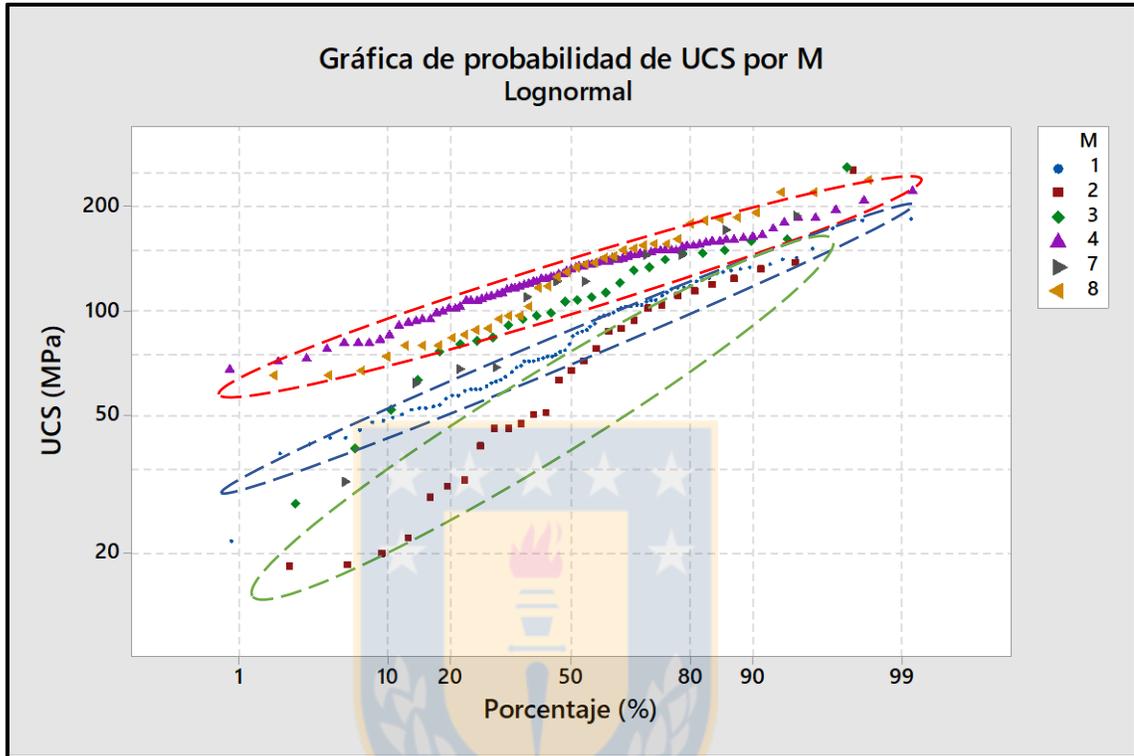


Figura 6.10. Probabilidad de UCS por M

Por otra parte, el gráfico de desviación estándar versus promedio (Figura 6.11.) muestra lo mismo que el gráfico anterior, las unidades más blandas corresponden a las M 2 y 1 mientras que las más duras a las M 3, 4 y 7, con el mismo comportamiento para la M 8. De todos modos, al ser las Unidades Geometalúrgicas una clasificación de la minera y estar hecha en base a ensayos de laboratorio y a otras características mecánicas de la roca, además de no ocupar datos de material lixiviado, las M, no constituyen un criterio para definir dominios de estimación.

Finalmente, una vez evaluados todos los criterios geológicos, y como ya se mencionó, queda definida la Zona Mineral como el mejor criterio para la definición de dominios, siendo dos: Dominio Duro y Dominio Blando.

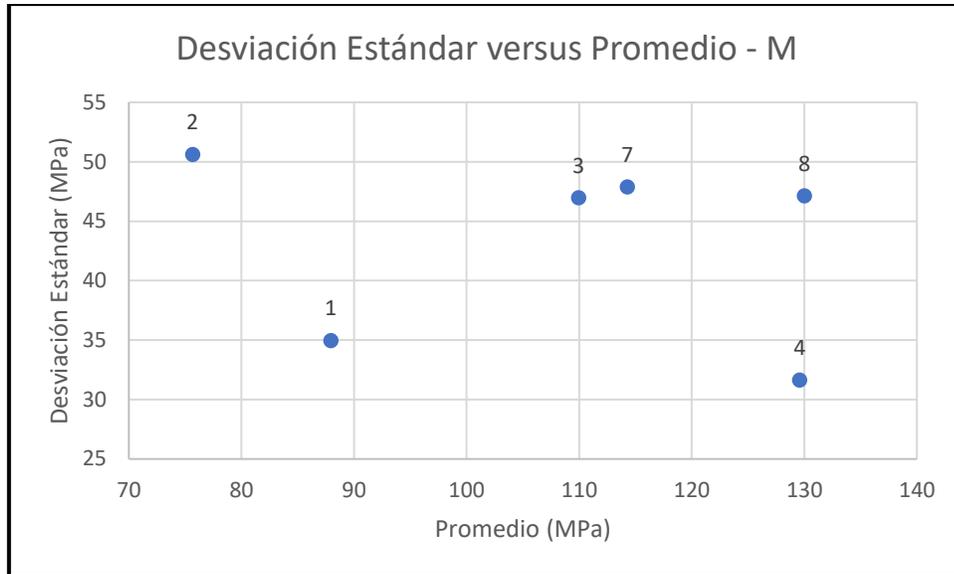


Figura 6.11. Desviación estándar versus promedio de las distintas M

6.1.2. Estadísticas por Dominio

Una vez definido los dominios de estimación, lo siguiente es determinar su comportamiento evaluando en conjunto los datos de las zonas minerales que componen cada dominio.

Para el Dominio Blando, compuesto por Secundario, Lixiviado Parcial y Lixiviado Total, el número de muestras es de 123, con un promedio de resistencia de roca de 85,7 MPa y una desviación estándar de 46,4. En la Figura 6.12. se observa la distribución de los datos del dominio.

En cuanto al Dominio Duro, compuesto por Primario Con Anhidrita y Primario Sin Anhidrita, el número de muestras es de 164, con un promedio de resistencia de roca de 126,7 MPa y una desviación estándar de 44,1. La distribución de los datos del dominio se muestra en la Figura 6.13.

Comparativamente y de acuerdo con los gráficos, ambos dominios se comportan de manera distinta. El Dominio Blando, como es de esperarse, tiene valores UCS más bajos y el rango que abarcan estos valores es más amplio. Por otro lado, el Dominio Duro, tiene un rango de valores más acotado y los valores UCS son más altos.

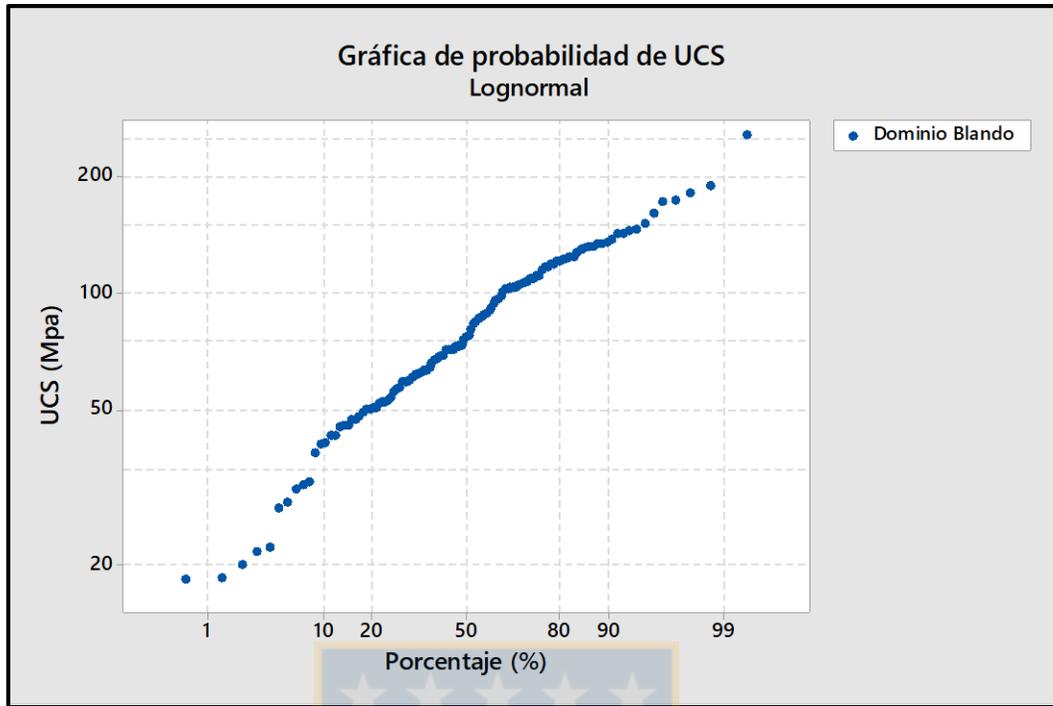


Figura 6.12. Probabilidad de UCS por Dominio Blando

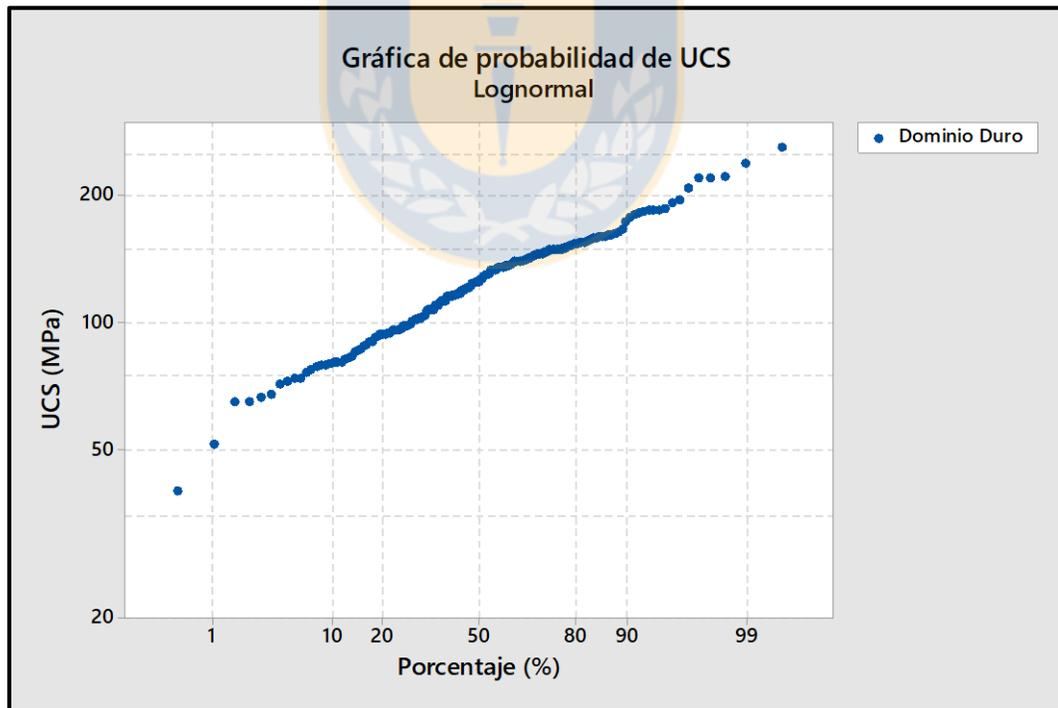


Figura 6.13. Probabilidad de UCS por Dominio Duro

6.1.3. Correlación Espacial

Para poder realizar kriging ordinario es necesario poseer los variogramas de los distintos dominios a estimar. Estos variogramas muestran la relación espacial que existe en la variable a estimar, permitiendo definir si pares de muestras a una distancia “x” se relacionan entre sí y de qué forma, además de graficar a que distancia esta relación se hace constante. Para confeccionar los variogramas se utilizó un *software* privado que integra la base de datos de ambos dominios y genera variogramas en tres direcciones ortogonales. Para el caso de los dominios definidos, no fue posible establecer (por el número de muestras) si existe una dirección preferencial, por lo tanto, se utilizaron las direcciones ortogonales 0-0, 0-90 y 90-0. Luego de esto, utilizando el programa, se realiza el variograma teórico buscando pares de datos cada 50 metros con una tolerancia de 30, modelando así el variograma experimental para ambos dominios. El fin de esto es obtener el ponderador de las muestras que será ocupado para realizar el kriging ordinario. Las figuras 6.14. y 6.15. muestran los resultados para el Dominio Blando y Dominio Duro respectivamente.

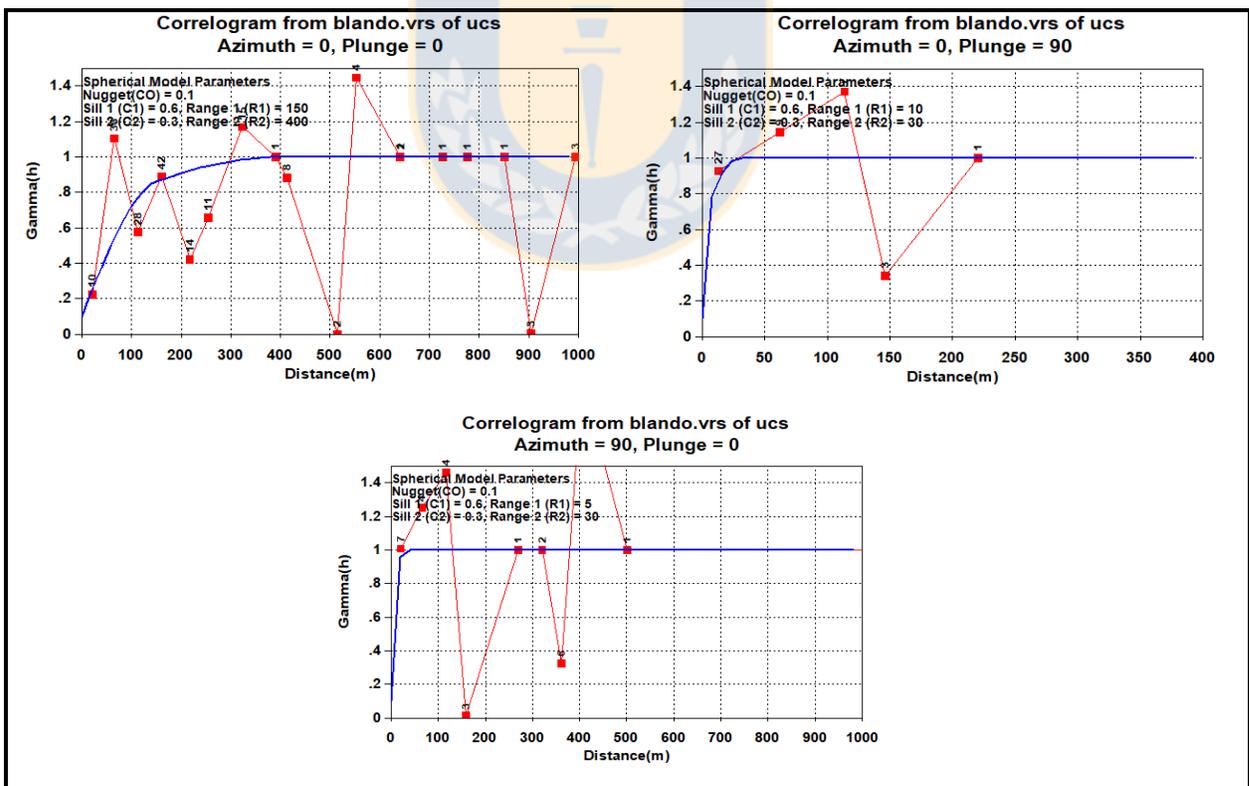


Figura 6.14. Correlogramas en tres direcciones ortogonales (0-0, 0-90 y 90-0) para el Dominio Blando

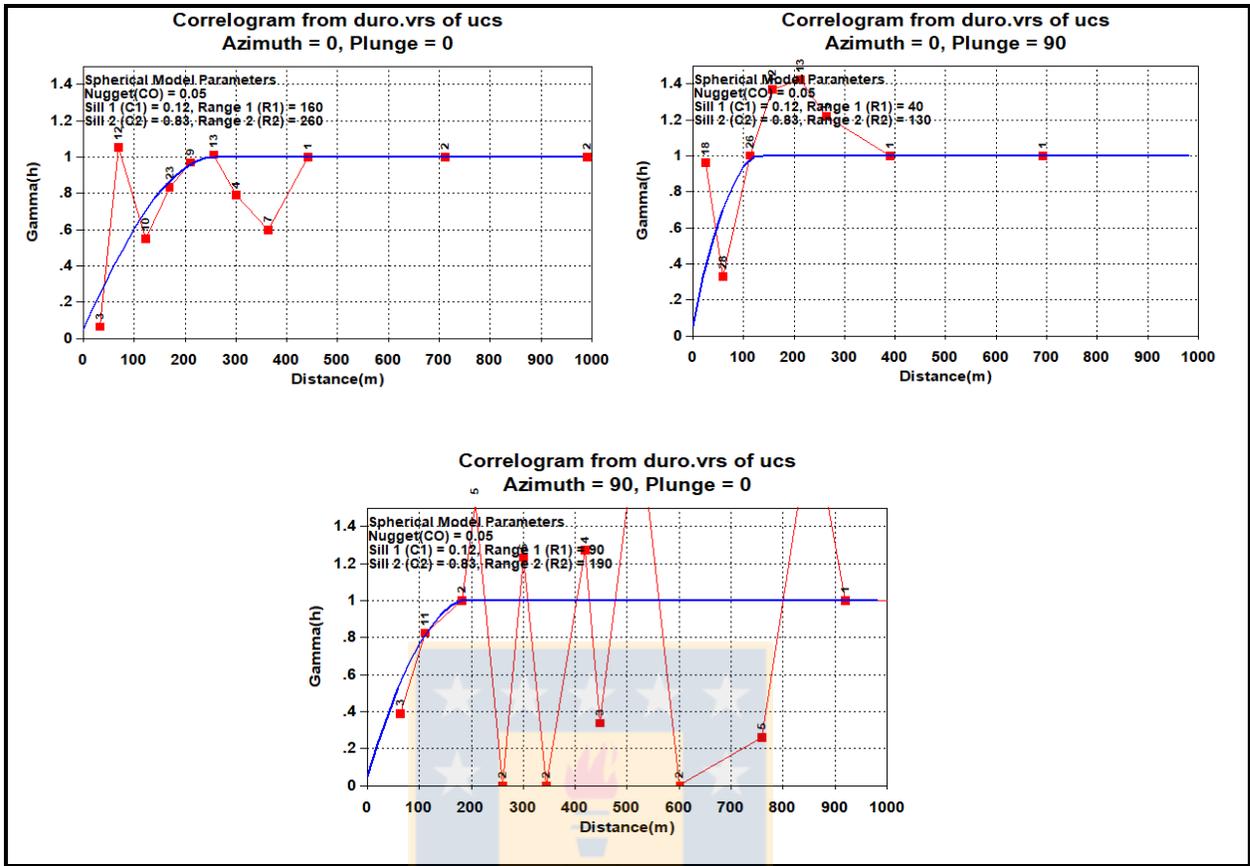


Figura 6.15. Correlogramas en tres direcciones ortogonales (0-0, 0-90 y 90-0) para el Dominio Duro

En la Tabla 6.02. se resume la información de los correlogramas, posteriormente utilizada en Vulcan 9.0.2. para la estimación por kriging ordinario, obtenidas directamente de los variogramas.

Tabla 6.02. Tabla resumen con valores de correlogramas para ambos dominios

| Dominio | Elipsoide de búsqueda | | | Dirección (dip/dipdir) | Efecto Pepita | Primera Estructura | | | Segunda Estructura | | |
|---------|-----------------------|----|----|------------------------|---------------|--------------------|------|-------|--------------------|------|-------|
| | Rotación Vulcan | | | Mayor | | Sill | Tipo | Rango | Sill | Tipo | Rango |
| | Z° | X° | Y° | Semi-menor | | | | | | | |
| Blando | 0 | 0 | 0 | 00/00 | 0,1 | 0,6 | sph | 150 | 0,3 | sph | 400 |
| | | | | 00/90 | | | | 10 | | | 30 |
| | | | | 90/00 | | | | 5 | | | 30 |
| Duro | 0 | 0 | 0 | 00/00 | 0,05 | 0,12 | sph | 160 | 0,83 | sph | 260 |
| | | | | 00/90 | | | | 40 | | | 130 |
| | | | | 90/00 | | | | 90 | | | 190 |

6.1.4. Análisis de Contacto

El análisis de contacto corresponde a un análisis estadístico que describe el perfil de la variable a estimar para muestras cercanas y que cruzan zonas de contacto (en este caso, zonas minerales). El propósito de este análisis es definir para cuáles contactos el valor de la variable cambia bruscamente al pasar de una zona mineral a otra. En el caso de las zonas minerales con valores UCS similares, el paso de una zona a otra no debería ser brusco, manteniendo en promedio valores similares a ambos lados del contacto. Para el caso contrario, cuando las zonas minerales tienen valores de resistencia muy distintos, el paso de una zona a otra debería notarse en el gráfico, aumentando o disminuyendo su valor dependiendo del caso. Todo lo anterior sirve para validar de manera distinta, si los dominios definidos comprenden zonas minerales con valores similares de UCS, o bien, si dentro de un dominio podría existir una nueva división entre zonas.

Las figuras 6.16., 6.17., 6.18. y 6.19, muestran las relaciones de contacto para las diferentes zonas minerales, comparando aquellas que están dentro del mismo dominio o bien, que presenten una relación de contacto. Valores negativos y positivos corresponden a las distancias al contacto desde dominios distintos, es decir, valores negativos corresponden a un solo dominio y positivos al otro.

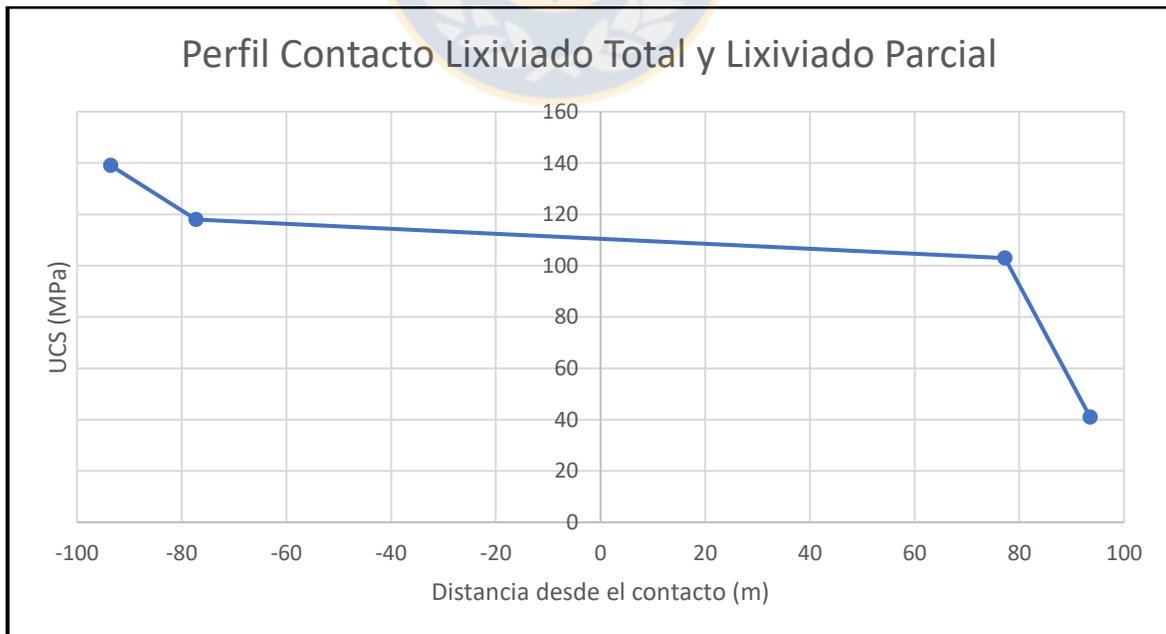


Figura 6.16. Perfil de contacto entre Lixiviado Total y Lixiviado Parcial

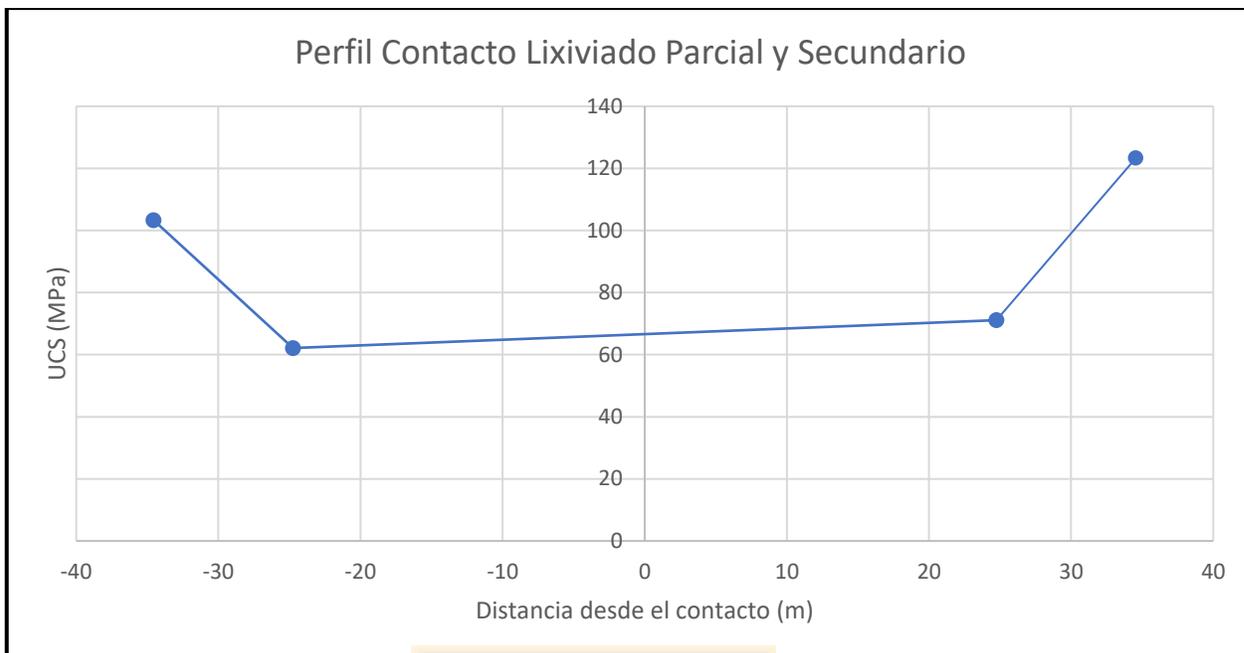


Figura 6.17. Perfil de contacto entre Lixiviado Parcial y Secundario

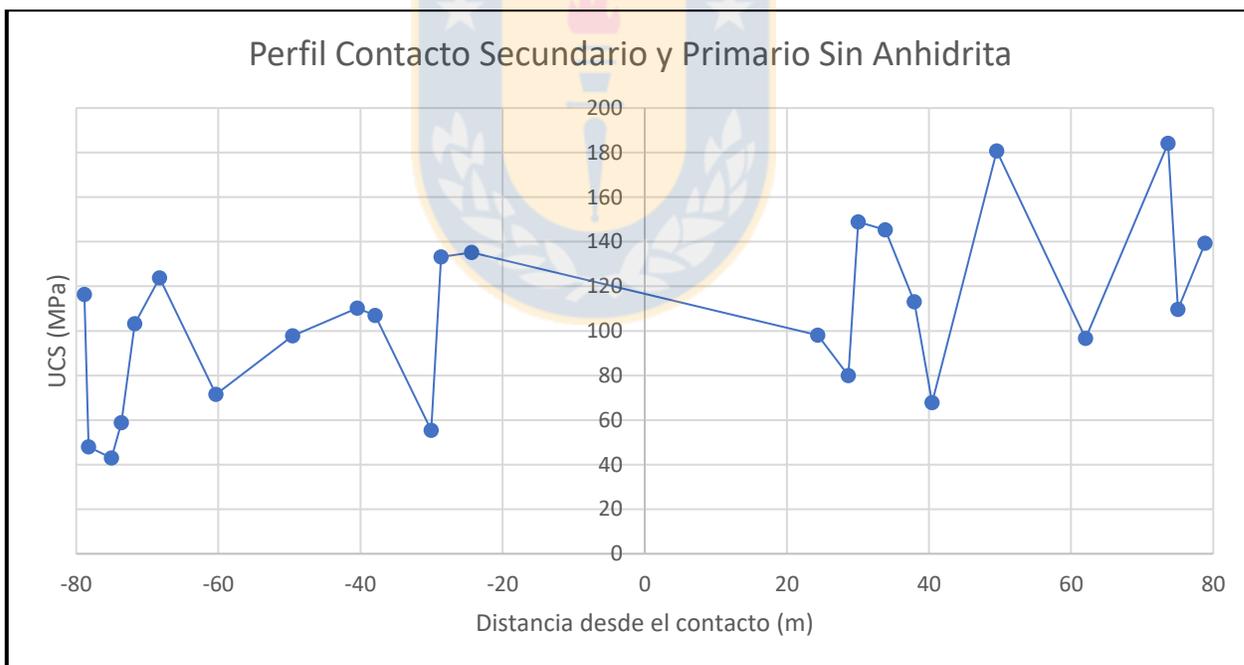


Figura 6.18. Perfil de contacto entre Secundario y Primario Sin Anhidrita

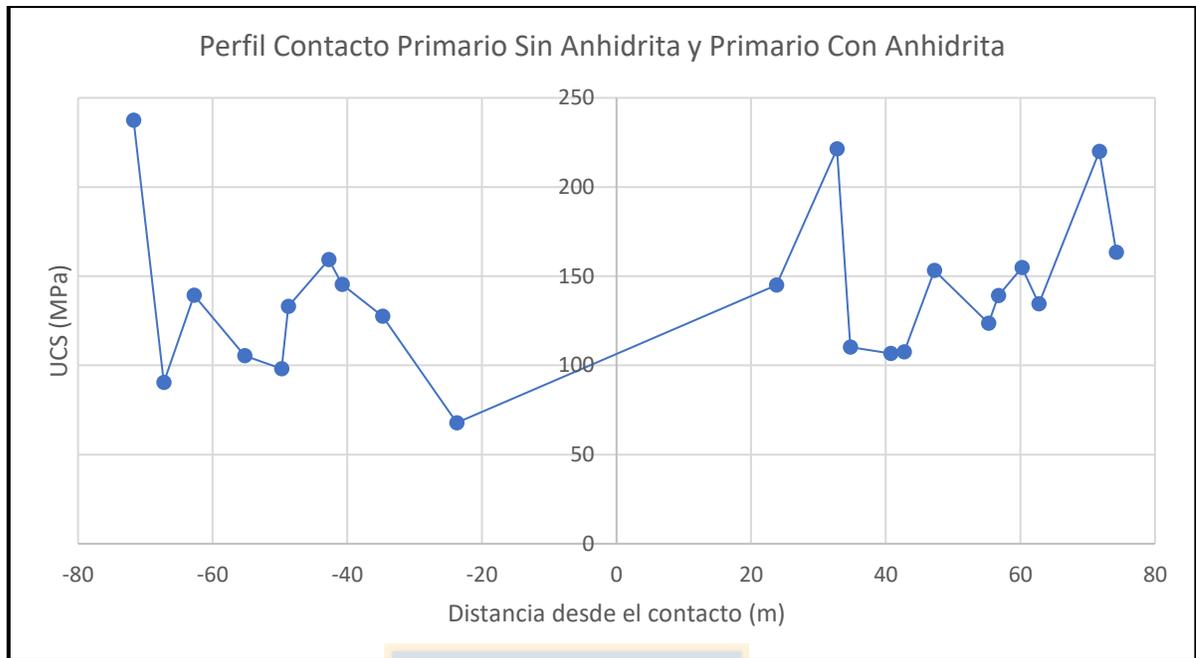


Figura 6.19. Perfil de contacto entre Primario Sin Anhidrita y Primario Con Anhidrita

Lamentablemente y tal como puede observarse en los perfiles de contacto, al haber un bajo número de muestras o bien, estar muy alejadas de las zonas de contacto, se hace difícil determinar la relación entre zonas minerales. Para el caso del Lixiviado Total y Parcial, para los primeros 80 metros del contacto solo existe una muestra a cada lado que tienen un valor similar y podrían ser correlacionables, aun así, a los pocos metros más allá aparecen muestras que niegan esta relación y no permiten determinar si en el contacto los valores entre ambas zonas son similares o no. Pasa lo mismo con el Lixiviado Total y Secundario. Para el caso del Secundario y Primario Sin Anhidrita, se puede ver una diferencia entre ambas zonas, con un aumento en el valor de resistencia a medida que se avanza hacia el primario. Lo anterior, es concordante en cuanto a los datos y geológicamente hablando, pero nuevamente la falta de datos y la gran desviación que existe entre ellos hace difícil un análisis mayor. Por último, entre el Primario Sin Anhidrita y el Primario Con Anhidrita el cambio es leve, aumentando los valores hacia el Primario Con Anhidrita, pero en general, manteniendo valores promedio entre ambas zonas.

Como las zonas minerales están agrupadas en Dominio Blando y Dominio Duro, hay que verificar también el comportamiento entre ambos (Figura 6.20). En este gráfico si es posible observar un

aumento de la resistencia de roca al pasar de un dominio a otro. Por lo tanto, podemos corroborar que los dominios fueron bien seleccionados debido a que si hay diferencias notorias entre ellos.

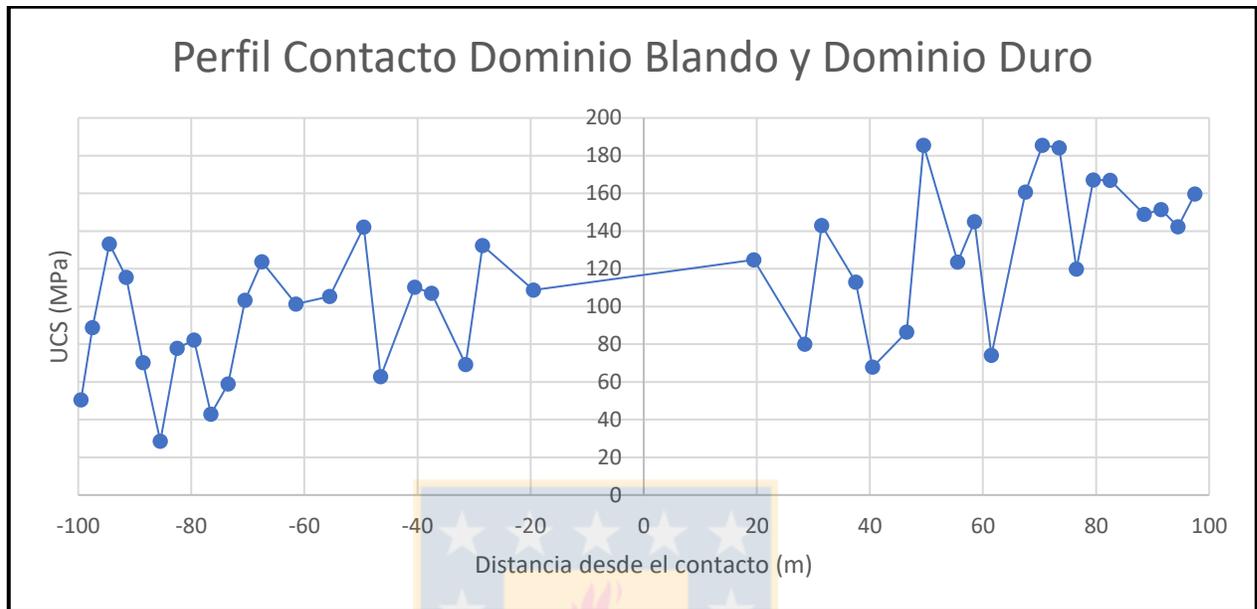


Figura 6.20. Perfil de contacto entre Dominio Blando y Dominio Duro

6.1.5. Control de Outliers

Los *outliers* corresponden a valores fuera de rango, es decir, valores que se alejan de la distribución normal de los datos. El impacto de estos valores al estimarlos de la misma forma que los demás es significativo, por lo que es importante tratarlos de manera distinta, ya sea truncándolos o restringiéndolos para evitar la sobreestimación local.

En la Figura 6.21., las zonas marcadas con líneas punteadas rojas marcan los valores *outliers* del Dominio Blando, tanto aquellos que representan los valores más bajos del dominio como los más altos. Los datos pueden ser tratados de acuerdo a su valor UCS o también de acuerdo al percentil en que están presentes. Para un manejo más rápido de los datos, en este dominio se restringirán los valores menores a 35 MPa y aquellos mayores a 150 MPa, eso sí, Vulcan 9.0.2. permite (al momento de hacer la estimación) sólo restringir los valores altos, por lo que estos serán restringidos a 50 metros para ambos dominios, es decir, su radio de influencia queda acotado a esta distancia.

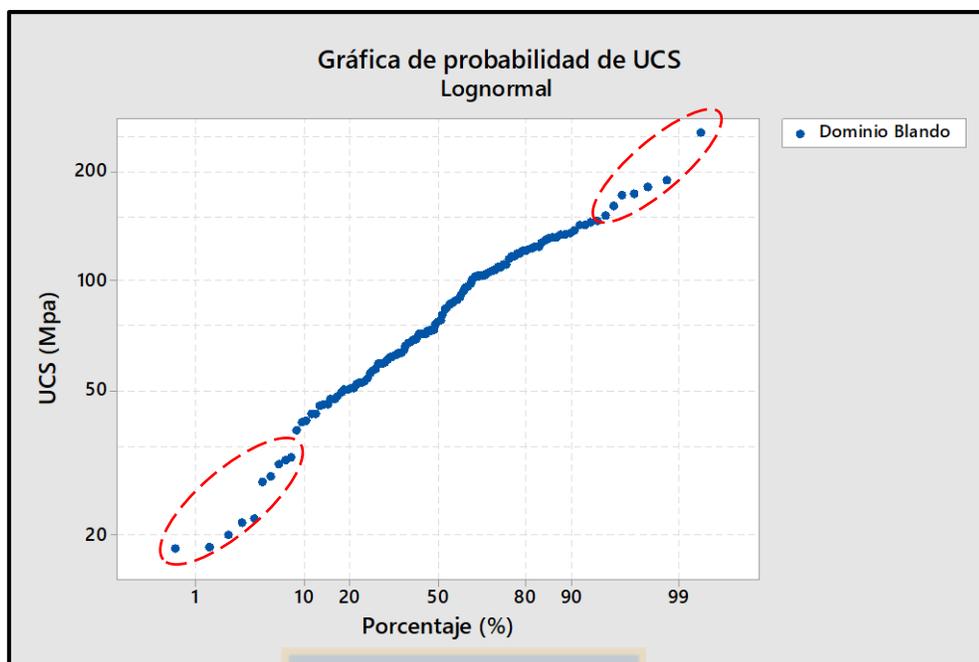


Figura 6.21. Valores outliers para el Dominio Blando (línea punteada roja)

En contraparte, los valores *outliers* del Dominio Duro se encuentran sobre los 200 MPa y bajo los 70 MPa, tal como lo indican las zonas punteadas rojas en el Figura 6.22.

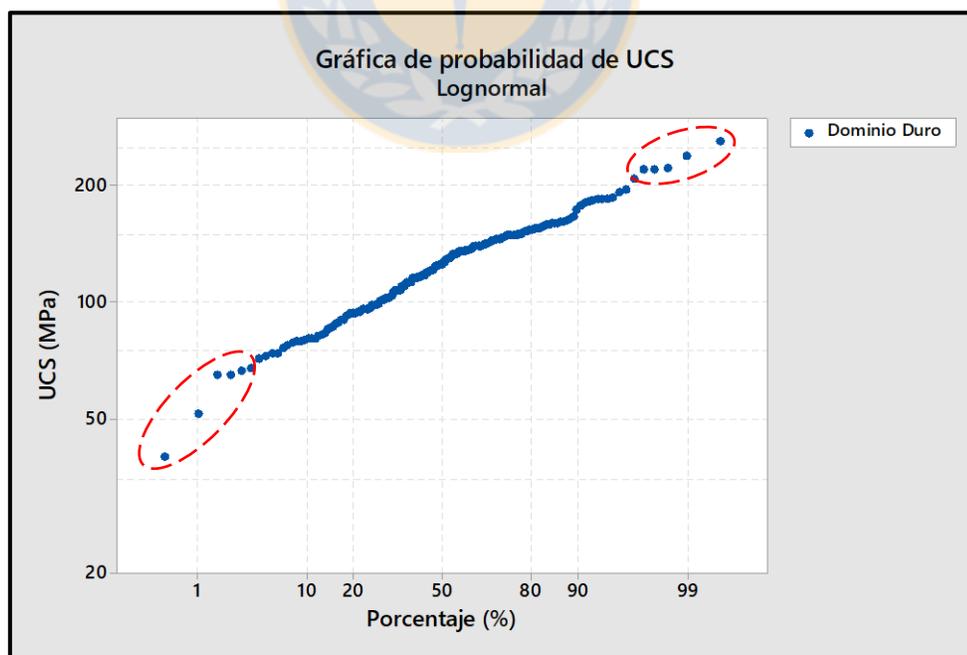


Figura 6.22. Valores outliers para el Dominio Duro (línea punteada roja)

6.1.6. Plan de Estimación

El plan de estimación es el mismo tanto para inverso a la distancia y kriging ordinario, siendo la diferencia entre ambos métodos la utilización de variogramas por parte del kriging. La Tabla 6.03. resume las variables que se integran a Vulcan 9.0.2. para estimar mediante ambos métodos.

Tabla 6.03. Tabla resumen Plan de Estimación

| Dominio | | Blando | | | Duro | | |
|--|----------------|---------------|----------|----------|-------------|--------|--------|
| Pasada | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Orientación de búsqueda | Bearing | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Plunge | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Dip | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Radio de búsqueda | Mayor | 150 | 500 | 750 | 150 | 500 | 750 |
| | Semi | 150 | 500 | 750 | 150 | 500 | 750 |
| | Menor | 150 | 500 | 750 | 150 | 500 | 750 |
| Discretización | X | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | Y | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | Z | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Muestras | Mín | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | Máx | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Seleccionar bloques por zona específica | | minzon | minzon | minzon | minzon | minzon | minzon |
| Valores de zona | | 2, 3 y 5 | 2, 3 y 5 | 2, 3 y 5 | 9 y 6 | 9 y 6 | 9 y 6 |

Esta configuración se suma a las obtenidas al analizar los datos *outliers*, restringiendo las muestras tal como se indicó. Además, para el caso del kriging ordinario, se utilizan los datos de los modelos variográficos de la Tabla 6.02.

Cabe destacar que para realizar la estimación es necesario un modelo de bloques. Este modelo fue entregado por MLP y tiene variada información, dentro de la cual se encuentra la zonificación por zonas minerales que fue ocupada tanto para la estimación por inverso a la distancia y kriging ordinario.

Por último y tal como se puede ver en la tabla, se realizaron tres pasadas para poblar el modelo de la mayor forma posible, estas pasadas corresponden al radio de búsqueda de una muestra para realizar la estimación. Cada pasada aumenta el radio de búsqueda, por lo que cada una de ellas

presenta una confiabilidad distinta en cuanto a la estimación de los datos, debido a que, a mayor radio de búsqueda, mayor es la distancia a la que se encuentran las muestras, estimando bloques entre ellas con un valor cercano a las muestras que encuentre en el radio. Por lo mismo, la pasada 1 tiene mayor confiabilidad que la 2 y ésta que la 3. El valor de la pasada 1 se calculó observando la distancia media entre las muestras, mientras que las pasadas 2 y 3 se ocuparon para poblar el modelo en su totalidad.

6.1.7. Estimación de los Modelos

Una vez listo el plan de estimación y los parámetros a ocupar, lo siguiente es realizar el proceso mediante Vulcan 9.0.2. Para esto, se configura el programa con los criterios antes mencionados. Algo a tener en cuenta es que ambos dominios se trabajaron individualmente, ocupando las zonas minerales como barrera para la estimación de las muestras que coincidían con cada una de las zonas, generando una superficie de contacto entre ambos. Otra cosa a tener consideración es que se trabajó también por separado para inverso a la distancia y para kriging, generando así los dos modelos.

Una vez que el programa finaliza el proceso, los bloques estimados fueron cortados ocupando el *pit* final para el año 2035, esto con el fin de sólo tener en los modelos los bloques de los cuales, en teoría, se extraerá material hasta el fin del proyecto. Por otro lado, aun realizando tres pasadas, hubo bloques que quedaron sin valor. A estos bloques se les otorgó el valor promedio del dominio para completar el modelo y que no quedaran espacios en blancos, utilizando para esto una cuarta pasada (que no se tendrá en cuenta a la hora de validar el modelo y tampoco se considerarán como un dato confiable a la hora de consultar los datos)

6.1.8. Validación de los Modelos

Existen varias formas de realizar la validación de un modelo y determinar si efectivamente los valores se ajustan a los que entregan las muestras que fueron estimadas. En esta investigación

fueron ocupadas tres tipos de validaciones (visual, estadística y gráficos de deriva), cada una se trató por separado, entregando información clave para definir que tan bien se realizó el proceso.

6.1.8.1. Validación Visual

Este tipo de validación tiene como fin verificar que las muestras se hayan estimado correctamente, observando los bloques aledaños a estas. Para poder lograr esto, se ocupa el *software* Vulcan 9.0.2. y se cargan en él el modelo y las muestras ocupadas. Una vez realizado el proceso anterior, se ocupa la misma leyenda (mismos colores) para las muestras y se determina si la estimación honra el valor de la muestra verificando que los bloques cercanos tengan el mismo color. En la Figura 6.23. y 6.24 se ejemplifica este tipo de validación (tanto en planta como en un perfil) para la estimación por inverso a la distancia (ID).

Como se observa en las figuras, los bloques aledaños a las muestras honran el valor de estas ya que tienen el mismo color (valor de UCS). En algunos casos al haber dos muestras de distinta UCS cerca, el bloque queda con el color del valor promedio de ambas muestras. Es así, como visualmente se puede determinar si la estimación se realizó de manera correcto.

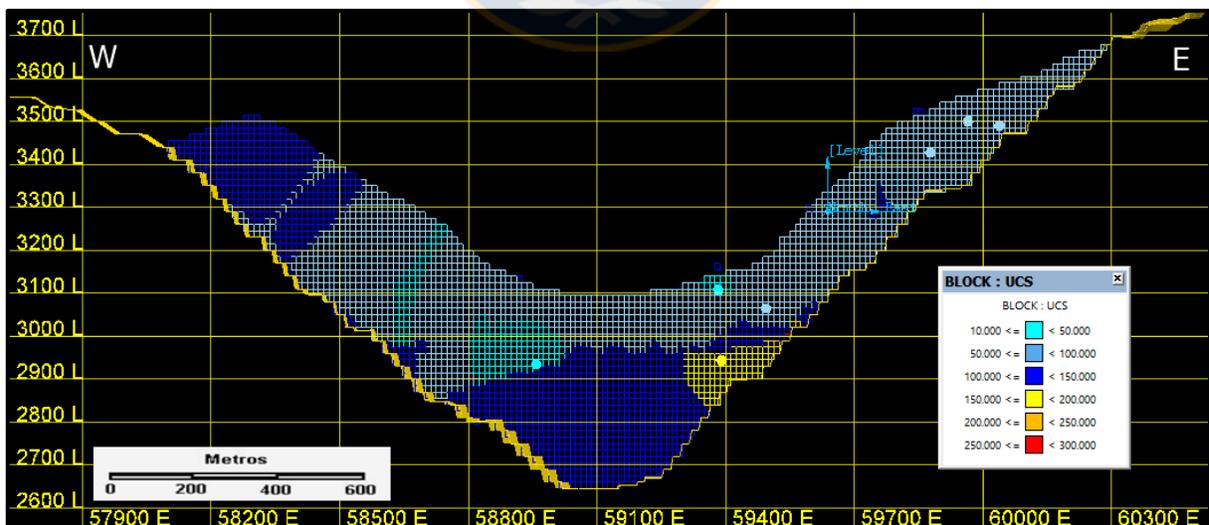


Figura 6.23. Validación visual del modelo de bloques en perfil sección 89.840 del modelo ID de UCS Puros. Los puntos de colores representan las muestras estimadas. La línea color mostaza corresponde al Pit Final de la mina.

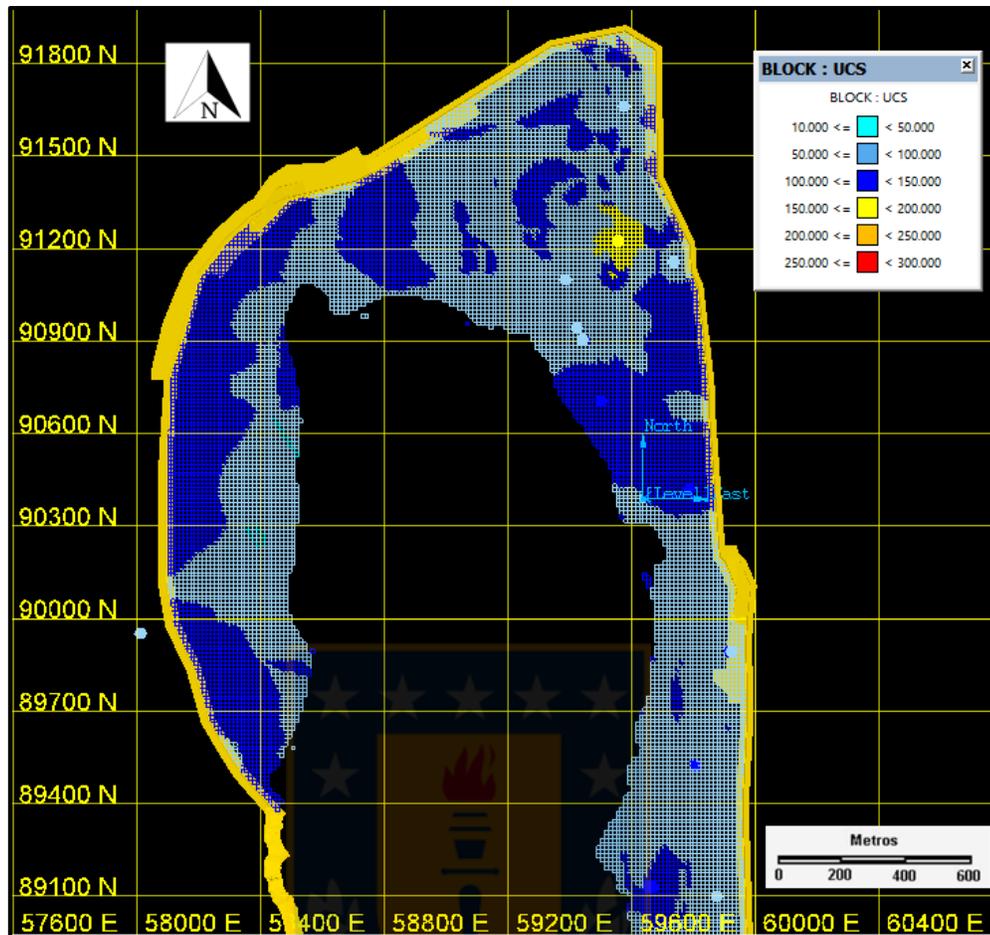


Figura 6.24. Validación visual del modelo de bloques en nivel 3.360 del modelo ID de UCS Puros. Los puntos de colores representan las muestras estimadas. La línea color mostaza del borde corresponde al Pit Final de la mina.

Los anexos 1 y 2 muestran las mismas secciones de las figuras 6.23. y 6.24., pero para la estimación por kriging ordinario, a modo de comparación. Así, se determina que ambos modelos cumplen con esta validación.

6.1.8.2. Validación Estadística

Otro tipo de validación, que ocupa los valores de los datos estimados, es la validación estadística. Este tipo de validación se utiliza para determinar cuanta es la diferencia entre los promedios de las muestras ocupadas y los bloques estimados por las mismas. Para esto se dividieron los datos por

zonas minerales (que son las que componen los dominios) para tener una mejor visualización de que tanto se acercan los valores estimados para estas zonas a las muestras utilizadas. Así también, los datos se dividieron por pasadas para saber cuál tiene valores más cercanos a las muestras y definir cuan precisas son. Lo primero entonces, es determinar el porcentaje que ocupa cada pasada en los modelos. Para esto se realizó un gráfico de torta que incluye el número de bloques (Figura 6.25.)

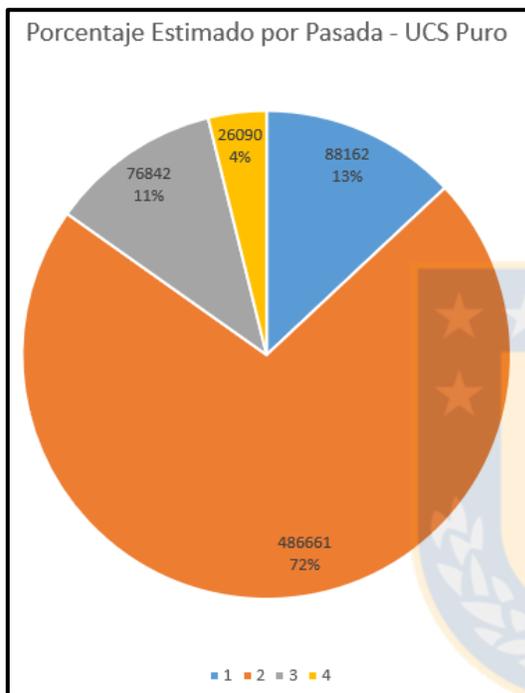


Figura 6.25. Porcentaje y número de bloques estimados por pasada en la estimación con datos UCS Puros

Al ocupar las mismas muestras y mismas zonas minerales, los gráficos de torta son iguales tanto para inverso a la distancia como para kriging ordinario, por lo mismo sólo fue necesario un gráfico. De este se puede rescatar que la pasada 4 alcanza solo el 4% del total de los bloques estimados, por lo que la pérdida de datos no es alta (estos datos no deben ser utilizados). Por otro lado, la pasada 2 es la que más porcentaje abarca (mayor al 70%), siendo esto de importancia al momento de ocupar los datos. Por último, la pasada 1, que corresponde a la pasada con menor radio de búsqueda (150 metros) tiene una menor proporción (esta pasada es la más confiable debido a su menor radio de búsqueda, por lo tanto, su porcentaje dentro de los bloques estimados es importante).

Una vez obtenidos los porcentajes por pasada, se grafican los valores promedios por zona mineral y pasada y se comparan con los valores de las muestras (Figura 6.26.).

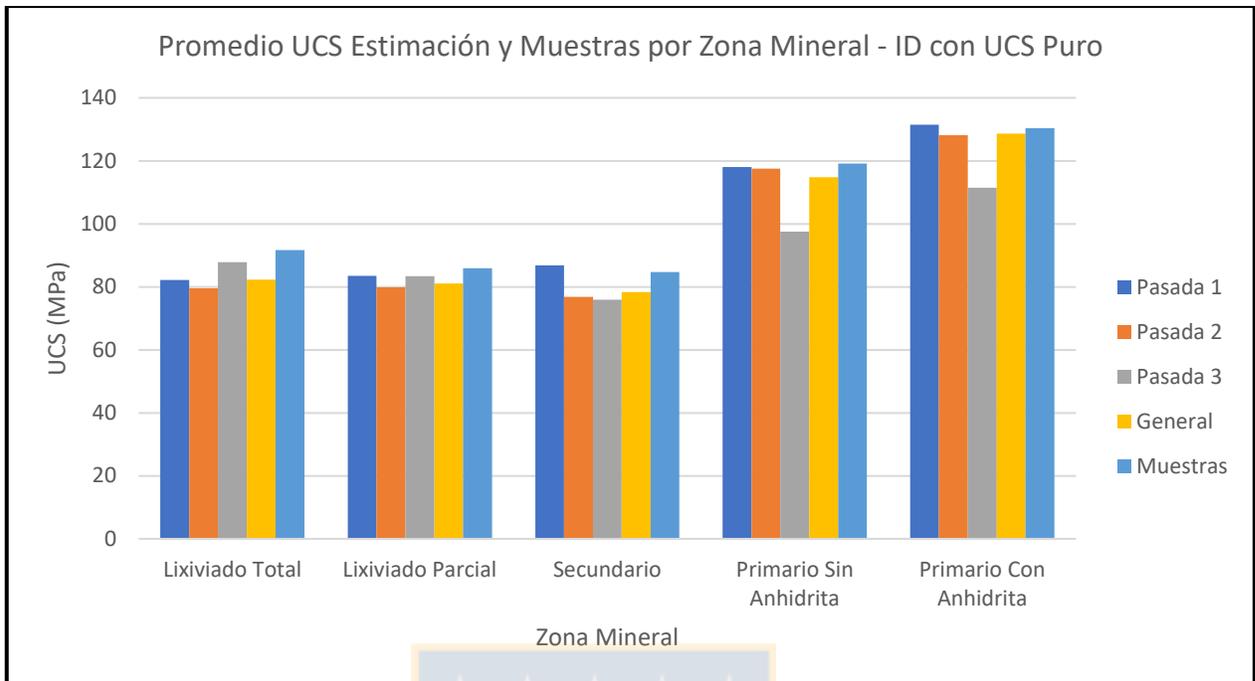


Figura 6.26. Promedio UCS estimado y Muestras por Zona Mineral y pasadas para la estimación por inverso a la distancia con los datos UCS Puros

Este tipo de gráficos es importante a la hora de tomar decisiones y ocupar los datos debido a que indica que pasada y que zona mineral acerca más sus valores a los datos reales. El Anexo 3 corresponde al gráfico para la estimación por kriging ordinario. Para ambos métodos de estimación la distribución de las columnas es distinta, por lo mismo, se debe tener esto en cuenta al momento de elegir el método a ocupar y, por otro lado, para determinar las zonas minerales y pasadas que honran mejor los datos.

A modo general, la estimación por kriging ordinario entrega valores promedios similares para las tres pasadas (salvo para las zonas primarias en donde la pasada 3 presenta valores más bajos). En contraparte, para el inverso a la distancia los valores promedios por pasada tienen a ser diferentes entre sí. Para ambos casos, la pasada 2 es la que más se acerca a los valores de las muestras, sobre todo en zona primaria, en donde también los valores generales se acercan más a los valores estimados, lo que es predecible debido al número de muestras de estas zonas minerales.

Lo importante de estos gráficos es verificar y determinar las diferencias entre el inverso a la distancia y el kriging ordinario, siendo la más importante el suavizado que otorga el kriging al promedio de los datos, sobre todo en zonas minerales superiores (donde hay menos datos).

6.1.8.3. Gráficos de Deriva

El último método de validación corresponde a los gráficos de deriva. Esta validación tiene como fin ver la distribución de los promedios de los bloques estimados y las muestras, pero esta vez dividiendo el modelo por secciones este-oeste, norte-sur y por cota. Con lo anterior, es posible determinar en qué dirección o posición los valores concuerdan de mejor manera con las muestras de ese mismo sector y, de forma contraria, ver en qué lugar estos valores tienen menos confiabilidad.

La Figura 6.27. muestra los gráficos de deriva para la estimación por inverso a la distancia. Este tipo de gráficos permiten también, observar la variabilidad de los datos y como se distribuyen en las tres direcciones. El Anexo 4 presenta los gráficos resultantes de los datos estimados por kriging ordinario.

Comparando ambos métodos, no hay mucha diferencia entre los valores obtenidos por inverso a la distancia y kriging ordinario, solamente una leve suavización de los datos en el caso del kriging, pero no tan notorio como en los gráficos de la validación estadística.

Algo importante que resalta a simple vista, es que, para el caso de los gráficos este-oeste, los valores estimados se ajustan más a las muestras en la parte central del yacimiento, siendo mayor el rango de diferencia para las periferias. Esto es concordante con que en el centro del yacimiento hay un mayor número de muestras, por lo que los valores tienden a ser similares. Para el caso de los gráficos por cota, también se produce algo esperable, y es que en las cotas inferiores el valor de resistencia es más alto que en las cotas superiores, reafirmando que en las zonas primarias existe una mayor resistencia que en el secundario y los lixiviados (en donde se mantiene un valor promedio cercano a los 100 MPa).

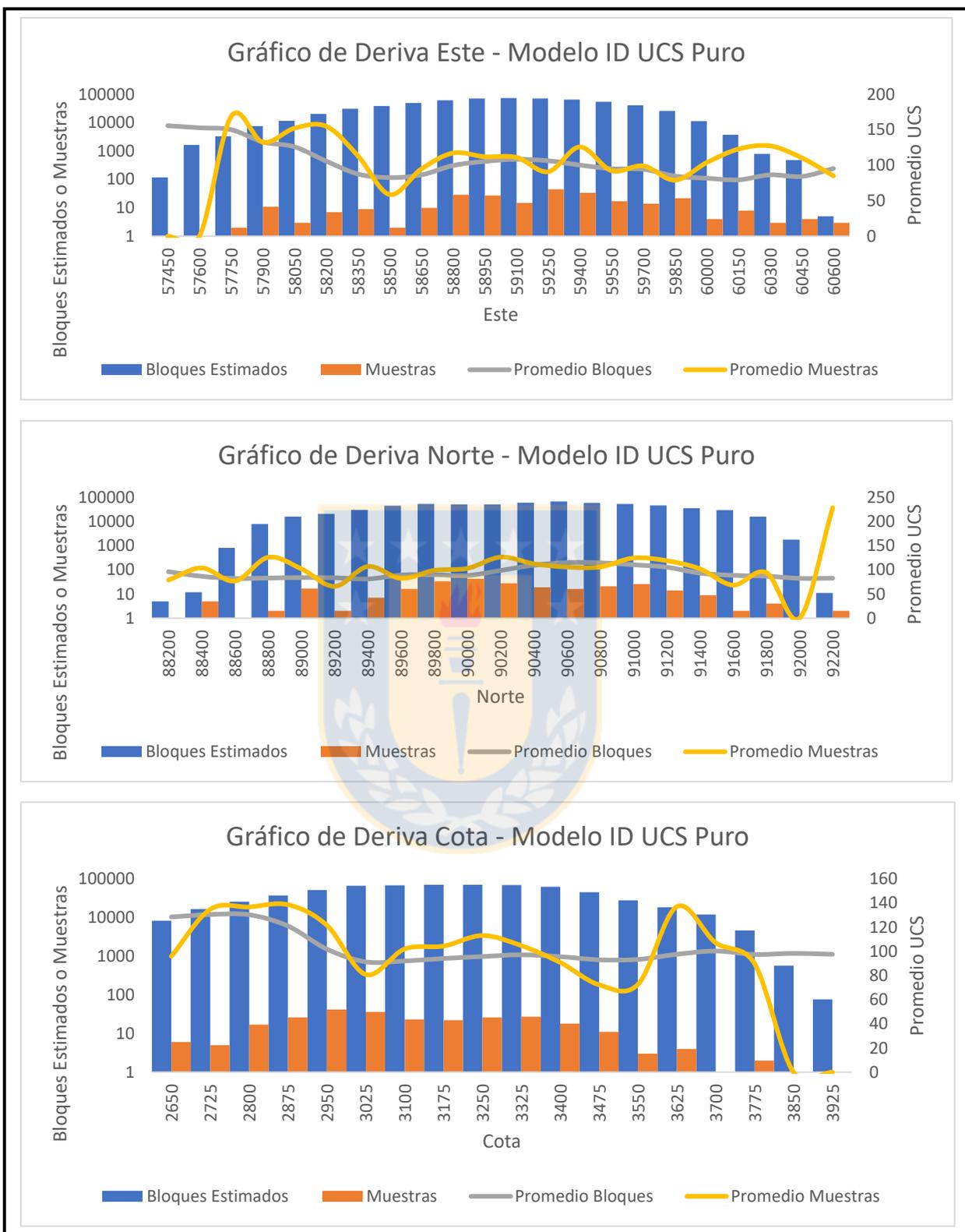


Figura 6.27. Gráficos de deriva del modelo ID con datos UCS Puros

Todas las validaciones anteriores son necesarias para poder determinar que tan bien fueron hechas las estimaciones y como se relacionan los valores estimados con los valores reales.

6.2. MODELAMIENTO CON DATOS UCS+PLT

De la misma forma que para la base de datos UCS Puros, lo primero que se debe hacer es filtrar la información. Como la base de datos anterior se filtró de acuerdo con ensayos que rompían por matriz, también se usaran para la base de datos PLT sólo las muestras que rompieron de dicha forma. La base de datos entregada por Minera Los Pelambres ya cuenta con el $I_{s(50)}$ calculado, por lo que no es necesario volver a hacer el procedimiento. Aun así, se revisaron las fórmulas ocupadas y que los cálculos fuesen los correctos para que no hubiese un error sistemático al momento de ocupar los datos. Al filtrar la base se cuenta con 1.979 datos divididos por UGT con coordenadas X, Y, Z, y su valor $I_{s(50)}$ correspondiente.

Como los ensayos de carga puntual son un tipo de ensayo rápido, de terreno y que no se realiza bajo las mismas condiciones y normas que un ensayo UCS, es normal que muchos de los resultados induzcan a error. Es por lo anterior que para tener un mejor manejo de ellos y no generar errores al momento de estimar o calcular el factor de conversión a UCS, se decidió truncar los valores obtenidos, ocupando por UGT aquellos valores que se encontraran dentro del rango promedio \pm desviación estándar. Es de esta forma como la base de datos final quedó compuesta con el número de ensayos que se indica en la Tabla 6.04.

Tabla 6.04. Número de ensayos PLT válidos por cada UGT

| UGT | UGT-1 | UGT-2 | UGT-3 | UGT-4 | UGT-5 | UGT-6 | UGT-7 | UGT-8 | UGT-9 | UGT-10 | UGT-11 | UGT-12 | Total |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| N° de ensayos | 684 | 101 | 170 | 70 | 30 | 97 | 78 | 32 | 113 | 16 | ---- | 50 | 1.441 |

6.2.1. Relación entre UCS y PLT

De acuerdo a bibliografía y según varios autores, existe un factor, para determinadas rocas y condiciones que relaciona los valores obtenidos mediante el ensayo PLT con los obtenidos mediante UCS, valor que generalmente varía en un rango de 18 a 24, utilizándose este último, postulado por Bieniawski (1975), la mayoría de las veces para hacer la correlación.

En la práctica, la utilidad mayor de esto es poder ahorrar tiempo y costos, ocupando un ensayo que se puede realizar en terreno y que es mucho más rápido, frente a otro de laboratorio que necesita mayor tiempo y recursos. Aun así, en la teoría, la relación entre PLT y UCS no es fácil de determinar, dependiendo de varios factores y no siempre entregando resultados que se ajusten a los esperados.

Con la nueva base de datos obtenida para los datos PLT, se procede a calcular el factor para las distintas UGT. Para esto se consideraron los promedios para cada UGT, tanto UCS como PLT y se determina el factor realizando la división entre ambos. Esta forma de calcular el factor es una de las muchas formas de calcularlo, ya que no existe un factor fijo y, nuevamente, dependiendo del autor, del número de ensayos, tipo de roca u otros factores, puede variar. Por lo mismo, hay que buscar el que más se ajuste a los datos que se tienen. En la Tabla 6.05. se resumen los números de datos junto al promedio de estos y el factor calculado para cada UGT.

Tabla 6.05. UCS y $I_{s(50)}$ promedio por UGT, con respectivo número de datos y factor entre ambos.

| | UCS Promedio | N° datos UCS | $I_{s(50)}$ Promedio | N° datos PLT | Factor |
|--------|--------------|--------------|----------------------|--------------|--------|
| UGT 1 | 129,4 | 107 | 8,8 | 684 | 14,7 |
| UGT 2 | 114,1 | 17 | 6,5 | 101 | 17,4 |
| UGT 3 | 85,9 | 40 | 2,1 | 170 | 40,4 |
| UGT 4 | 122,1 | 8 | 8,6 | 70 | 14,1 |
| UGT 5 | 92,9 | 4 | 6,9 | 30 | 13,4 |
| UGT 6 | 132,3 | 15 | 2,2 | 97 | 60,3 |
| UGT 7 | 110,5 | 5 | 8,2 | 78 | 13,4 |
| UGT 8 | 86,5 | 2 | 1,1 | 32 | 75,5 |
| UGT 9 | 91,5 | 29 | 2,1 | 113 | 44,4 |
| UGT 10 | 88,0 | 2 | 1,7 | 16 | 51,9 |
| UGT 12 | 83,4 | 48 | 1,7 | 50 | 58,2 |

A primera vista, los factores no se correlacionan entre sí, siendo en algunos casos mucha la diferencia entre ellos. Por lo anterior, es necesario analizar los datos y determinar por qué algunos valores presentan un factor similar mientras que otros se comportan de manera distinta, con valores muy altos.

Para el caso de la UGT-1, UGT-4 y UGT-7, estas presentan valores similares cercanos a 14 (un valor que se encuentra entre los rangos de literatura). Espacialmente, que estas UGT presenten un factor similar es concordante debido a que son las que se encuentran en la parte inferior de la mina, por lo que en primera instancia los factores calculados podrían ser ocupados para estas UGT.

Una forma de verificar si los factores se ajustan y generan valores UCS desde PLT concordantes con la realidad es multiplicar los valores $I_{s(50)}$ por el factor y revisar los valores. Si el rango de valores es concordante con el rango de valores UCS entonces el factor funciona (al menos en primera instancia). Para determinar esto se utilizaron parámetros UCS definidos por Geotecnia MLP.

Con estos parámetros, se tiene el rango de valores UCS para cada UGT, que debería ser concordante al rango que se obtiene al multiplicar los $I_{s(50)}$ por el factor. En ese sentido, las UGT que presentan datos similares o con un rango no tan lejano al real son las UGT: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 y 12. Excluyendo así las UGT: 6, 8 y 10. Cabe destacar que las UGT 8 y 10 son las que tienen menos datos UCS, por lo mismo es de esperarse que los valores no coincidan.

Aun excluyendo algunas UGT y dejando las que coinciden los rangos de valores con los datos UCS, es necesario determinar por qué algunas UGT funcionan y otras no. Una forma decisiva es observar la relación espacial de los datos que se están comparando, es decir, visualizar mediante un *software* (en este caso Vulcan 9.0.2.) los datos UCS y $I_{s(50)}$ y verificar que estos se encuentren en la misma zona y no alejados unos con otros, ya que de ese modo se estarían comparando valores que no tienen ninguna relación. Las figuras 6.28. y 6.29. muestran un ejemplo de esto, para un caso donde las muestras tienen relación y otro caso en donde no.

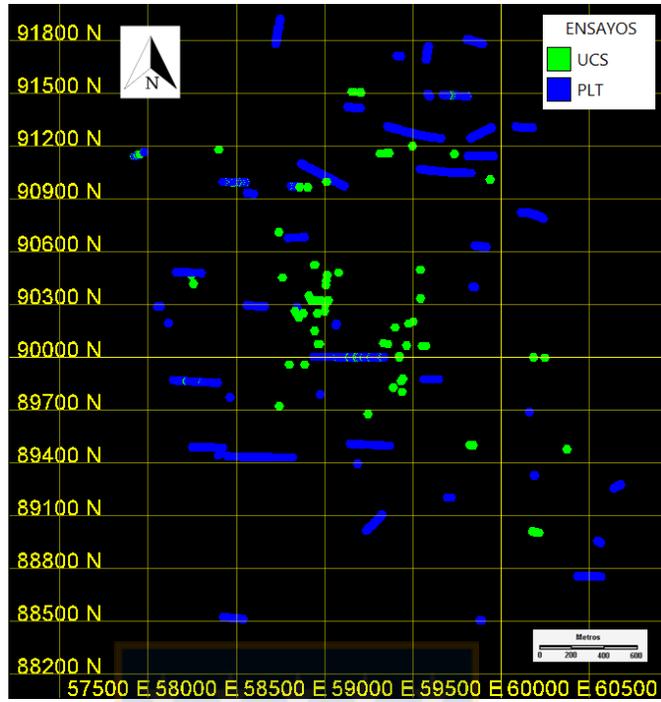


Figura 6.28. Ensayos UCS y PLT en UGT-1. Para este caso la distribución es similar

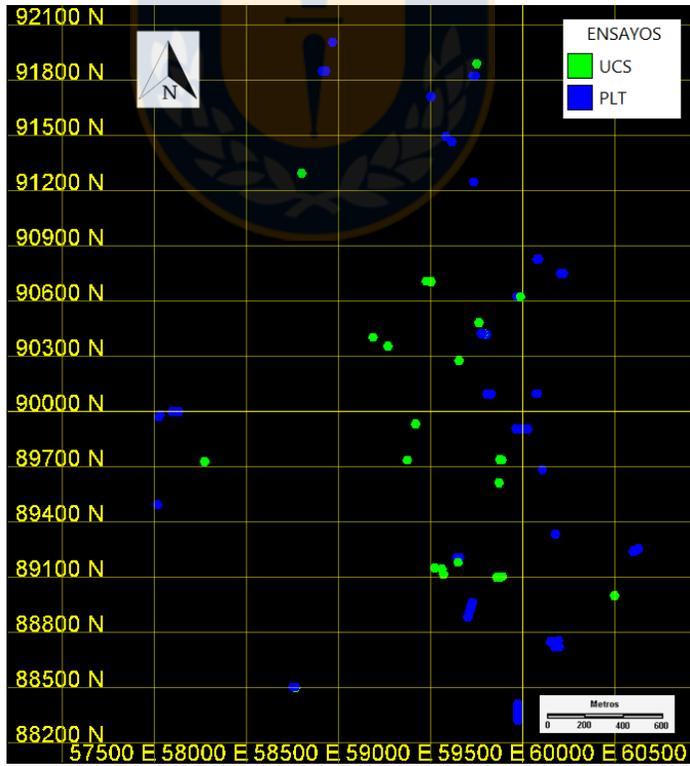


Figura 6.29. Ensayos UCS y PLT en UGT-9. Para este caso la distribución de las muestras no coincide

Como se observa en las figuras, la distribución de las muestras UCS y PLT de la UGT-1 es similar (pese a la diferencia en el número de muestras). La vista en planta permite observar que muestras UCS y PLT comparten testigos y que se distribuyen en el mismo espacio. Caso contrario a la UGT-9 donde las muestras UCS se distribuyen en el centro de la mina, mientras que los ensayos PLT en las periferias de este, por lo anterior, no es correcto relacionar ambos ensayos.

Caso similar a la UGT-9 son las UGT 3, 6, 8, 10 y 12 en donde no existe relación (caso UGT 8 y 10 por el bajo número de ensayos UCS), precisamente las UGT con los factores más altos. Para el caso de las UGT 2, 4, 5 y 7, que tienen un factor similar a la UGT-1 se hace complicado el análisis de correlación espacial por el hecho de que son muy pocas muestras UCS. Para determinar si el factor calculado puede ser ocupado para estas UGT se debe analizar los valores de acuerdo con la geología del yacimiento.

De acuerdo la Figura 4.02. (Capítulo 3, Geología del Yacimiento (MLP)) que muestra las UGT en profundidad, las UGT 2, 4, 5 y 7 se relacionan espacialmente con la UGT-1, sobre todo las UGT 4 y 7. Estas comparten el hecho que se encuentran bajo el techo de anhidrita y corresponden a las UGT más profundas del yacimiento. Otra característica similar es que las tres tienen muy buena calidad geotécnica, por lo tanto, no es erróneo que estas UGT tengan factores de conversión entre UCS-PLT parecidos (cercano a 14). Con respecto a la UGT-2, al igual que la UGT-1 corresponde a roca primaria, la única diferencia es que se encuentra sobre el techo de anhidrita, por lo que su resistencia es menor pero similar (lo que se ve reflejado en la Tabla 6.05.). De acuerdo con los análisis UGT se determinó que cercano al contacto entre ambas UGT la resistencia es similar, pero esta disminuye a medida que la UGT-2 se acerca a la superficie. Por lo mismo, y dado que los ensayos PLT se distribuyen a lo largo de toda la UGT, es normal que el valor $I_{S(50)}$ sea menor que la UGT-1, dando como resultado que el factor sea mayor. Por último, la UGT-5, que tiene un factor también similar a las UGT 1, 4 y 7 se encuentra sobre la UGT-4 y corresponde, en general, a la misma litología, diferenciándose entre sí en que la UGT-5 se encuentra sobre y bajo el techo de anhidrita, y de que su calidad geotécnica es mala a regular. Por lo tanto y relacionando estas dos UGT se mantiene el factor de la UGT-5, siendo ésta junto a las UGT 1, 2, 4 y 7 de las cuales se agregarán los datos PLT a la base de datos UCS.

Por lo anterior, los factores para las UGT 1, 2, 4, 5 y 7 quedan definidos como 14.7, 17.4, 14.1, 13.4 y 13.4 respectivamente. Estos valores se multiplican con los valores $I_{s(50)}$ de cada UGT y se agregan a la base de datos UCS, aumentando el número de datos por UGT, como se observa en la Tabla 6.06.

Tabla 6.06. Número de ensayos UCS más ensayos PLT transformados por cada UGT

| UGT | UGT-1 | UGT-2 | UGT-3 | UGT-4 | UGT-5 | UGT-6 | UGT-7 | UGT-8 | UGT-9 | UGT-10 | UGT-11 | UGT-12 | Total |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| N° de ensayos | 791 | 118 | 40 | 78 | 34 | 15 | 83 | 2 | 29 | 2 | 12 | 48 | 1252 |

6.2.2. Análisis Exploratorio de datos (EDA) y Definición de dominios

Tal como se hizo para la base de datos UCS Puros, es necesario establecer dominios de estimación ocupando gráficos de probabilidad y desviación estándar versus promedio (Anexo 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12). Al igual que para los datos UCS Puros, el mejor criterio para generar los dominios fue la zona mineral (figuras 6.30. y 6.31.).

A diferencia del gráfico de probabilidad de UCS Puros, cuando se agregan los datos de PLT existe una separación marcada entre las zonas primarias. Aun cuando presentan una tendencia similar al final de las líneas, más del 80% de los datos presentan comportamientos diferentes. Por lo mismo, y ya que corresponden a zonas minerales distintas y a que por criterio geológico presentan características distintas, para el caso de UCS+PLT las zonas minerales primarias se separan formando dos dominios de estimación separados.

Dado lo anterior, los dominios para los datos UCS+PLT corresponden a Dominio Duro (Primario Con Anhidrita), Dominio Intermedio (Primario Sin Anhidrita) y Dominio Blando (Secundario, Lixiviado Parcial y Lixiviado Total).

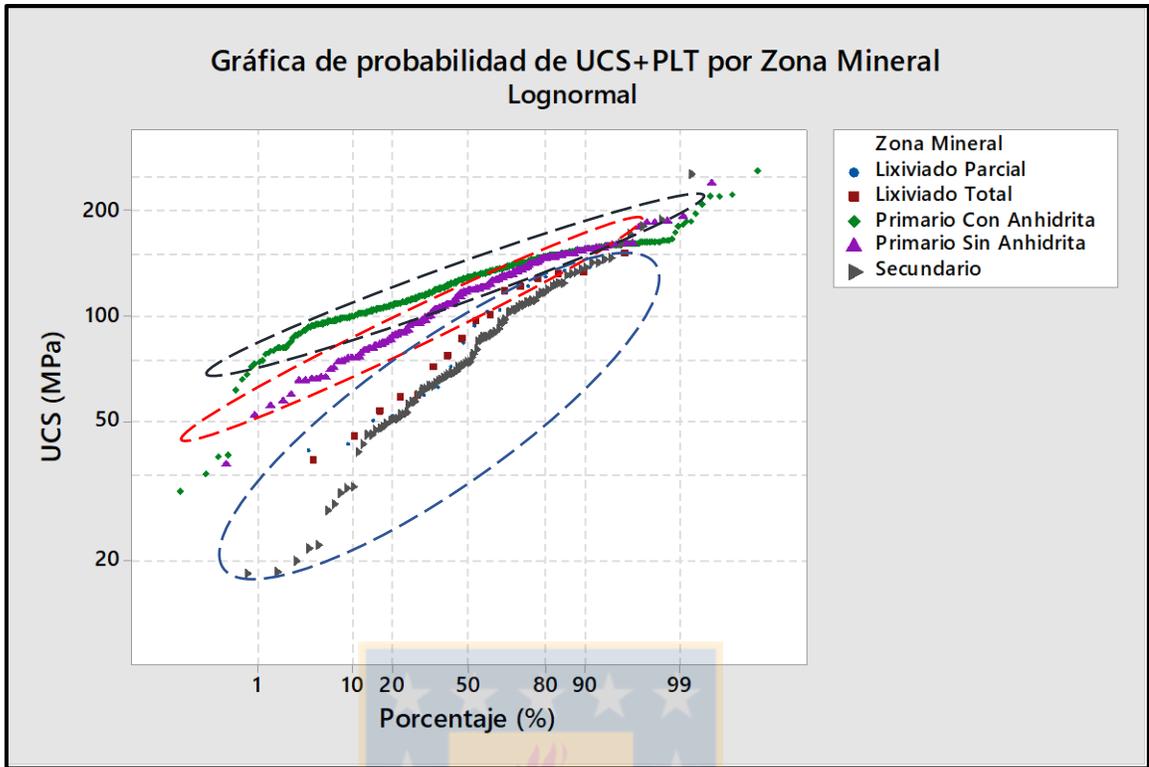


Figura 6.30. Probabilidad de UCS por Zona Mineral



Figura 6.31. Desviación estándar versus promedio de las distintas zonas minerales

6.2.3. Estadísticas por Dominio

Igual que para los dominios generados para los datos UCS Puros, para los datos UCS+PLT se evalúa el comportamiento de los tres dominios generados

Para el Dominio Blando, compuesto por Secundario, Lixiviado Parcial y Lixiviado Total, el número de muestras es de 131, con un promedio de resistencia de roca de 86,1 MPa y una desviación estándar de 40,4. En la Figura 6.32. se observa la distribución de los datos del dominio.

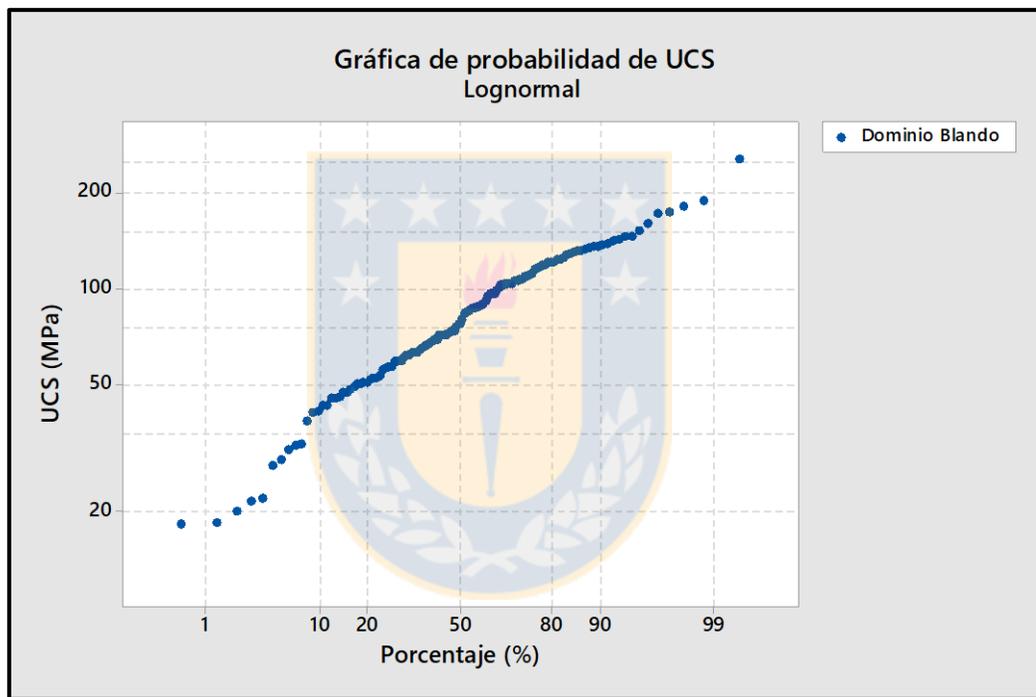


Figura 6.32. Probabilidad de UCS por Dominio Blando

Para el Dominio Intermedio, compuesto por el Primario Sin Anhidrita, las muestras son 184, con un promedio UCS de 115,4 y una desviación estándar de 31,3. En la Figura 6.33. se muestra la distribución de datos de este dominio.

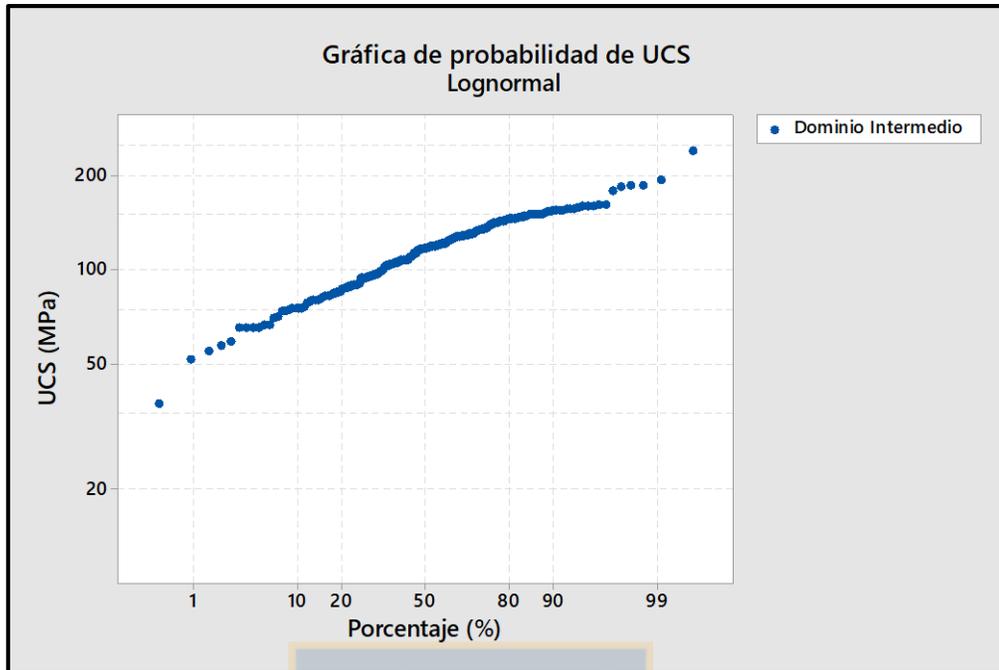


Figura 6.33. Probabilidad de UCS por Dominio Intermedio

Por último, el Dominio Duro, compuesto por el Primario Con Anhidrita, tiene 935 muestras, con un promedio de resistencia de roca de 127,1 MPa y una desviación estándar de 22,79. La distribución de los datos del dominio se muestra en la Figura 6.34.

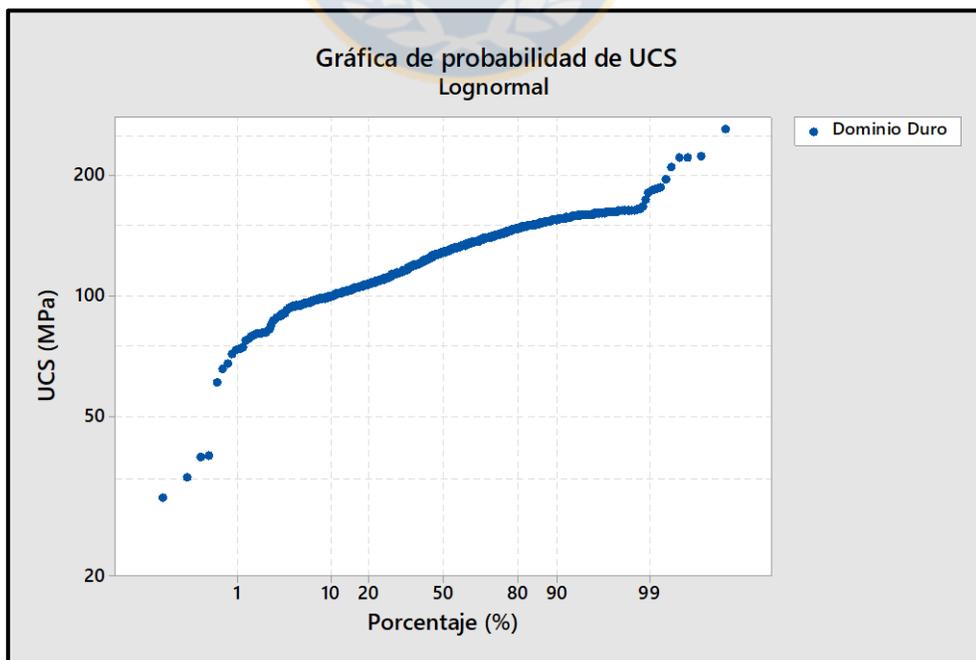


Figura 6.34. Probabilidad de UCS por Dominio Duro

6.2.4. Correlación Espacial

Nuevamente, para poder estimar mediante kriging ordinario es necesario la realización de variogramas. En este caso, con los datos UCS+PLT, se generaron variogramas en tres direcciones ortogonales (0-0, 0-90 y 90-0) con distancia de paso de 50 metros y tolerancia de 30 para los tres dominios definidos (Anexo 13, 14 y 15). El resumen de los variogramas se muestra en la Tabla 6.07.

Tabla 6.07. Tabla resumen con valores de correlogramas para los tres dominios

| Dominio | Elipsoide de búsqueda | | | Dirección (dip/dipdir) | Efecto Pepita | Primera Estructura | | | Segunda Estructura | | |
|------------|-----------------------|----|----|------------------------|---------------|--------------------|------|-------|--------------------|------|-------|
| | Rotación Vulcan | | | Mayor | | Sill | Tipo | Rango | Sill | Tipo | Rango |
| | Z° | X° | Y° | Semi-mayor Menor | | | | | | | |
| Blando | 0 | 0 | 0 | 00/00 | 0,1 | 0,5 | sph | 30 | 0,4 | sph | 300 |
| | | | | 00/90 | | | | 10 | | | 30 |
| | | | | 90/00 | | | | 10 | | | 30 |
| Intermedio | 0 | 0 | 0 | 00/00 | 0,2 | 0,5 | sph | 250 | 0,3 | sph | 500 |
| | | | | 00/90 | | | | 10 | | | 100 |
| | | | | 90/00 | | | | 60 | | | 220 |
| Duro | 0 | 0 | 0 | 00/00 | 0,3 | 0,55 | sph | 120 | 0,15 | sph | 720 |
| | | | | 00/90 | | | | 30 | | | 360 |
| | | | | 90/00 | | | | 30 | | | 320 |

6.2.5. Análisis de Contacto

Las figuras del Anexo 16, 17, 18 y 19, muestran el análisis de Contacto para las distintas zonas minerales. Como era de esperarse, la baja cantidad de muestras para las zonas minerales superiores (lixiviados y secundario) hace difícil el análisis, de la misma manera que cuando se analizan los datos UCS Puros. Aun así, es posible observar un aumento en la resistencia de roca al pasar del Secundario al Primario Sin Anhidrita y del Primario Sin Anhidrita al Primario Con Anhidrita, justamente los límites de los dominios Blando, Intermedio y Duro.

Por otro lado, al analizar los perfiles de contacto de los tres dominios (figuras 6.35. y 6.36) se nota un aumento progresivo de los valores de resistencia de roca entre el Dominio Blando y el Dominio Intermedio, mientras que, para las zonas primarias, existe un pequeño aumento hacia el Primario Con Anhidrita, pero en general, cercano a la zona de contacto los valores son similares. Lo anterior se debe a que el contacto entre ambas zonas corresponde al techo de anhidrita, zona de transición que presenta valores UCS similares entre los límites de las zonas primarias.

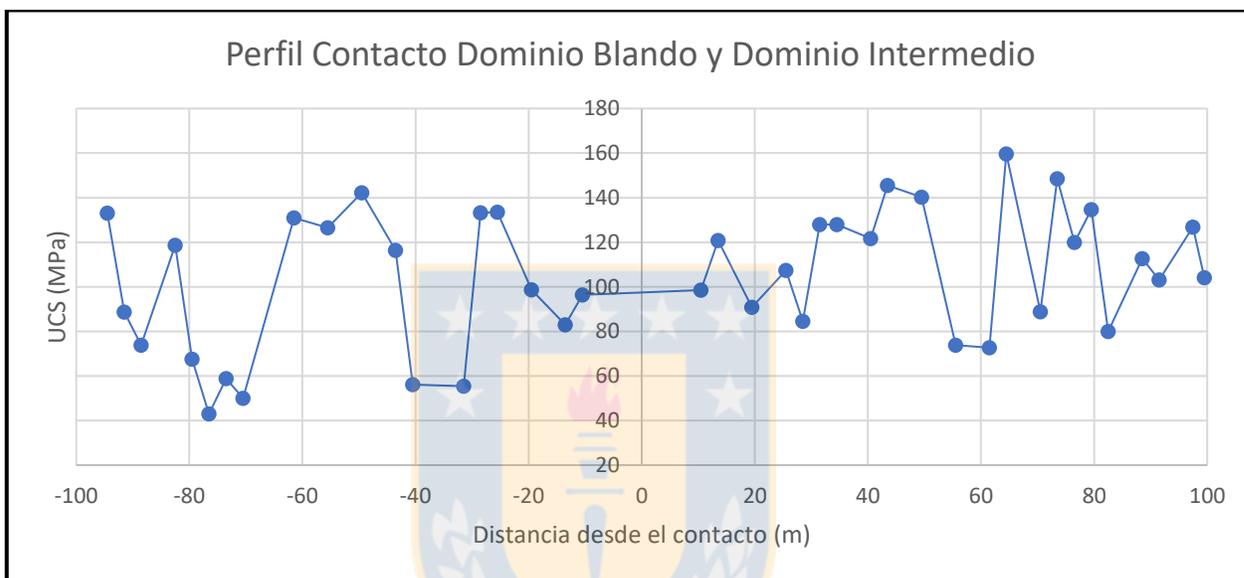


Figura 6.35. Perfil de contacto entre Dominio Blando y Dominio Intermedio

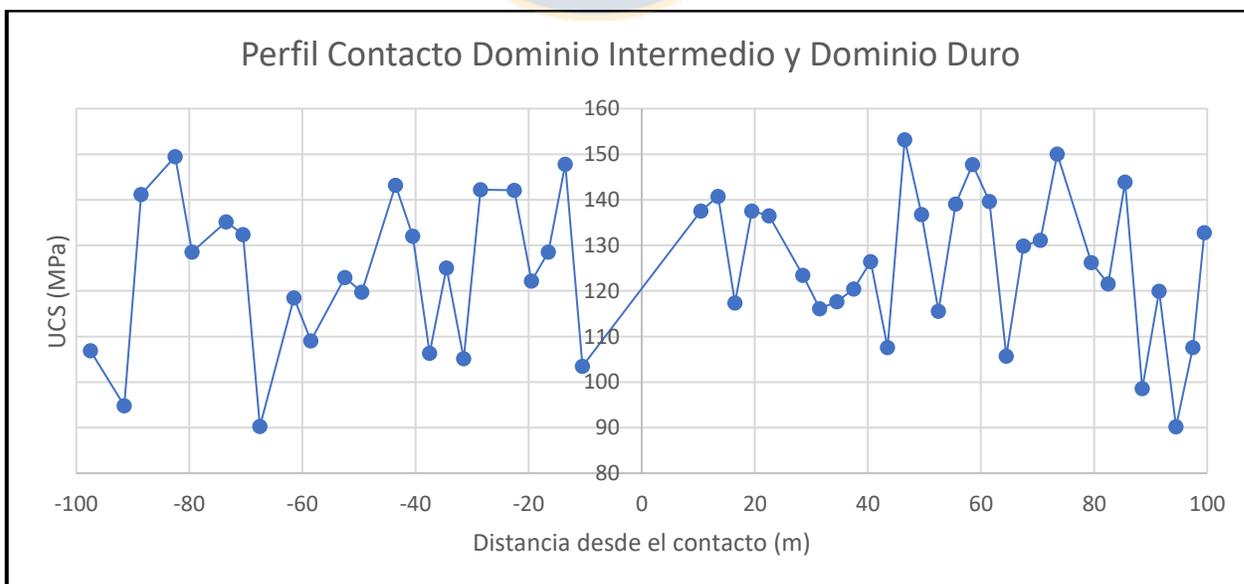


Figura 6.36. Perfil de contacto entre Dominio Intermedio y Dominio Duro

6.2.6. Control de Outliers

Los valores *outliers* se restringieron de igual manera que en las estimaciones por UCS Puros, es decir, a 50 metros. De acuerdo a las figuras 6.37., 6.38. y 6.39, para el Dominio Blando los valores *outliers* corresponden a aquellos bajo los 35 MPa y sobre los 150 MPa, para el Dominio Intermedio estos valores son bajo 65 MPa y sobre 170 MPa y, por último, los valores *outliers* del Dominio Duro corresponden a aquellos bajo los 60 MPa y sobre los 190 MPa.

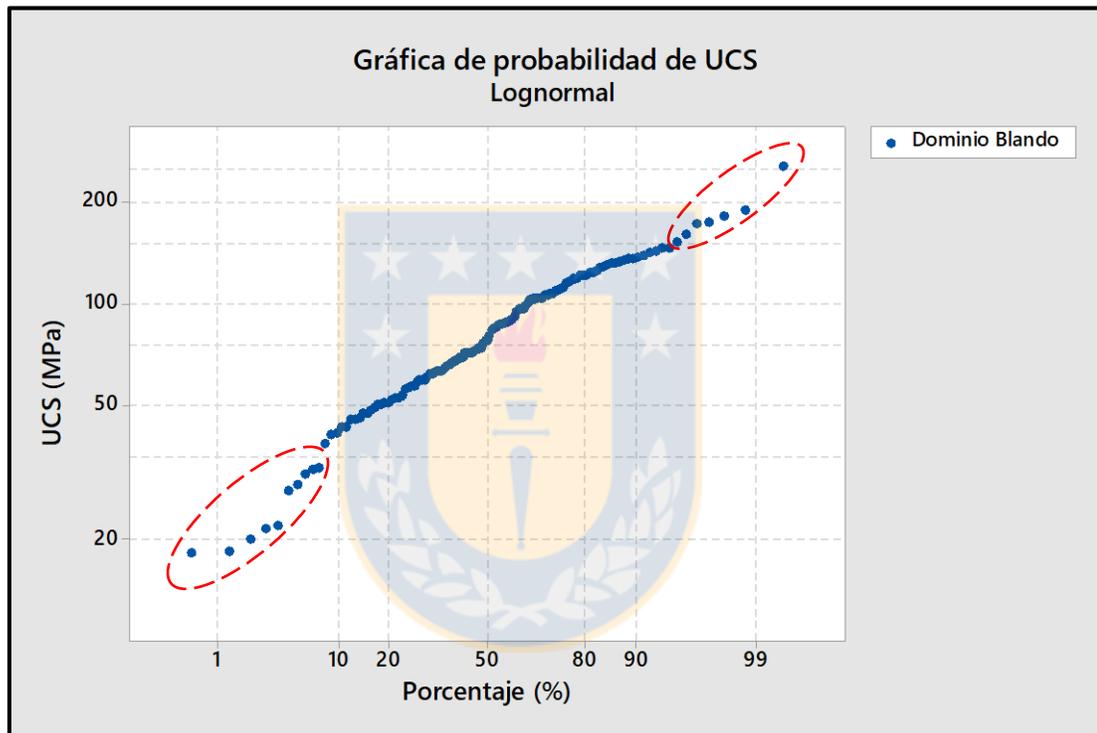


Figura 6.37. Valores outliers para el Dominio Blando (línea punteada roja)

6.2.7 Plan de Estimación

Como en el caso de UCS Puros, el plan de estimación es el mismo tanto para inverso a la distancia y kriging ordinario (con la diferencia de los variogramas para el kriging). La Tabla 6.08. resume las variables que se integran a Vulcan 9.0.2. para estimar mediante ambos métodos. Nuevamente se realizan tres pasadas para poder poblar todo el modelo.

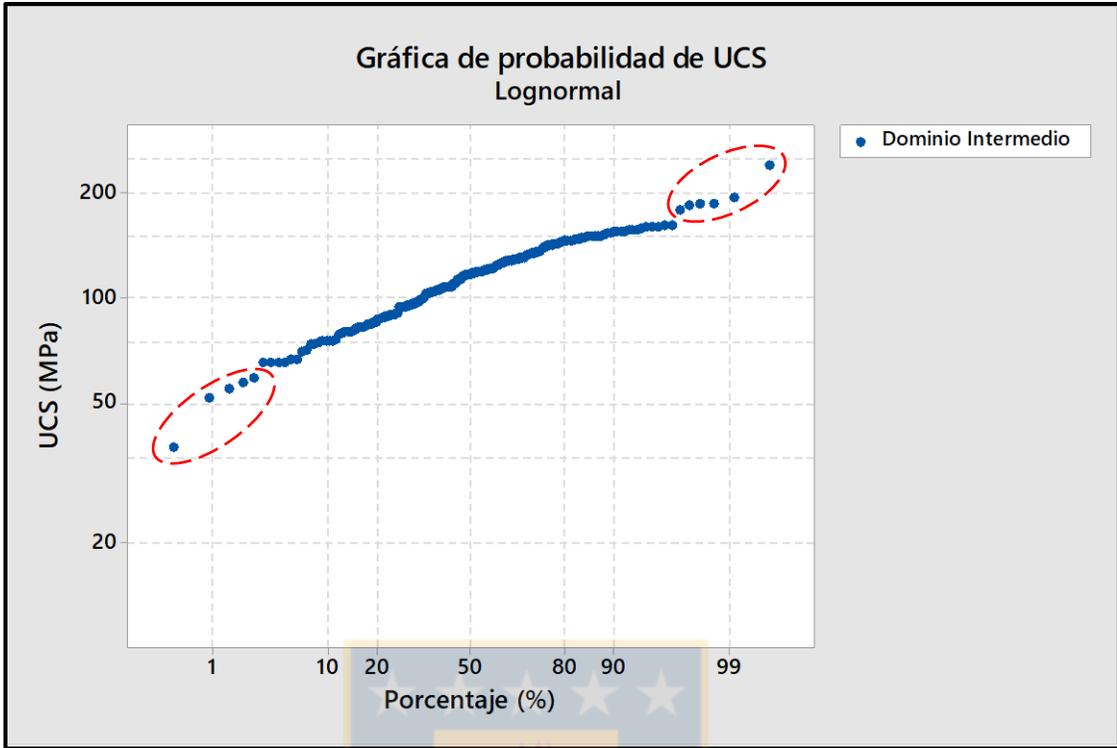


Figura 6.38. Valores outliers para el Dominio Intermedio (línea punteada roja)

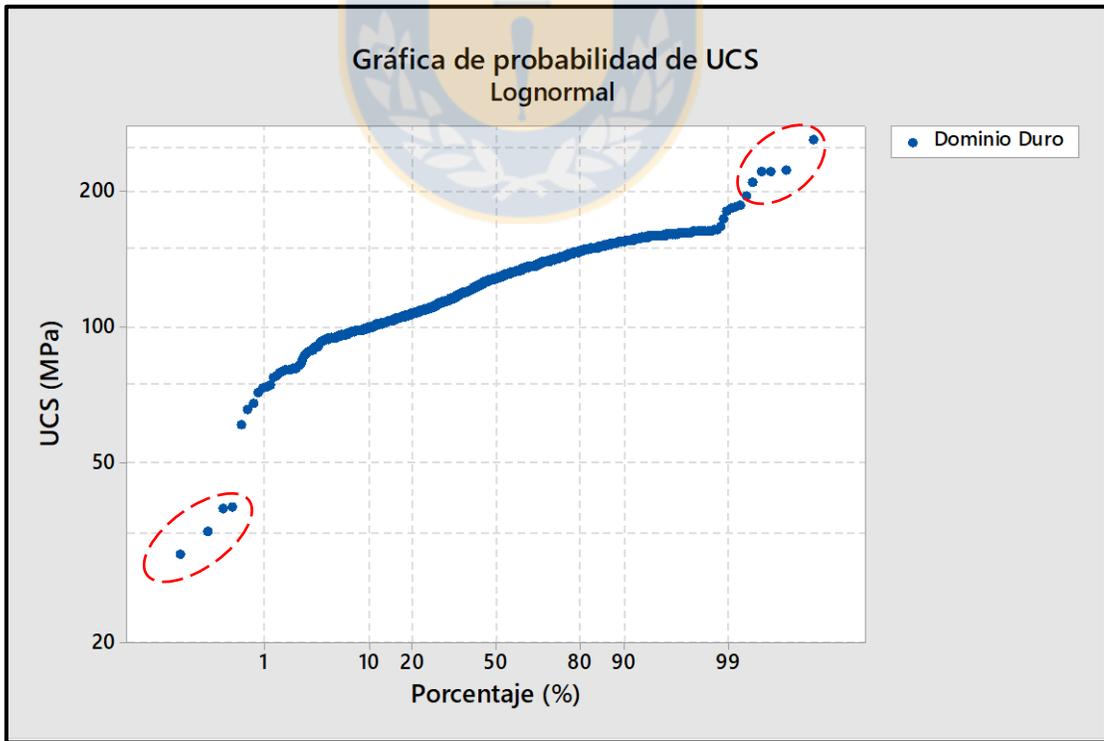


Figura 6.39. Valores outliers para el Dominio Duro (línea punteada roja)

Tabla 6.08. Tabla resumen Plan de Estimación

| Dominio | | Blando | | | Intermedio | | | Duro | | |
|---|---------|----------|----------|----------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Pasada | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Orientación de búsqueda | Bearing | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Plunge | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Dip | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Radio de búsqueda | Mayor | 150 | 500 | 750 | 150 | 500 | 750 | 150 | 500 | 750 |
| | Semi | 150 | 500 | 750 | 150 | 500 | 750 | 150 | 500 | 750 |
| | Menor | 150 | 500 | 750 | 150 | 500 | 750 | 150 | 500 | 750 |
| Discretización | X | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | Y | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | Z | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Muestras | Mín | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | Máx | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Seleccionar bloques por zona específica | | minzon | minzon | minzon | minzon | minzon | minzon | minzon | minzon | minzon |
| Valores de zona | | 2, 3 y 5 | 2, 3 y 5 | 2, 3 y 5 | 6 | 6 | 6 | 9 | 9 | 9 |

6.2.8. Estimación de los Modelos

Nuevamente, y con los parámetros y configuraciones obtenidos para los datos UCS+PLT, se realiza la estimación de los modelos por ambos métodos de estimación. Como en el caso de los datos UCS Puros, cada modelo se trabajó por separado, configurándolo para los dos métodos distintos. Las zonas minerales nuevamente sirven de barrera de estimación para las muestras, pero esta vez separadas en tres dominios.

Los modelos también fueron cortados ocupando el *pit* final y fue necesario una cuarta pasada (que tampoco se tendrá en cuenta a la hora de validar el modelo y no se considerará como un dato confiable a la hora de consultar los datos).

6.2.9 Validación de los Modelos

En cuanto a la validación de los modelos, se ocupó el mismo procedimiento que para los datos puros, utilizando la validación visual, estadística y los gráficos de deriva.

6.2.9.1. Validación Visual

Las figuras 6.40. y 6.41. muestran la validación visual para la estimación por inverso a la distancia, en la sección 89.840 y nivel 3.360 (los mismos del ejemplo para datos UCS Puros, a modo de comparación). Los anexos 20 y 21 ejemplifican las mismas secciones, pero esta vez para la estimación por kriging ordinario.

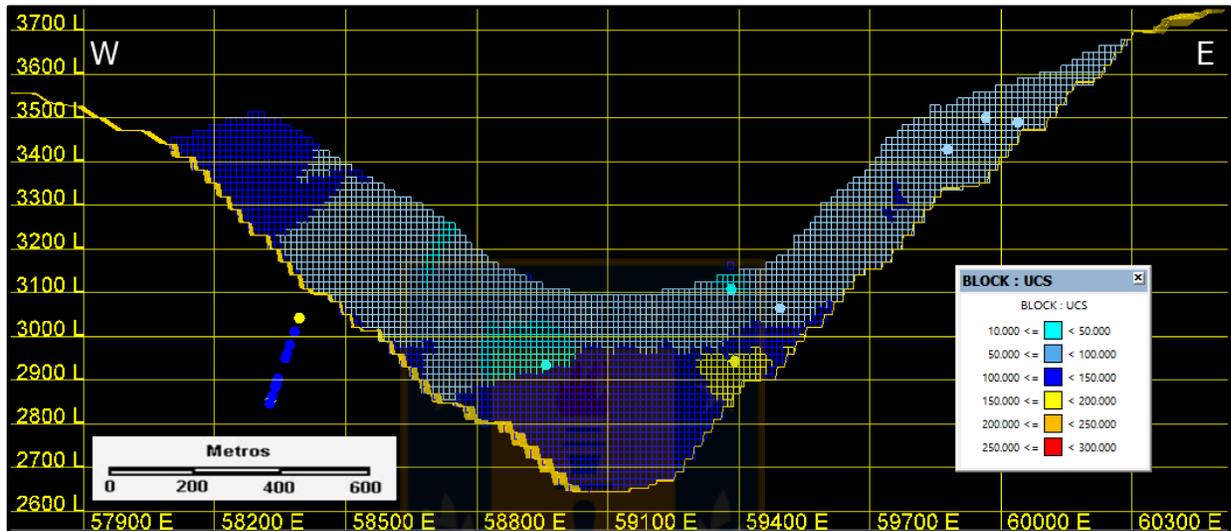


Figura 6.40. Validación visual del modelo de bloques en perfil sección 89.840 del modelo ID de UCS+PLT. Los puntos de colores representan las muestras estimadas. La línea color mostaza corresponde al Pit Final de la mina.

Nuevamente, los bloques estimados honran el valor de las muestras, presentando el mismo color (valor UCS). Por lo anterior, los modelos cumplen con la validación visual.

Cabe destacar que hay muestras que se distribuyen fuera del modelo. Estas muestras sirvieron para realizar la estimación, pero quedaron fuera del modelo una vez que éste fuese limitado por el pit final (línea color mostaza en las figuras).

A modo de comparación con los modelos estimados con UCS Puros, cuando se estima con datos UCS+PLT el valor de los bloques estimados tiende a ser menor y las zonas aledañas a muestras con valores altos es más acotada.

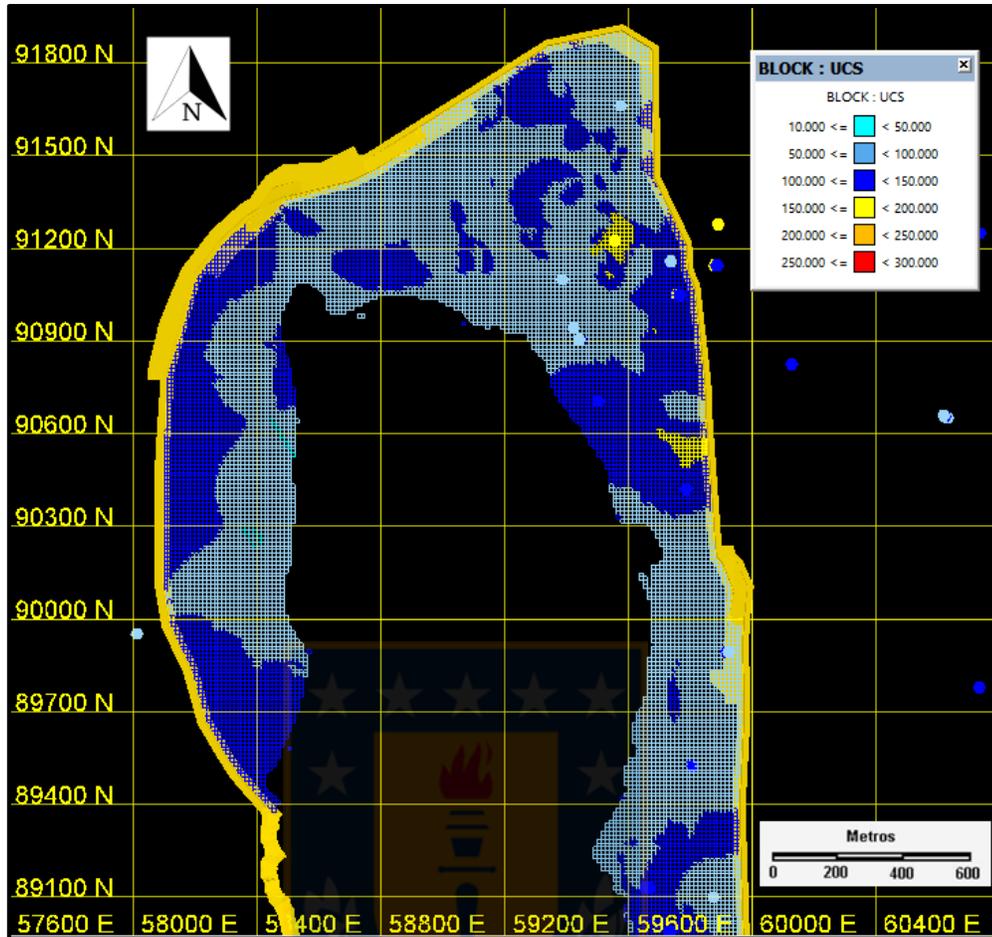


Figura 6.41. Validación visual del modelo de bloques en nivel 3.360 del modelo ID de UCS+PLT. Los puntos de colores representan las muestras estimadas. La línea color mostaza del borde corresponde al Pit Final de la mina.

6.5.2.2. Validación Estadística

La Figura 6.42. indica el porcentaje que ocupa cada pasada para los modelos estimados utilizando datos UCS+PLT. Comparativamente con el porcentaje por pasada de los datos puros, las pasadas tienen porcentajes similares, diferenciándose en mayor medida la pasada 1, siendo esta mayor para los datos UCS+PLT. Nuevamente, la pasada 4 (que no se considera) ocupa un porcentaje menor de los bloques estimados (3%), a su vez, la pasada 2 vuelve a ser la que tiene mayor porcentaje (cercano al 70%).

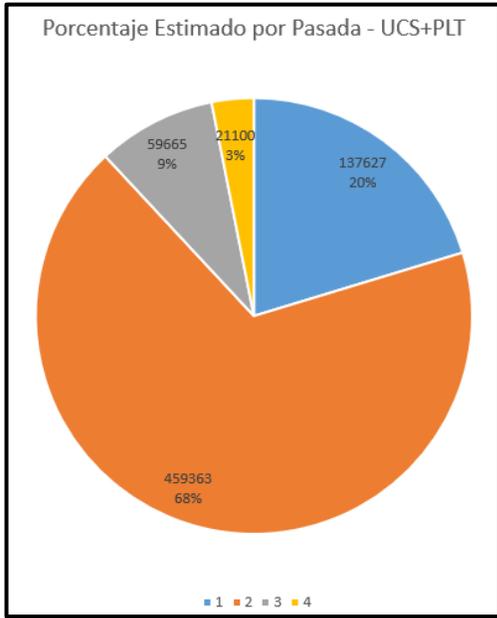


Figura 6.42. Porcentaje y número de bloques estimados por pasada en la estimación con datos UCS+PLT

La Figura 6.43. muestra los valores promedios por zona mineral y pasada, comparados con los valores de las muestras. El Anexo 22 corresponde al mismo gráfico, pero esta vez para la estimación por kriging ordinario.

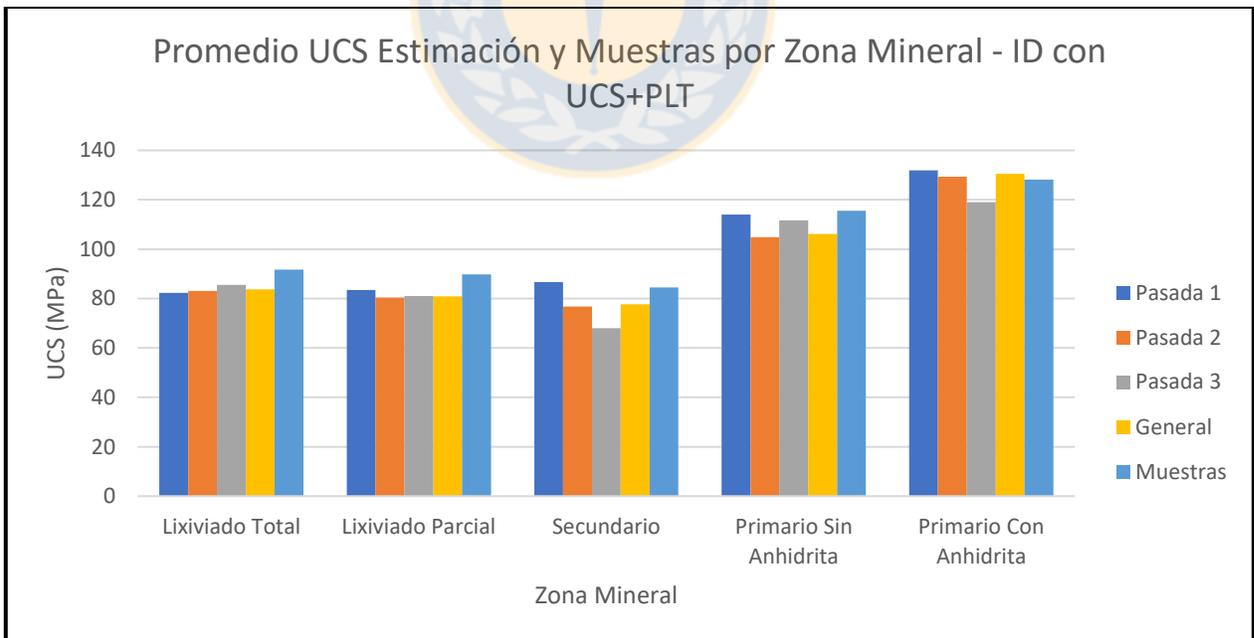


Figura 6.43. Promedio UCS estimado y Muestras por Zona Mineral y pasadas para la estimación por inverso a la distancia con los datos UCS+PLT

Comparando ambos gráficos, es posible determinar que nuevamente el kriging ordinario suaviza los valores, logrando que en cada pasada los datos sean similares a los de las muestras (salvo en la pasada 3 de las zonas primarias donde muestran diferencias significativas).

Al hacer la comparación, esta vez por el tipo de datos ocupados, al utilizar los datos puros la estimación tiene valores más similares a las muestras que cuando se ocupan datos combinados (UCS+PLT). En este último caso, los valores estimados por pasada y general tienden a ser menores que el valor de las muestras (salvo en el caso del Primario Con Anhidrita)

6.2.9.3. Gráficos de Deriva

La Figura 6.44. muestra los gráficos de deriva para la estimación por inverso a la distancia de los datos UCS+PLT. El Anexo 23 corresponde a los gráficos de deriva para la estimación por kriging ordinario.

Al comparar los métodos de estimación para estos datos, nuevamente no existe mucha diferencia entre los valores obtenidos, solamente la suavización de los datos en el caso del kriging.

Comparando ahora el tipo de datos ocupados, para el caso de los modelos en donde se utilizó la base UCS+PLT, para las tres direcciones las muestras presentan un valor mayor que los bloques estimados, siendo considerable la diferencia (algo que ya se había mencionado anteriormente). Es visible también que, al ocupar esta base de datos, no se genera tanta diferencia al moverse en dirección este-oeste, norte-sur o al subir en la cota, producto de la suavización antes mencionada, que además genera que las distintas zonas del yacimiento parezcan más menos homogéneas.

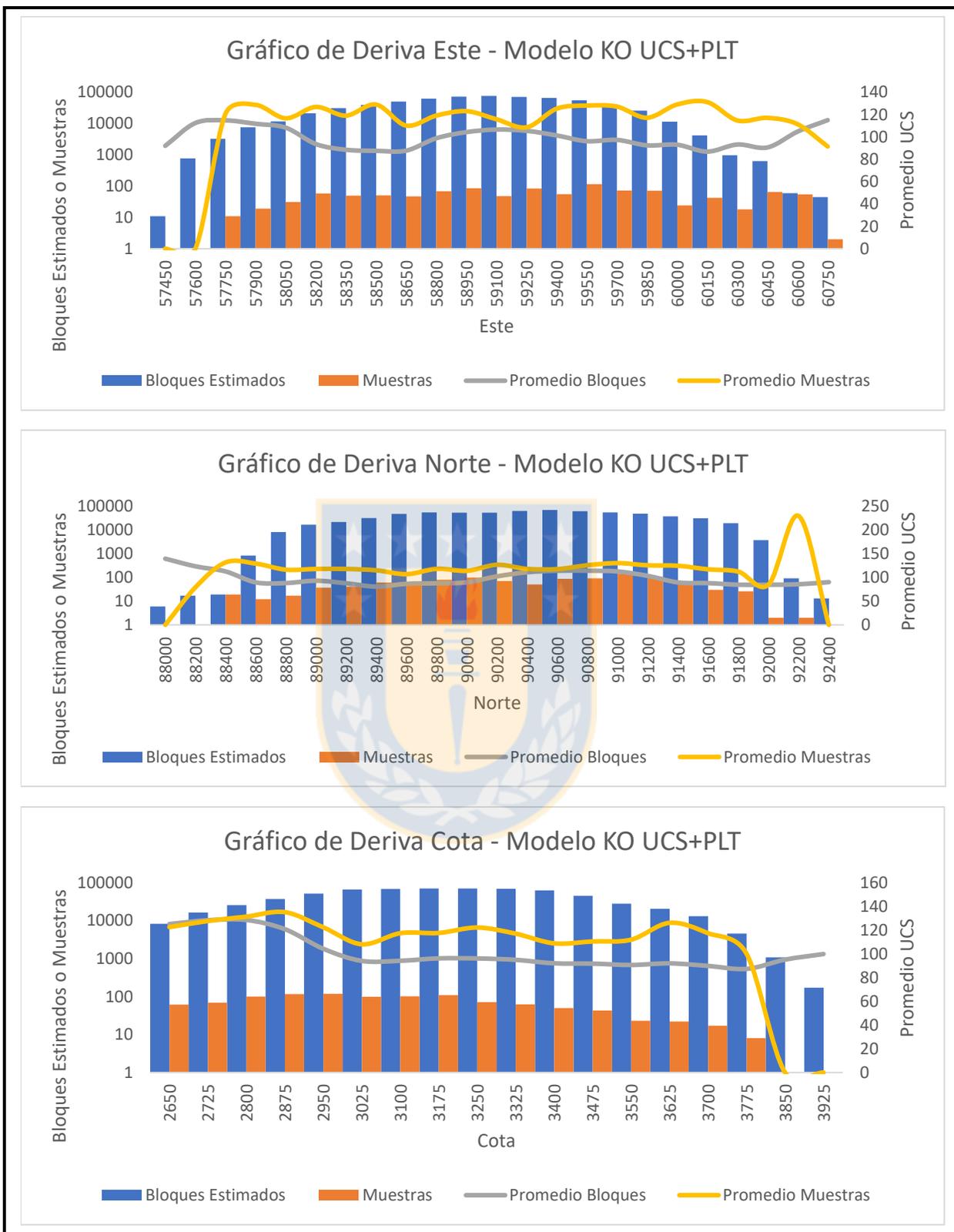


Figura 6.44. Gráficos de deriva del modelo ID con datos UCS+PLT

7. RESULTADOS

7.1. ELECCIÓN DEL MODELO DE ESTIMACIÓN FINAL

Para determinar el mejor modelo de estimación es necesario tener en cuenta los análisis anteriores y también el comportamiento de los modelos frente a las muestras estimadas. Por lo mismo, antes de continuar analizando el comportamiento de los modelos es necesario analizar la información ya presentada y evaluar las falencias de cada modelo.

En cuanto a los modelos realizados por kriging ordinario, hay varios motivos por los cuales no deberían ser considerados. Dentro de estos motivos y el más importante es la relación espacial existente entre los datos, ya sea UCS Puro o bien UCS+PLT.

Si bien se puede realizar una estimación por kriging ordinario con los datos, es necesario tener un buen fundamento a la hora de realizarlo, debido a que cualquier diferencia en los valores obtenidos de los variogramas producirá un modelo completamente distinto. Por lo mismo, y sobre la base de que los variogramas realizados no cumplen con ciertos criterios necesarios, estos modelos no deberían considerarse confiables.

Analizando de manera más profunda lo anterior, para poder realizar el kriging los datos tienen que tener ciertas características, como lo son el tener distribución normal, ser estacionarios y que no puedan tener tendencias. De acuerdo a lo anterior, y aunque si existe una distribución normal para ciertos sectores (en este caso UGT), hay otros donde no es así, por lo tanto, algunos de estos datos necesitaron ser transformados para poder trabajarlos. Que los datos sean estacionarios significa que la variación local no cambia en diferentes áreas del mapa. Por ejemplo, 2 puntos de datos separados por 5 metros en diferentes ubicaciones deberían tener diferencias similares en su valor medido, caso que no se da en las muestras con valores de resistencia, donde ésta cambia significativamente a medida que nos movemos en el espacio. Por último, los datos si presentan tendencias, siendo de mayor magnitud en las zonas inferiores del yacimiento y de menor magnitud en las zonas superiores.

Aun cuando se pueden modificar o “masajear” los datos para poder realizar el kriging, esto no es del todo correcto y sólo generará que el objetivo del kriging, que es realizar la mejor estimación, no se cumpla. Por lo tanto, y aún teniendo lo anterior en consideración al momento de realizar los modelos, sirve como ejercicio para entender que, aunque se puede realizar la estimación, que aún cuando los variogramas puedan ser modelados de alguna que otra forma, no es del todo correcto y hay que ser bien precavido al momento de elegir los métodos de estimación para diferentes características (ya sea ley, resistencia, humedad del suelo, etc.).

A modo de comparación, Lu y Wong (2008), estudian la estimación por inverso a la distancia y kriging ordinario, determinando que el inverso a la distancia genera una mejor estimación cuando la estructura espacial en los datos no puede ser modelada efectivamente por las funciones típicas de variogramas.

Una vez descartados los modelos realizados por kriging ordinario, queda determinar con cual base de datos los valores se ajustan mejor a la realidad, si es con los datos UCS Puros o bien, con los datos UCS+PLT.

Si bien, existe una clara diferencia observada en los gráficos de deriva y de estadística, en donde el promedio de las muestras UCS+PLT es mayor al promedio de los bloques estimados, es necesario determinar si esto genera una diferencia también con los datos reales o bien, se pueden ajustar para trabajar con ellos. Por otro lado, es claro que trabajar con datos UCS Puros es mejor, pero el tener pocas muestras también afecta en la estimación.

Para determinar lo anterior, y debido a que no hay datos UCS nuevos que permitan determinar que modelo es mas confiable y se ajusta más a la realidad, se utilizaron datos de perforación (que cuentan con una gran base de datos).

Aun cuando la velocidad de perforación (calculada de acuerdo al tiempo que se demoró el operador en realizar los metros de perforación) depende de varios factores y no solo de la resistencia de roca, es un indicativo de esta misma, por lo tanto, se utilizaron estos valores para observar su comportamiento en los distintos modelos.

Para evitar un error mayor ocupando estos datos, se filtraron por perforadora y operador, debido a que cada perforadora trabaja de manera distinta y obviamente, cada operador lo hace también de acuerdo a su experiencia. Es así como se realizaron varias pruebas ocupando perforadoras y operadores distintos y observando su comportamiento frente a los modelos estimados por inverso a la distancia.

Las figuras 7.01. y 7.02. muestran un ejemplo de estas pruebas, utilizando las perforadoras 21 y 24 y a los operadores Jonathan Lara y Rodrigo Araya respectivamente. En ellas es posible observar el comportamiento de los UCS entregado por ambos modelos frente a la velocidad de perforación.

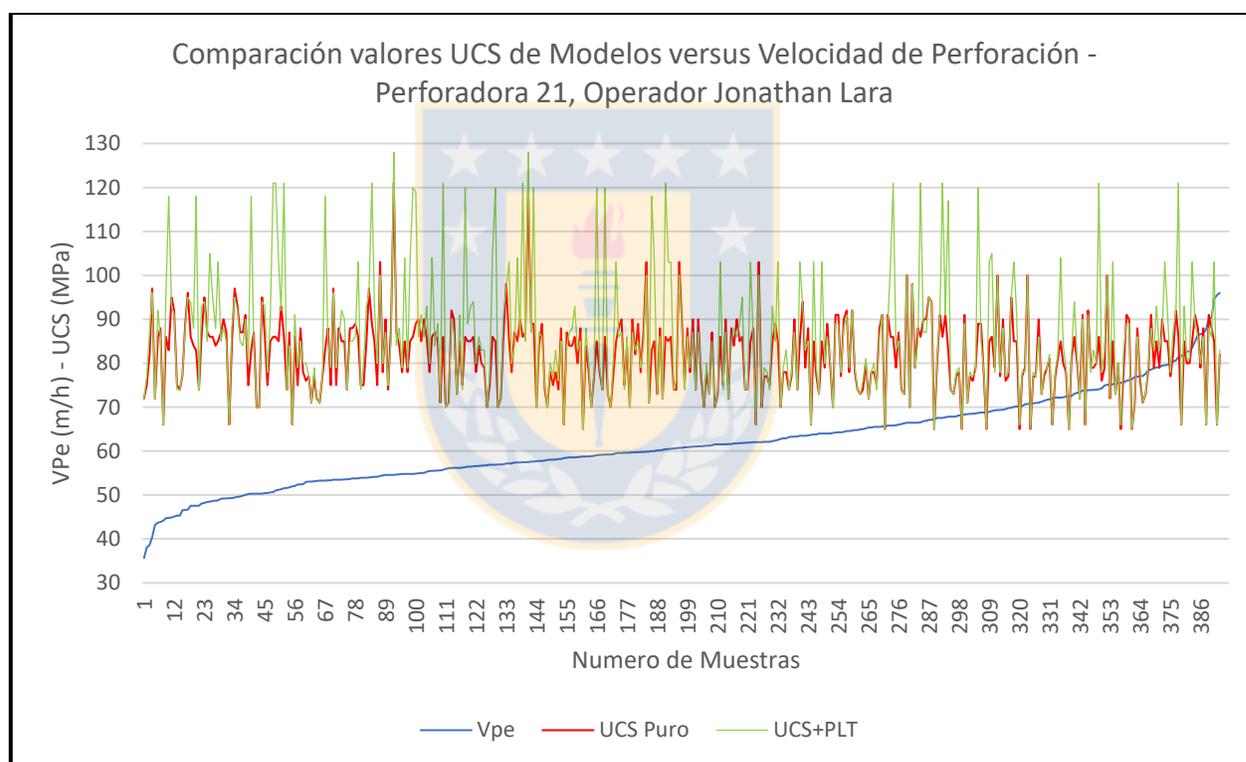


Figura 7.01. Comparación entre los modelos con UCS Puro y UCS+PLT frente a las Velocidades de Perforación (Perforadora 21, Operador Jonathan Lara)

En los Anexos 24, 25, 26, 27 y 28 hay más comparaciones utilizando otras perforadoras y distintos operadores, con el fin de poder visualizar mejor las diferencias entre modelos y el comportamiento frente a la velocidad de perforación.

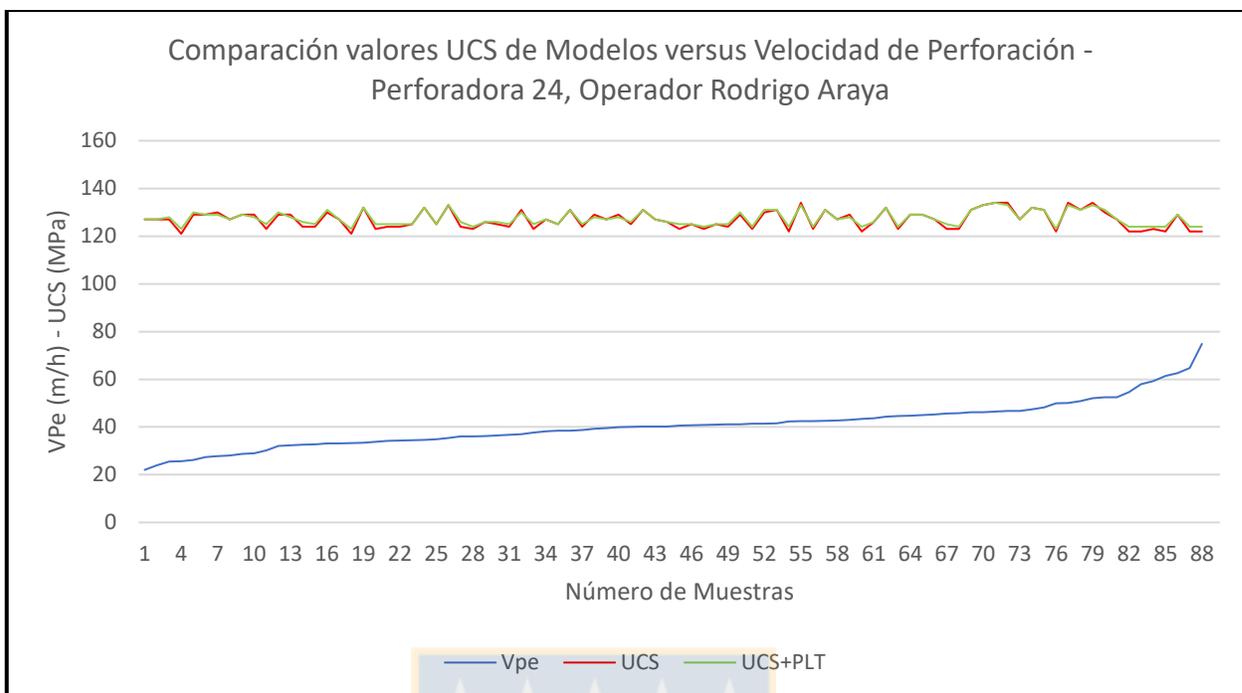


Figura 7.02. Comparación entre los modelos con UCS Puro y UCS+PLT frente a las Velocidades de Perforación (Perforadora 24, Operador Rodrigo Araya)

Como bien se puede apreciar en estos gráficos, en muchas ocasiones los valores UCS Puro y UCS+PLT no varían para un mismo punto, pero en otras hay diferencias significativas. Tal como ya se había mencionado y apreciado, el valor UCS+PLT tiende a ser mayor y a presentar peaks en varias ocasiones, en comparación al UCS Puro que es más suavizado. Si bien estos peaks pueden presentarse en terreno debido a la variabilidad de los valores de resistencia, no son tan pronunciados como los que muestran los valores UCS+PLT, por lo tanto, aún cuando se amplía la base de datos y el modelo queda más poblado, los datos UCS Puros siguen siendo mejores que los combinados con los obtenidos mediante ensayo de carga puntual.

Por último, para verificar de mejor manera la relación entre resistencia y velocidad de perforación, se seleccionaron datos aleatorios entre 10 y 110 m/h, tomando 100 datos por incrementos de cada 10 m/h, teniendo un total de 1.000 datos, de los cuales 147 fueron descartados debido a que caían dentro de la pasada 4 o bien, fuera del modelo. En esta ocasión no se tomó en cuenta la perforadora ni el operador, ya que simplemente se buscaba comprobar que a menor velocidad existe mayor resistencia de roca y viceversa. La Figura 7.03 muestra esa relación entre ambos parámetros.

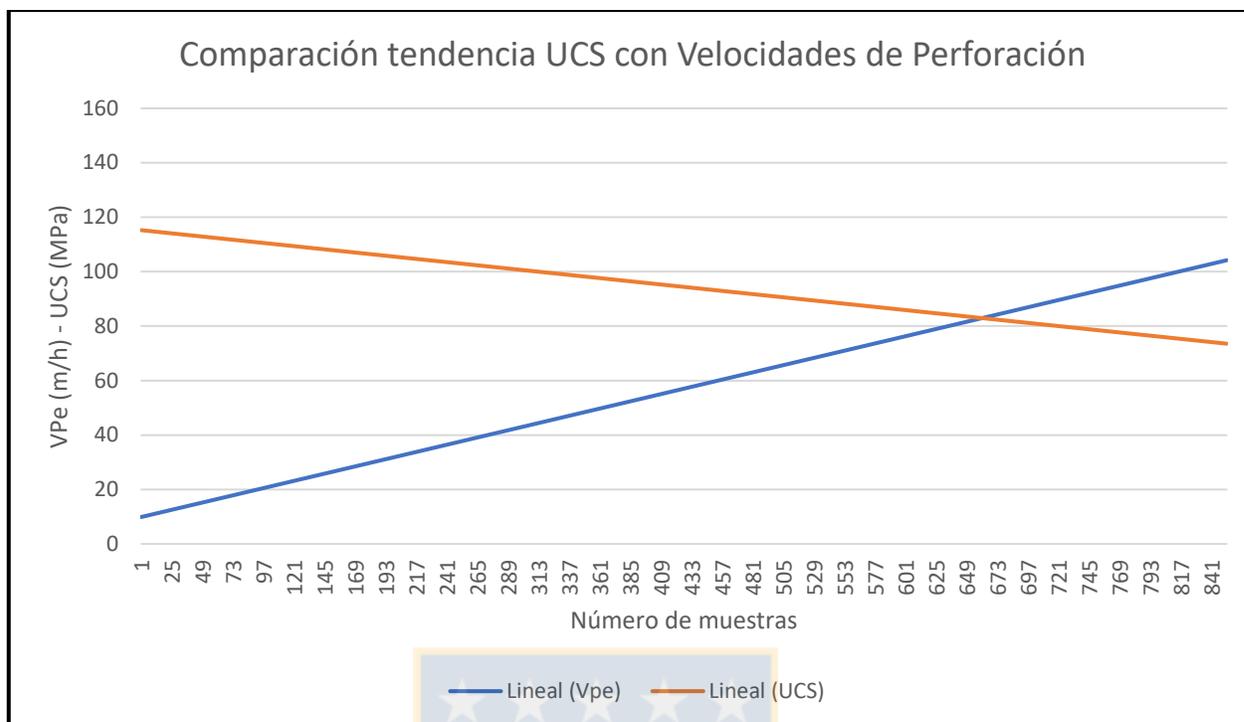


Figura 7.03. Comparación valores UCS modelos UCS Puro y UCS+PLT con velocidades de perforación

Al tener una gran variabilidad los datos, se trabajó con la tendencia de estos. A simple vista resalta que a medida disminuye la resistencia de la roca, la velocidad de perforación aumenta, debido a que el material es mas blando y fácil de perforar.

De acuerdo a lo anterior, las líneas se cruzan para una velocidad cercana a 80 m/h y UCS de 80 MPa (algo ya visto en los ejemplos). Algo a tener en consideración es que la velocidad se incrementa en mayor medida que la disminución del valor UCS, por lo que los cambios de UCS, por mínimos que sean, implicarían un aumento progresivo de la velocidad de perforación necesaria para realizar los pozos de tronadura.

Por último, es necesario realizar más pruebas en terreno para determinar de mejor manera la relación entre ambas variables y que ésta pueda ser ocupada de manera eficiente para planificar la perforación y tronadura.

8. CONCLUSIONES

El modelo de resistencia, aun siendo el primero que se realiza de esta forma y presentando ciertas falencias, es un avance para la operación de la minera debido a que puede ser ocupado en distintas áreas como planificación de corto plazo (modificándolo con nuevos datos de terreno) y largo plazo, perforación y tronadura, mantenimiento, geotecnia, etc.

Del modelo en sí, se puede ratificar y obtener nueva información geológica del yacimiento, como el hecho de que las zonas minerales controlan mejor la mina en términos de resistencia o bien, que al este del rajo la resistencia es mayor o que las fases inferiores tienen también valores más altos. Mucha de esta información ya se tenía, pero es importante validarla y verificarla ocupando distintos métodos, y el modelo de estimación es uno de ellos.

De toda la investigación realizada, son dos grandes las conclusiones a tener en cuenta y que precisamente, son las que permiten determinar que modelo es el que mejor se ajusta. Estas conclusiones son:

- El mejor método de estimación utilizando pocos datos corresponde al inverso a la distancia frente al kriging ordinario. Esto debido a que, al poseer pocos datos y que además son variables en el espacio y se distribuyen de distintas maneras, la correlación espacial es difícil de determinar (si es que existe), complicando la realización de variogramas que son la base para realizar una buena estimación por kriging.
- Aún cuando aumente la cantidad de datos, es mejor ocupar las bases de datos por separado, privilegiando siempre los datos UCS Puros, esto debido a que, al estar normados y realizados bajo condiciones de laboratorio, tienen mayor confiabilidad que los valores obtenidos por ensayos PLT. Además, se hace necesario la realización de más pruebas UCS y PLT en los mismos sondajes o sectores, con el fin de evaluar los factores de conversión o bien, calcular nuevos que se ajusten mejor al yacimiento.

Por otra parte, al ser el primer modelo de resistencia realizado ocupando los datos UCS es necesario mejorarlo a futuro, integrando nueva información con el fin de hacerlo mas robusto y preciso.

Finalmente, la importancia de un modelo de resistencia como el desarrollado es que incluye todas las zonas minerales y se encuentra sectorizado en base a ellas, diferenciándolo de los modelos actuales utilizados en Minera Los Pelambres.

En comparación con las Unidades Geometalúrgicas que no incluye las zonas lixiviadas y ocupa otros parámetros, el modelo generado aporta más información del yacimiento en cuanto a la resistencia de roca y a su distribución en gran parte de este. Por otro lado, si se contrasta con las Unidades Geotécnicas, el modelo por zonas minerales cambia la forma de ver la mina, otorgando una nueva visión de como se comporta la resistencia en base a la relación mineral y no a sectores que mezclan litología, alteración y otros parámetros mecánicos. Sumado a lo anterior, al trabajar las UGT con promedios de UCS, se hace difícil observar los sectores con menor o mayor valor de resistencia, lo que no pasa al ocupar el modelo de resistencia generado.

Aún con lo ya mencionado, se hace necesario hacer mas robusto el modelo final, pudiendo agregarse a él información de estructuras, presencia de agua, microfracturamientos, etc. Así como también realizar nuevas pruebas de resistencia en los sectores con menor numero de datos y contrastar estos resultados con las velocidades de perforación.

9. REFERENCIAS

- AGUIRRE, L. 1960.** Geología de Los Andes de Chile Central. Provincia de Aconcagua. Boletín N°9, IIG, Santiago.
- AGUIRRE-URRETA, MARÍA; LO FORTE Y GABRIELA L. 1996.** Los depósitos Tithoneocomianos. En Geología de la Región del Aconcagua, Provincia de San Juan y Mendoza: pp.179-229
- ALFARO, M. 2007.** Estimación de Recursos Mineros, 124 p.
- ÁLVAREZ, P.P, BENOIT, S.V. Y OTTONE, E.G. 1995.** Las Formaciones Rancho de Lata, Los Patillos y otras unidades mesozoicas de la Cordillera Principal de San Juan. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 49, (1-2), p. 133-152.
- ÁLVAREZ, P.P. 1996.** Los Depósitos Triásicos y Jurásicos de la Alta Cordillera de San Juan. In: Ramos, et al. (Eds.), Geología de la Región del Aconcagua, Provincias de San Juan y Mendoza, Anales, vol. 24(5). Subsecretaría de Minería de la Nación, Dirección del Servicio Geológico, Buenos Aires, p. 59-137.
- ÁLVAREZ, P.P. Y RAMOS, V.A. 1999.** The Mercedario rift system in the principal Cordillera of Argentina and Chile (32°S). Journal of South American Earth Sciences 12, p. 17-31.
- ÁLVAREZ, P.P. 2006.** Geología de la Alta Cordillera de San Juan entre los 31°30' y 32°00' Informe Interno, Antofagasta Minerals, 111 p, Santiago.
- BERGOEING RUBILAR, J. 2016.** Evolución geoquímica del magmatismo de la Región de Los Pelambres (31°S) entre el cretácico superior y el mioceno superior: implicancias para la evolución tectónica y metalogénica de los Andes de Chile Central. Tesis Pregrado.
- BERTENS, A., DECKART, K. Y GONZÁLEZ, A. 2003.** Geocronología U-Pb, Re-Os y 40Ar/39Ar del pórfido CuMo Los Pelambres, Chile central. Actas 10° Congreso Geológico Chileno CD Rom, Concepción.
- BERTENS, A., CLARK, A. H., BARRA, F. Y DECKART, K. 2006.** Evolution of the Los Pelambres-El Pachón porphyry copper-molybdenum district, Chile/Argentina. In Short Papers, XI. Congreso Geológico Chileno, Antofagasta (pp. 179-181).
- BIENIAWSKI Z. T. 1975.** Point load test in geotechnical practice. Engineering Geology, 9(1), 1-11
- BROCH, E. Y FRANKLIN, J.A. 1972** The Point-Load Strength Test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 9, 669-697.
- BROCKWAY, H. PERRELLÓ, J. POSSO, H. Y EAST, P. 2008.** Programa exploración Los Pelambres. Informe Final, Mayo 2008. Informe Inédito. 55 p.

CAMUS, F. 2002. The Andean porphyry systems. In: Cooke, D.R. and Pongrantz, J., eds., Giant Ore Deposits: Characteristics, genesis and exploration. CODES Special Publication 4, Australia, p. 5-21.

CASTELLI, J.C. 2006. Geología de Los Pelambres y El Pachón: Geovectra, informe para AMSA, Santiago, 35p.

CRISTALLINI, E., MOSQUERA, A. Y RAMOS, V.A. 1995. Estructura de la Alta Cordillera de San Juan. Revista de la Asociación Geológica Argentina 49 (1-2), p. 165-183.

CRISTALLINI, E.O. Y RAMOS, V.A. 1996. Los depósitos continentales cretácicos y volcanitas asociadas. En Geología de la región del Aconcagua, Provincia de San Juan y Mendoza: pp.231-273 Solicite Por: Bsngm: 7875-a.

CRISTALLINI, E.O. Y RAMOS, V.A. 2000. Thick-skinned and thin-skinned thrusting in La Ramada fold and thrust belt: Crustal evolution of the High Andes of San Juan, Argentina (32°SL). Tectonophysics 317: p. 205-235.

DEUTSCH, C.V. Y JOURNEL, A.G. 1998. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. 2nd Edition, Oxford University Press, New York.

FERRANDO, R., ROPERCH, P., MORATA, D., ARRIAGADA, C., RUFFET, G. Y CÓRDOVA, M.L. 2014. A paleomagnetic and magnetic fabric study of the Illapel Plutonic Complex, Coastal Range, central Chile: Implications for emplacement mechanism and regional tectonic evolution during the MidCretaceous. Journal of South American Earth Sciences 50, 12-26.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, J. 2002. Ingeniería Geológica. Prentice Hall: 712 pp. Madrid.

GUITART, A. 2007. Geología de las nacientes de los ríos Mercedario y Teatinos (32° LS), Provincia de San Juan.

HEREDIA, N., RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, L.R., GALLASTEGUI, G., BUSQUET, P. Y COLOMBO, F. 2002. Geological setting of the Argentine Frontal Cordillera in the flat-slab segment (30°00'–31°30'S latitude), J. South Am. Earth Sci., 15, 79–99, doi:10.1016/S0895-9811(02)00007-X.

JARA, P. Y CHARRIER, R. 2014. New stratigraphical and geochronological constraints for the Mezo-Cenozoic deposits in the High Andes of central Chile between 32 degrees and 32 degrees 30 'S: Structural and palaeogeographic implications: Andean Geology, v. 41, no. 1, p. 174-209.

LENCINAS, A. Y TONEL. M. 1993. La Brecha Sur del Yacimiento de Cobre Porfídico de Pachón, San Juan, República Argentina. XI Congreso Geológico Argentino, Actas, V, 241- 247.

LU, G.Y. Y WONG, D.W. 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. Computers & Geosciences, 34 (9), 1004-1055

MAYDAGÁN, L., FRANCHINI, M., CHIARADIA, M., PONS, J., IMPICCINI, A., TOOHEY, J. Y REY, R. 2011. Petrology of the Miocene igneous rocks in the Altar region, main Cordillera of San Juan, Argentina. A geodynamic model within the context of the Andean flat-slab segment and metallogenesis. *Journal of South American Earth Sciences* 32, p. 30-48.

MPODOZIS, C., RIVANO, S., PARADA, M.A. Y VICENTE, J.C. 1976. Acerca del plutonismo tardi-hercínico en la Cordillera Frontal entre los 30-33°S (Provincias de San Juan y Mendoza, Argentina, Coquimbo, Chile). In Congreso Geológico Argentino, No. 6, Actas, p. 143-171. Bahía Blanca.

MPODOZIS, C., BROCKWAY, H., MARQUARDT, C. Y PERELLÓ, J. 2009. Geocronología U/Pb y tectónica de la región de Los Pelambres-Cerro Mercedario: implicancias para la evolución cenozoica de Los Andes del centro de Chile y Argentina. In Congreso Geológico Chileno, No.12., Santiago.

MPODOZIS, C. Y CORNEJO, P. 2012. Cenozoic Tectonics and Porphyry Copper Systems of the Chilean Andes. Society of Economic Geologists. Special Publication 16, pp. 329-360.

MPODOZIS, C. 2015. Mapa Geológico Regional del Área de Los Pelambres (esc 1:75.000). Informe Interno, Antofagasta Minerals, Santiago.

MUNIZAGA, F. Y VICENTE, J.C. 1982. Zonacion plutonica y volcanismo mioceno a la latitud 33°S de los Andes 7th Congr. Geol. Argent (resumé).

MUSSO, R. J. E., PÉREZ, D. J., REY, R. Y TOOHEY, J. 2012. Geología de las nacientes del río La Pantanosa, Cordillera Frontal (31 33°S), Provincia de San Juan, Argentina.

PERELLÓ, J., SILLITOE, R.H., MPODOZIS, C., BROCKWAY, H. Y POSSO, H. 2012. Geologic setting and evolution of the porphyry copper-molybdenum and copper-gold deposits, at Los Pelambres, central Chile: Society of Economic Geologists Special Publication 16, p. 79-104.

PÉREZ, D.J. Y RAMOS, V.A. 1996. Los depósitos sinorogénicos. En Geología de la Región del Aconcagua, Provincias de San Juan y Mendoza, Subsecretaría de Minería de la Nación, Dirección del Servicio Geológico. *Anales* 24 (11): p. 317-341, Buenos Aires.

PINEDA, G. Y CALDERÓN, M. 2008. Hoja Monte Patria-El Maqui, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 116: 44 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

PNUD. 1971. Informe Técnico N°21. Investigación detallada de minerales en áreas seleccionadas de las Provincias de Atacama y Coquimbo. Nueva York.

QUIRT, S., CLARK, A. Y FARRAR, E. 1971. Potassium-Argon ages of porphyry copper deposits in the northern and central Chile. *Geological Society of America, Bulletin*, vol. 3 N°7. p.676-677.

REICH, M., PARADA, M.A., PALACIOS, C., DIETRICH, A., SCHULTZ, F. Y LEHMANN, B. 2003. Adakite-like signature of late Miocene intrusions at the Los Pelambres giant porphyry copper deposit in the Andes of central Chile: Metallogenic implications: *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 876–885.

RIVANO, S. Y SEPÚLVEDA, P. 1991. Carta Geológica de Chile 69: Hoja Illapel, Región de Coquimbo. 132 p.

RIVANO, S. 1996. Geología de las hojas Quillota y Portillo. SERNAGEOMIN: 232 p, Santiago.

SILLITOE, R.H. 1973. Geology of the Los Pelambres porphyry copper deposits, Chile. *Economic Geology*. Vol. 68 N°1, pp 1-10.

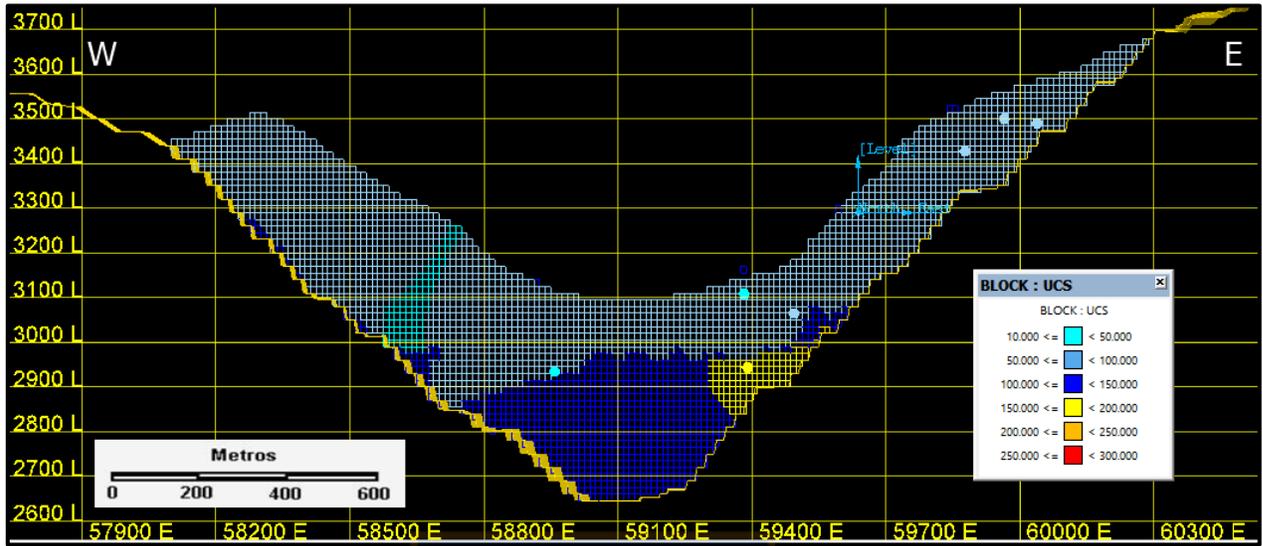
TAPIA, J., TOWNLEY CALLEJAS, B., CÓRDOVA, L., POBLETE, F. Y ARRIAGADA ORTEGA, C. 2016. Hydrothermal alteration and its effects on the magnetic properties of Los Pelambres, a large multistage porphyry copper deposit. *Journal of Applied Geophysics*, v.132 pp 125-136.

VICENTE, J. C., 1972. Aperçu sur l'organisation et l'évolution des Andes argentine-chiliennes centrales au parallèle de l'Aconcagua: *Internat. Geol. Cong.*, 24th, Montreal 1972, sec. 3, Tectonics, p. 423-436.

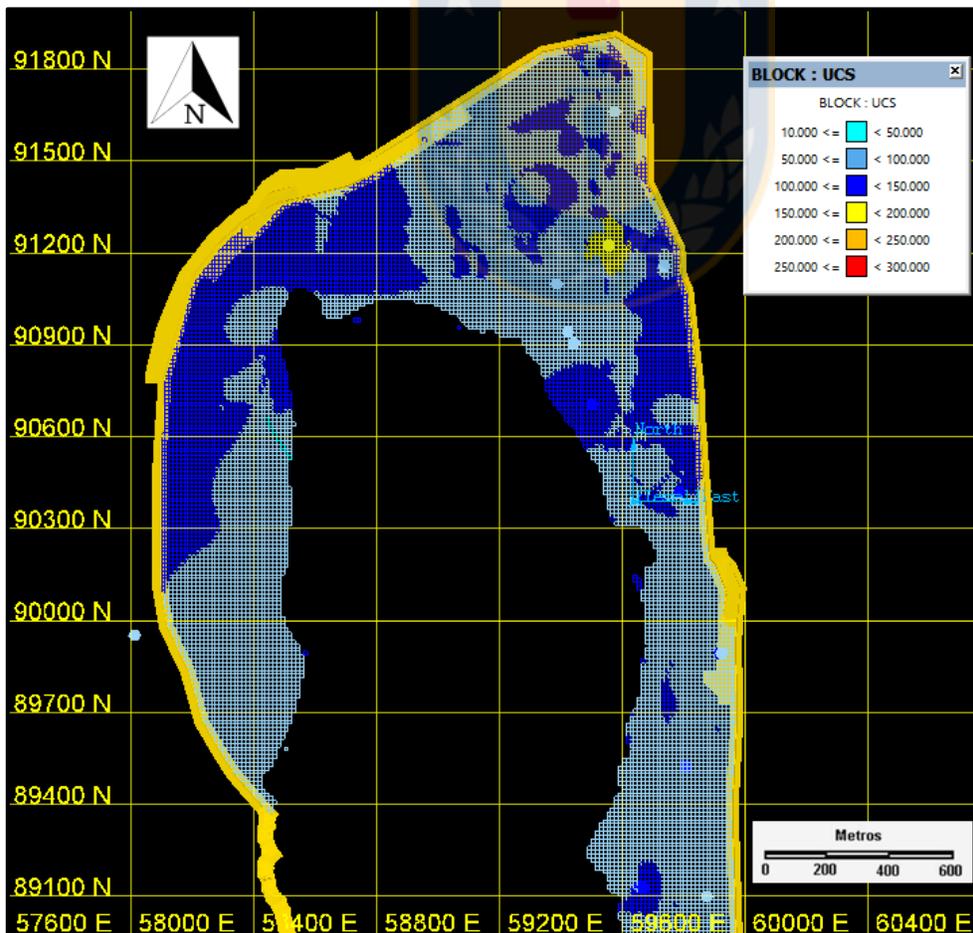




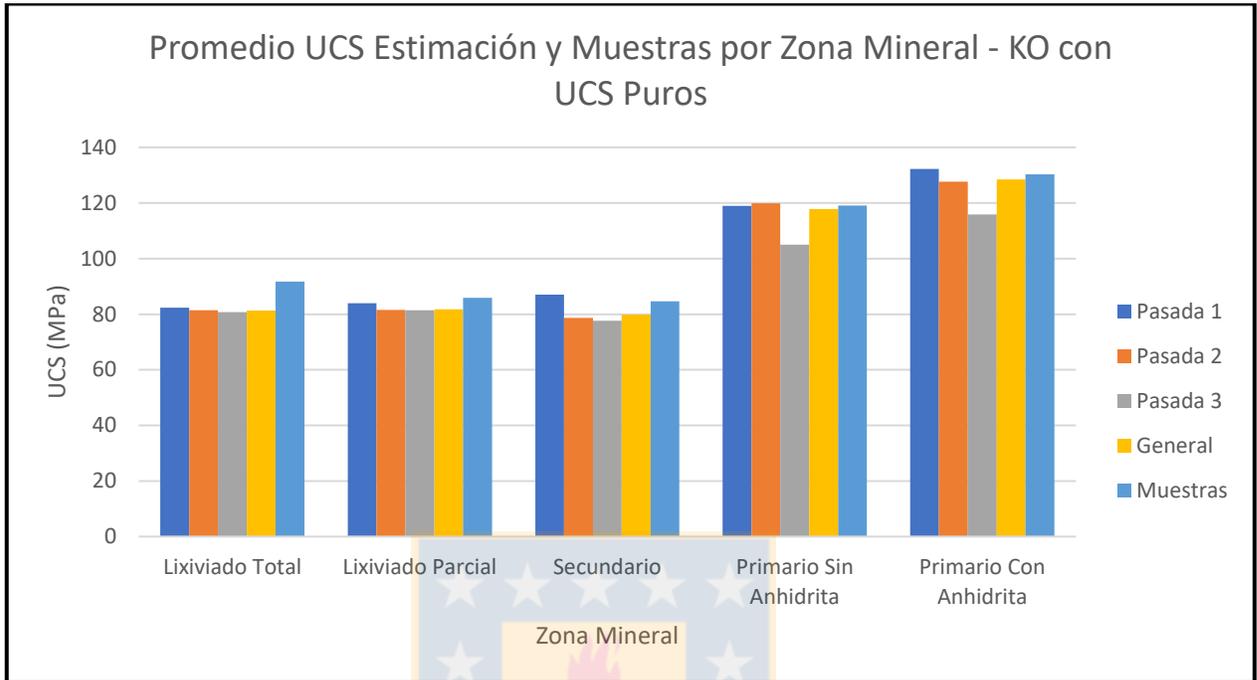
1. Validación visual del modelo de bloques en perfil sección 89.840 del modelo KO de UCS Puros



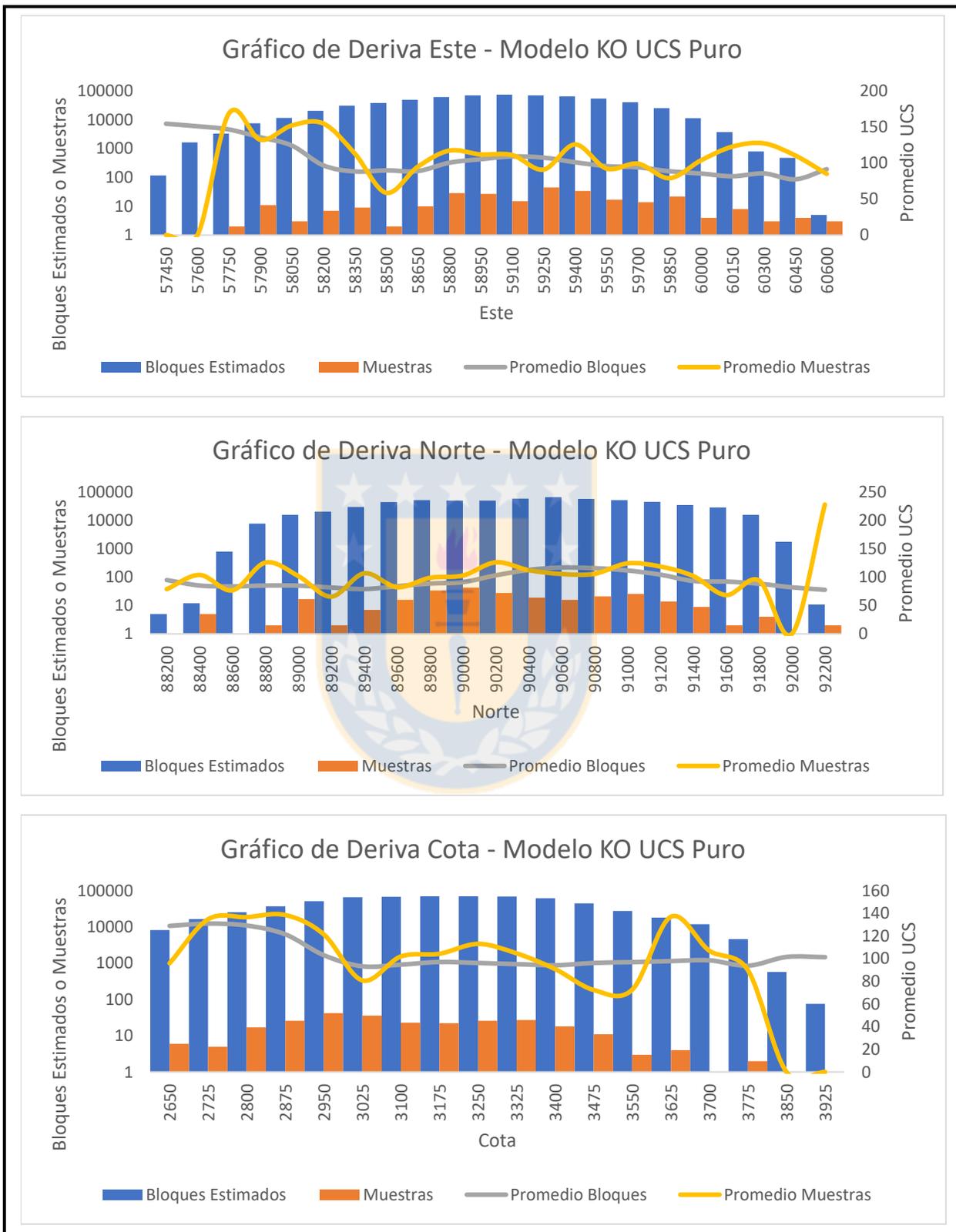
2. Validación visual del modelo de bloques en nivel 3..360 del modelo KO de UCS Puros



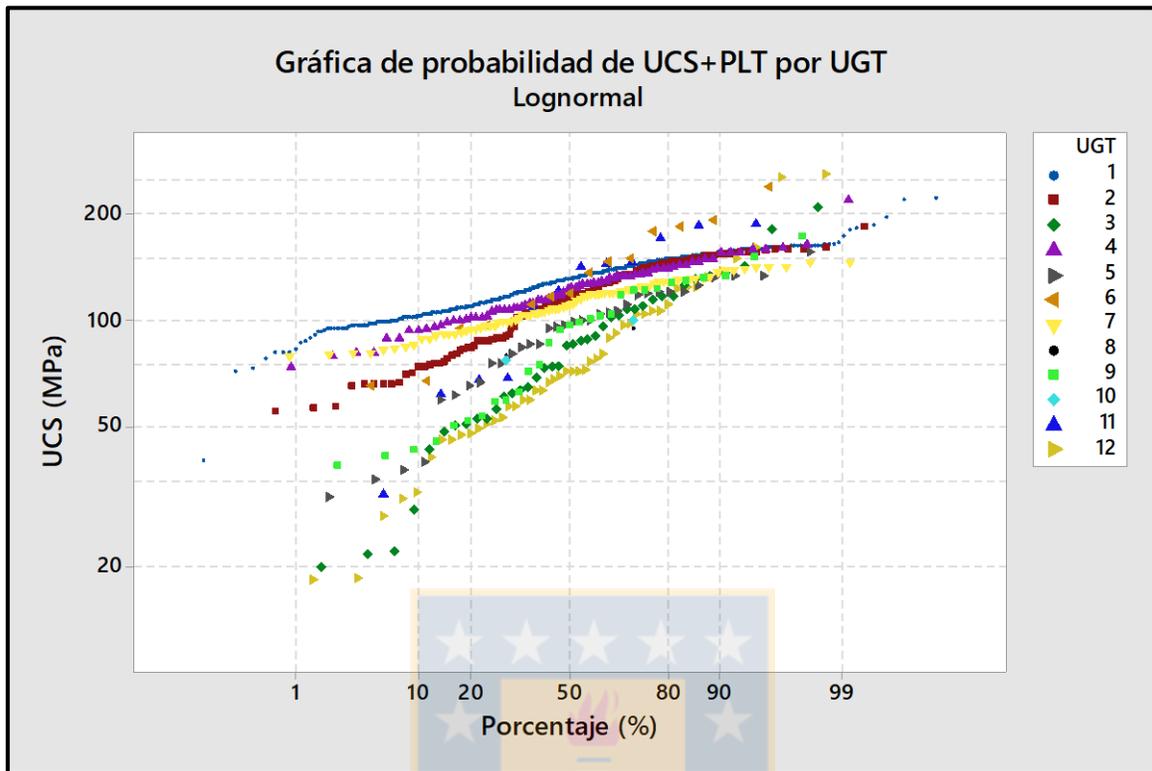
3. Promedio UCS estimado y Muestras por Zona Mineral y pasadas para la estimación por inverso a la distancia con los datos UCS Puros



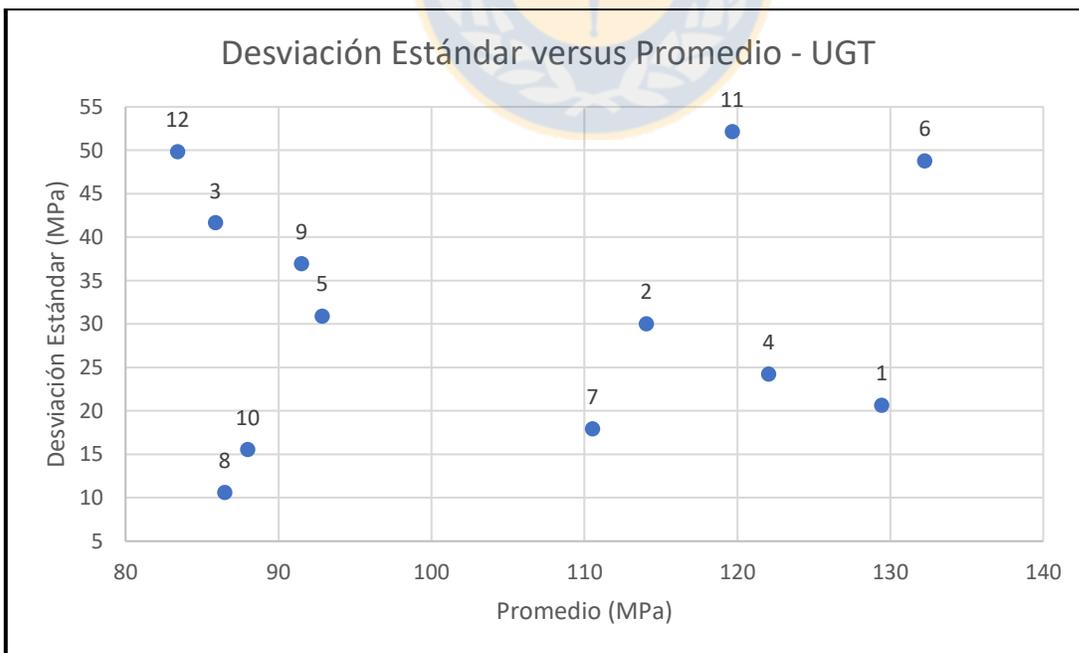
4. Gráficos de deriva del modelo KO con datos UCS Puros



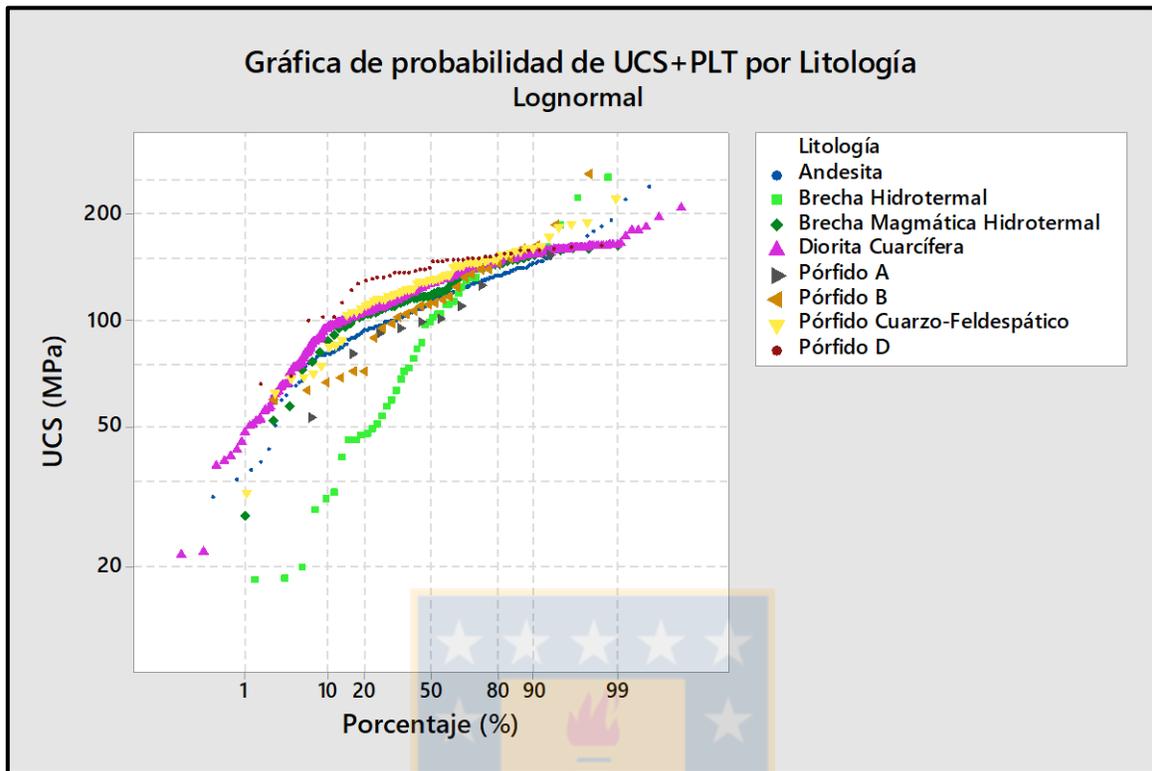
5. Probabilidad de UCS+PLT por UGT



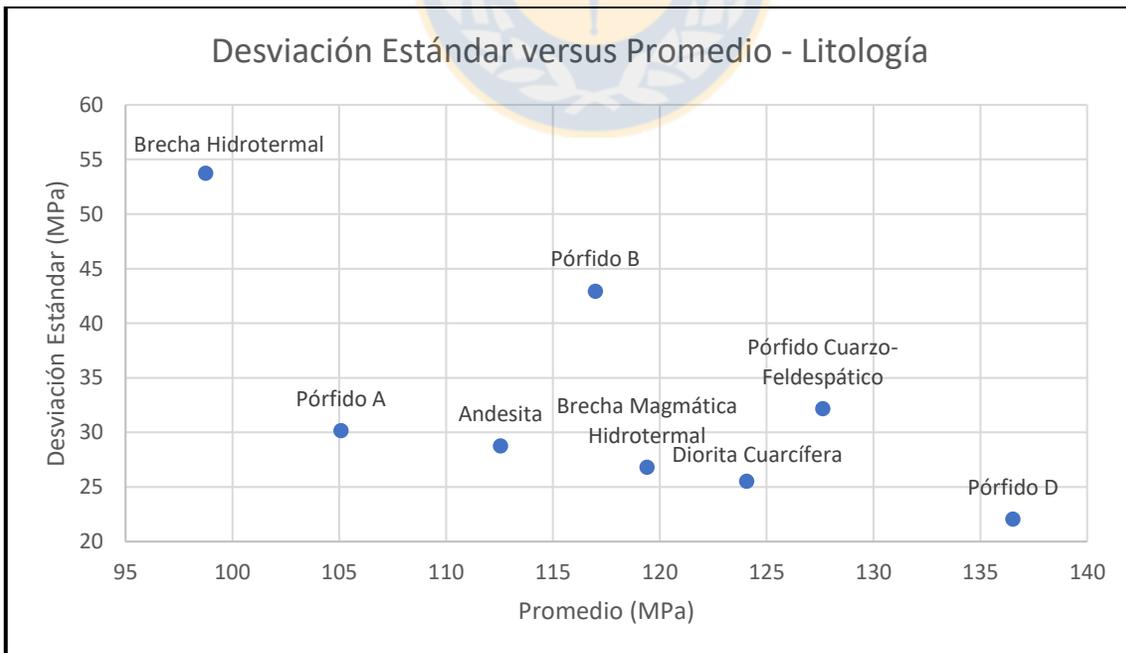
6. Desviación estándar versus promedio de las distintas UGT



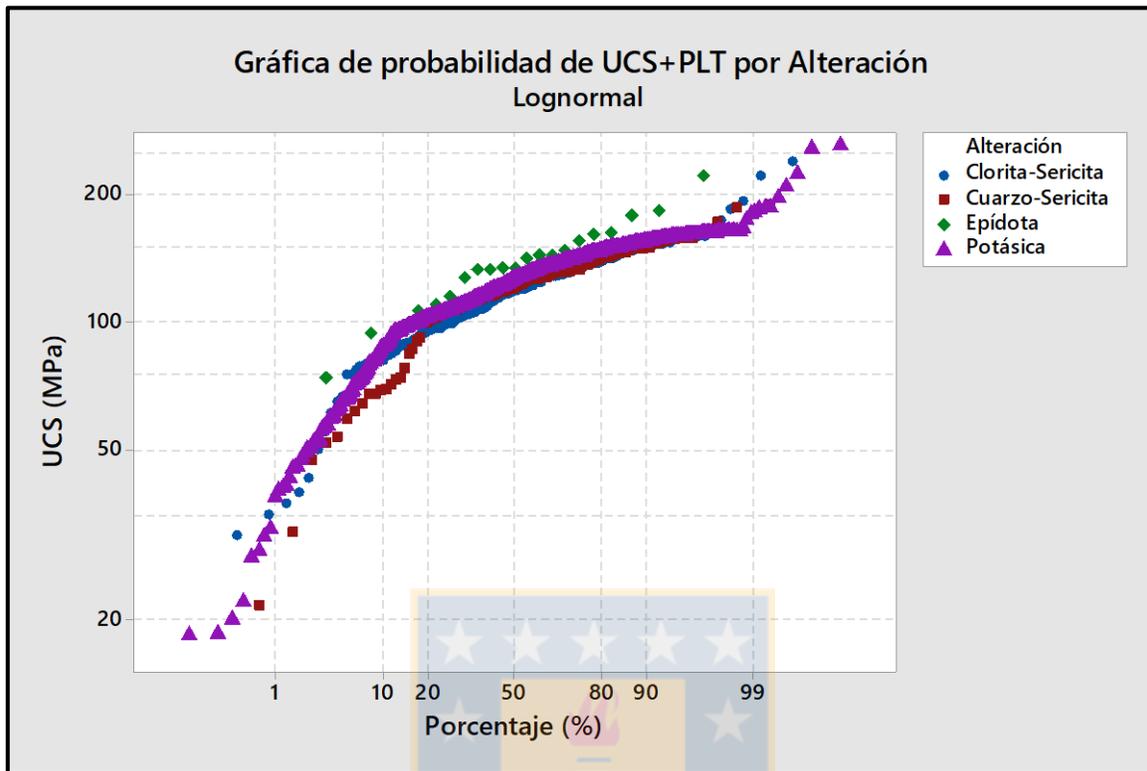
7. Probabilidad de UCS+PLT por Litología



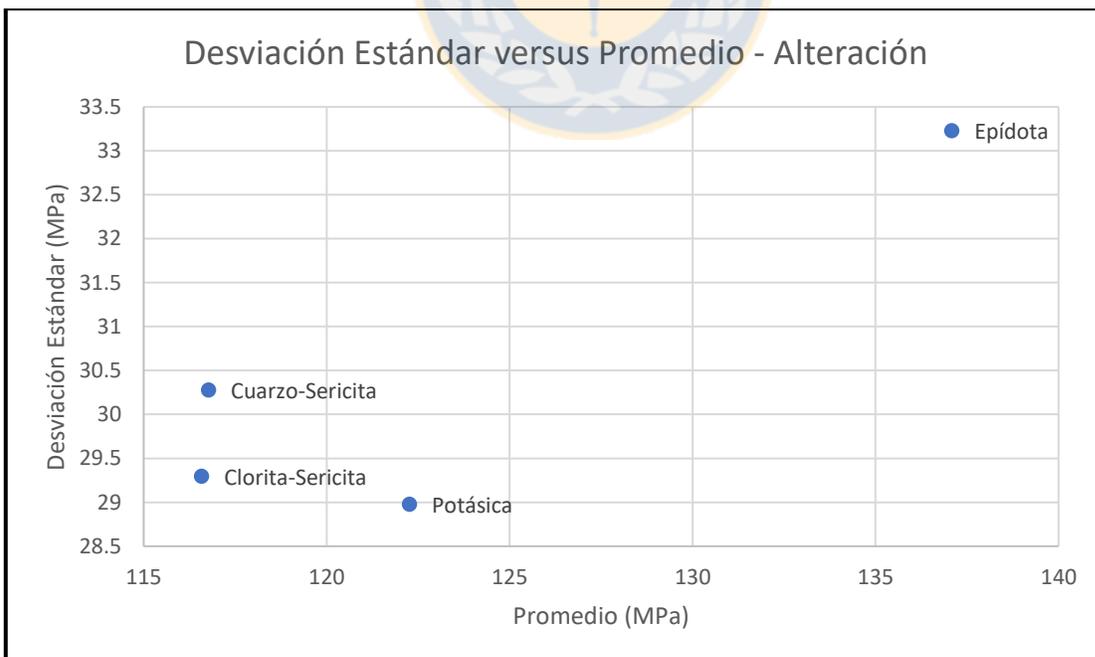
8. Desviación estándar versus promedio de las distintas litologías



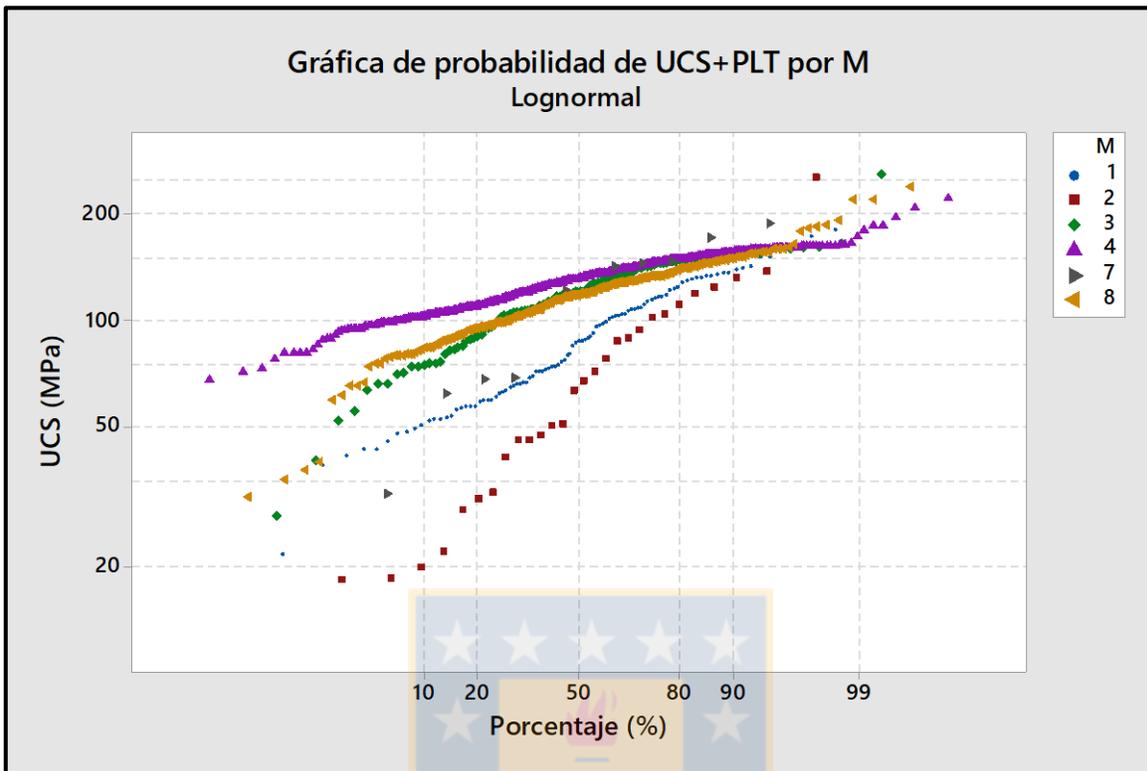
9. Probabilidad de UCS+PLT por Alteración



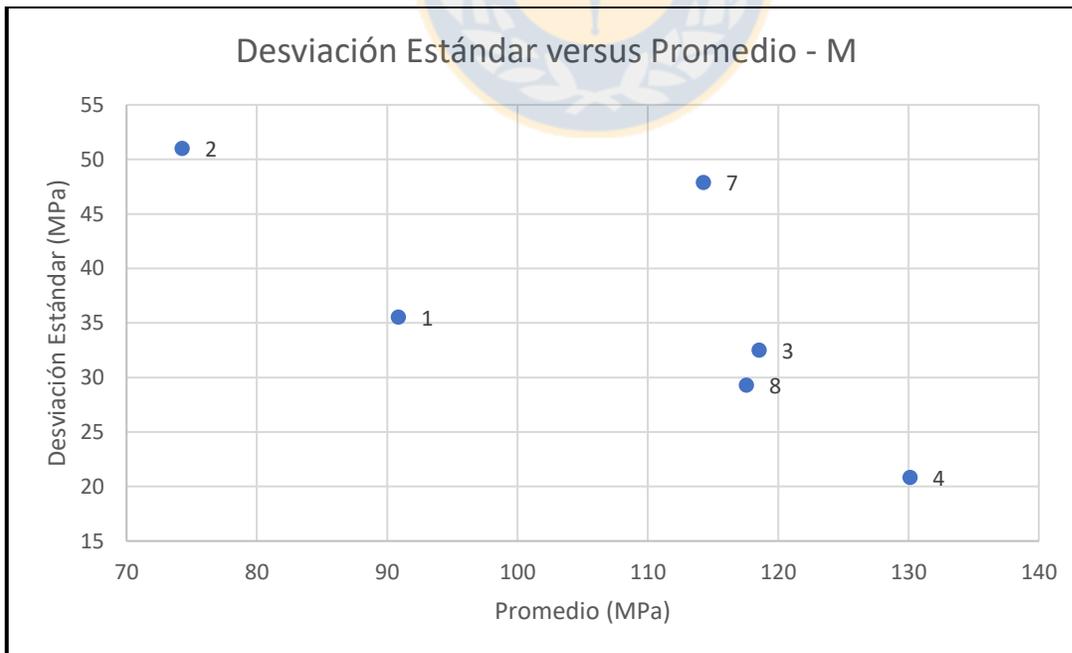
10. Desviación estándar versus promedio de las distintas alteraciones



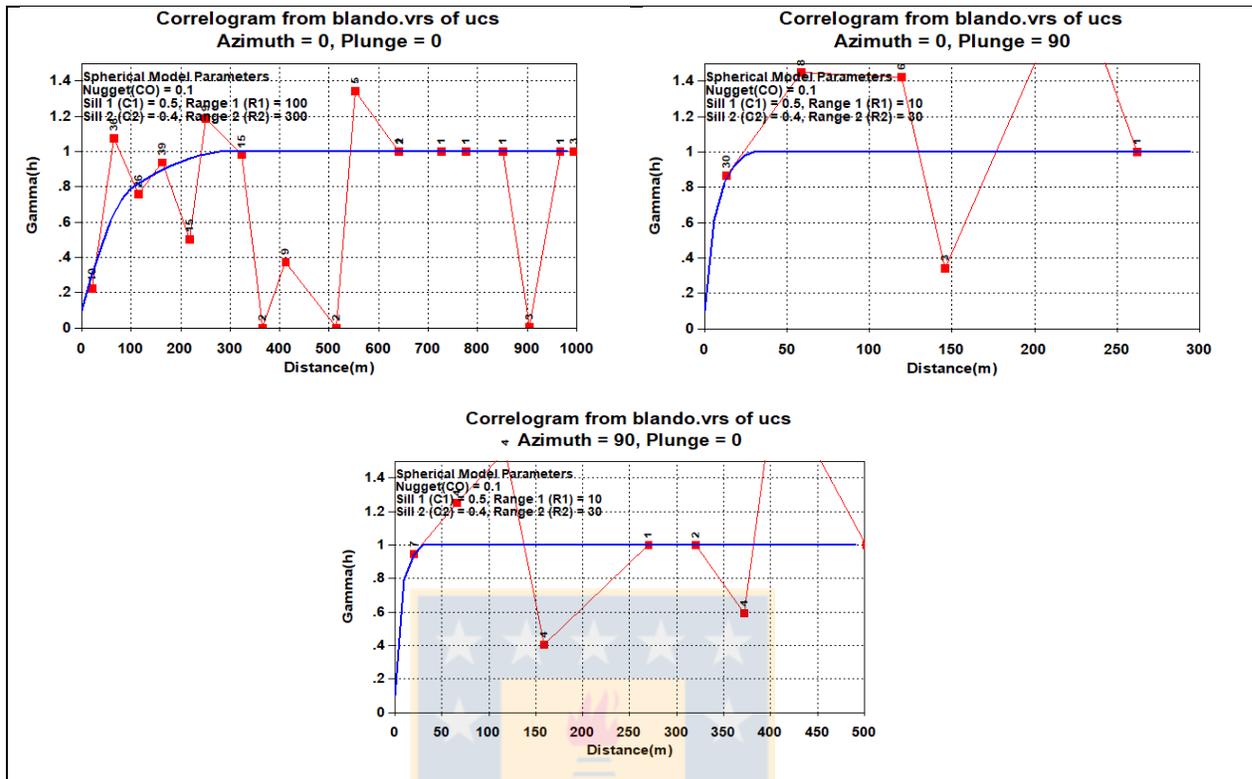
11. Probabilidad de UCS+PLT por M



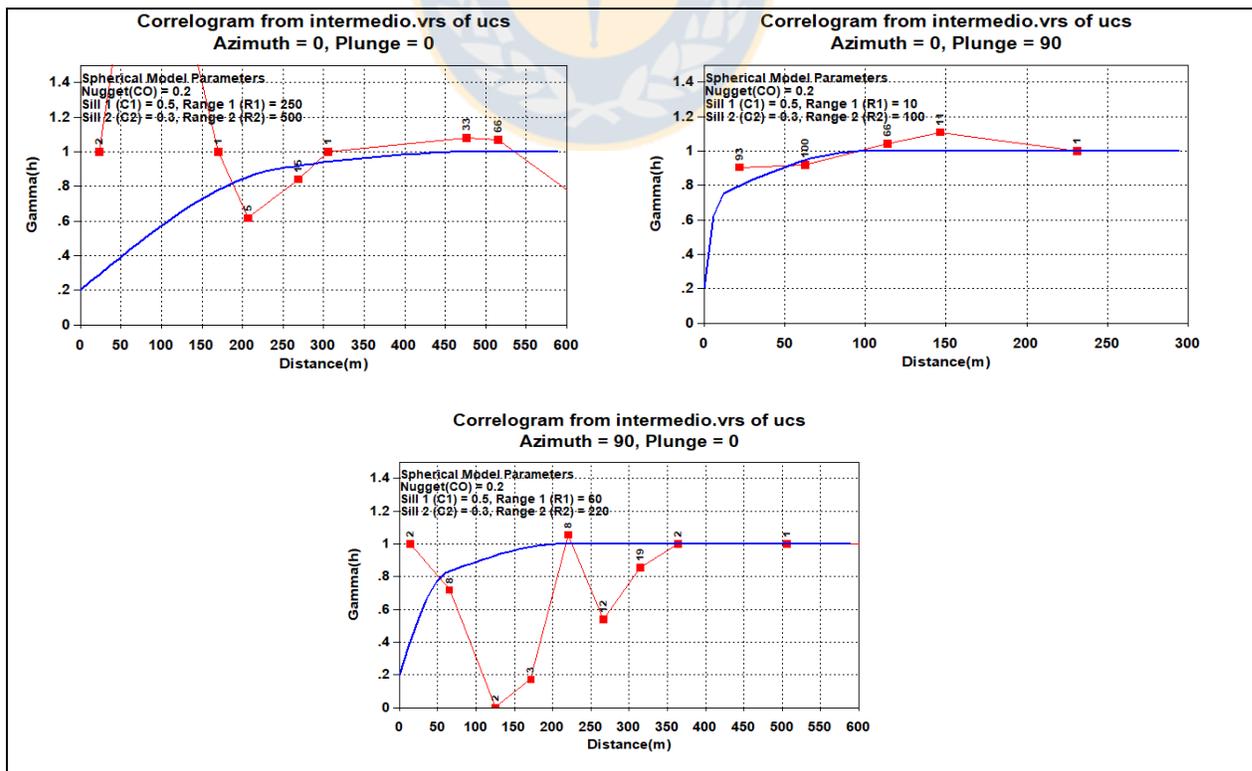
12. Desviación estándar versus promedio de las distintas M



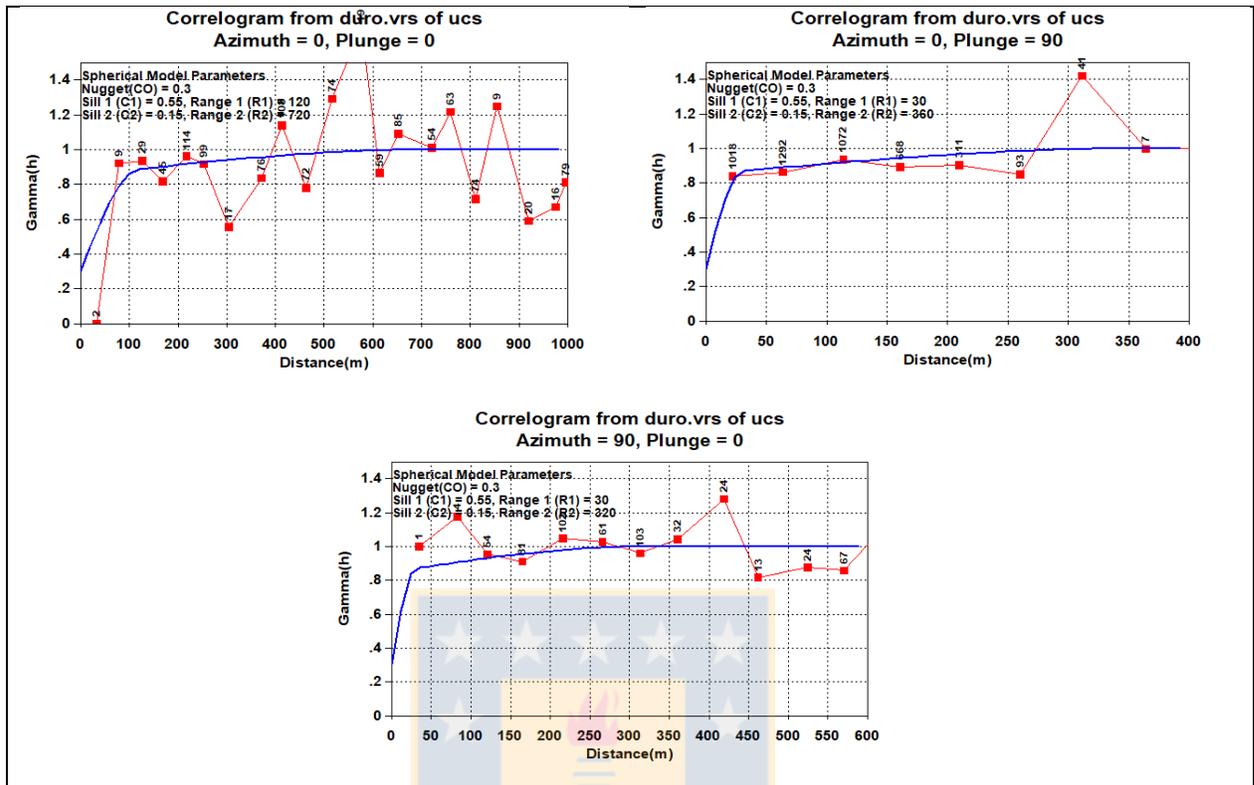
13. Correlogramas en tres direcciones ortogonales para el Dominio Blando



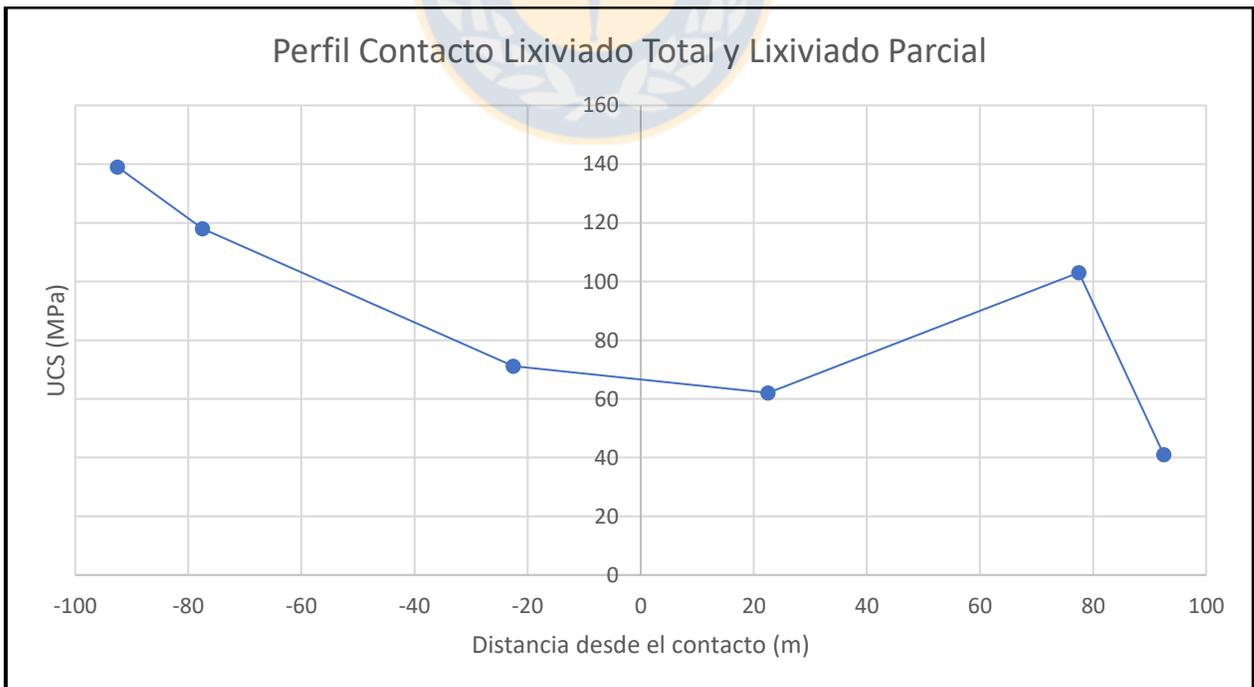
14. Correlogramas en tres direcciones ortogonales para el Dominio Intermedio



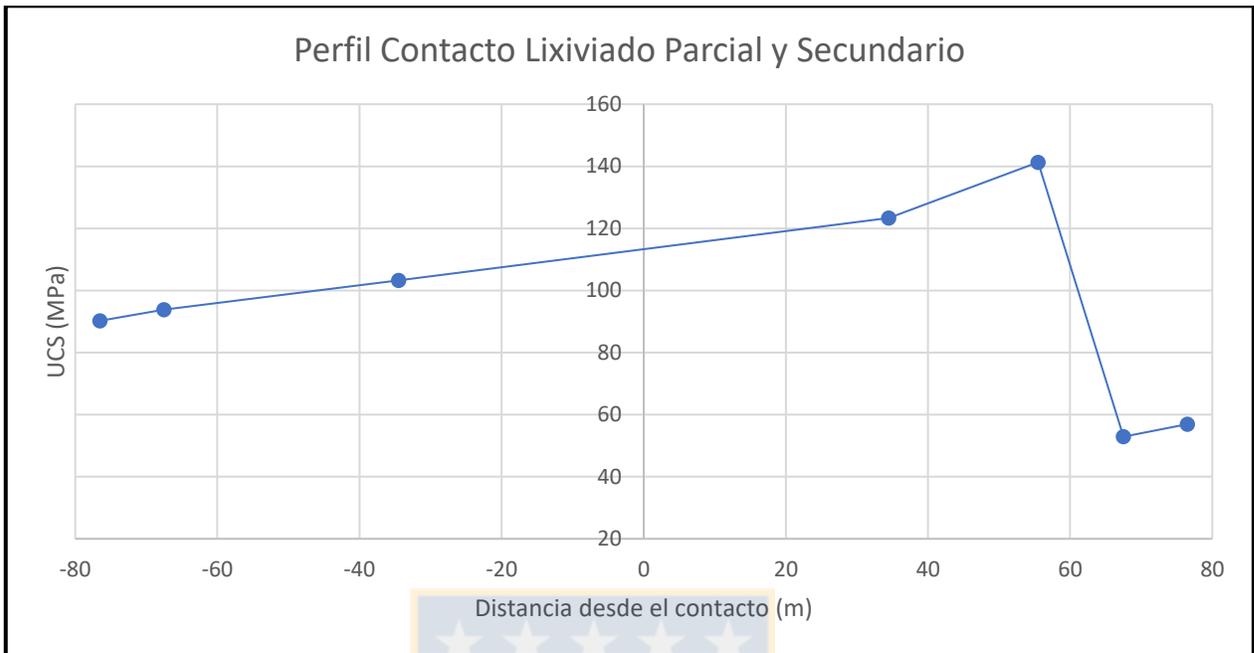
15. Correlogramas en tres direcciones ortogonales para el Dominio Duro



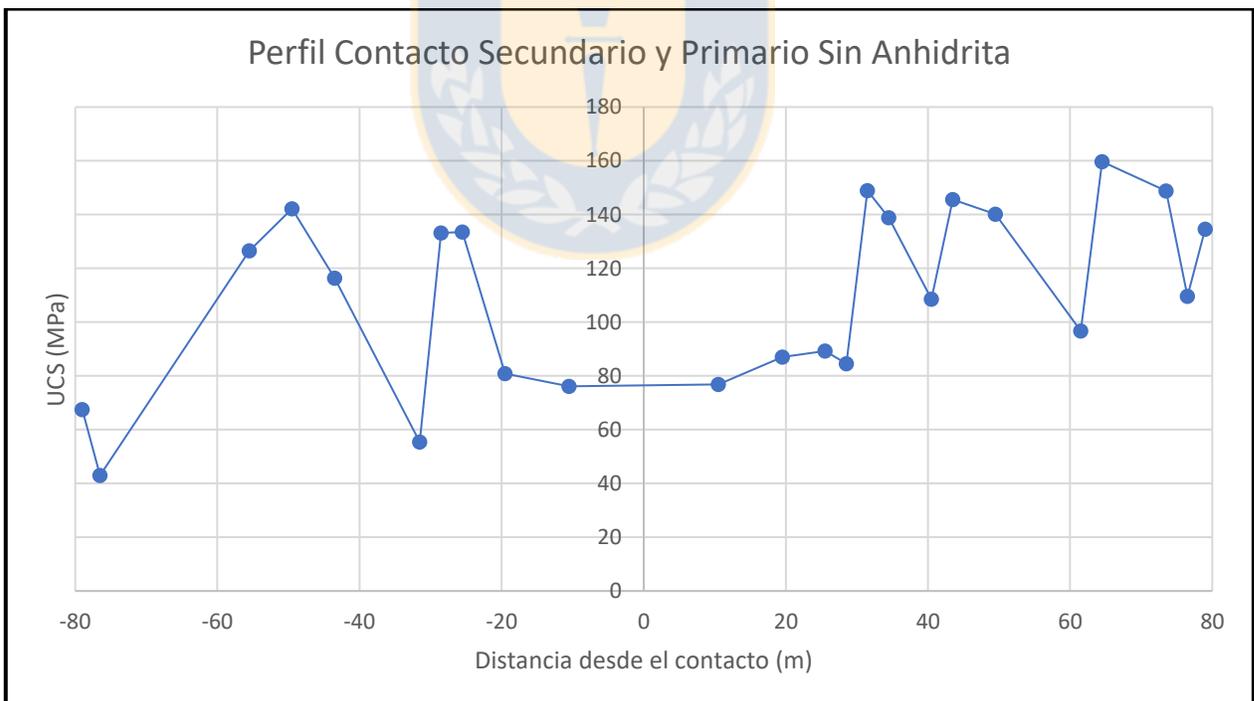
16. Perfil de contacto entre Lixiviado Total y Lixiviado Parcial



17. Perfil de contacto entre Lixiviado Parcial y Secundario



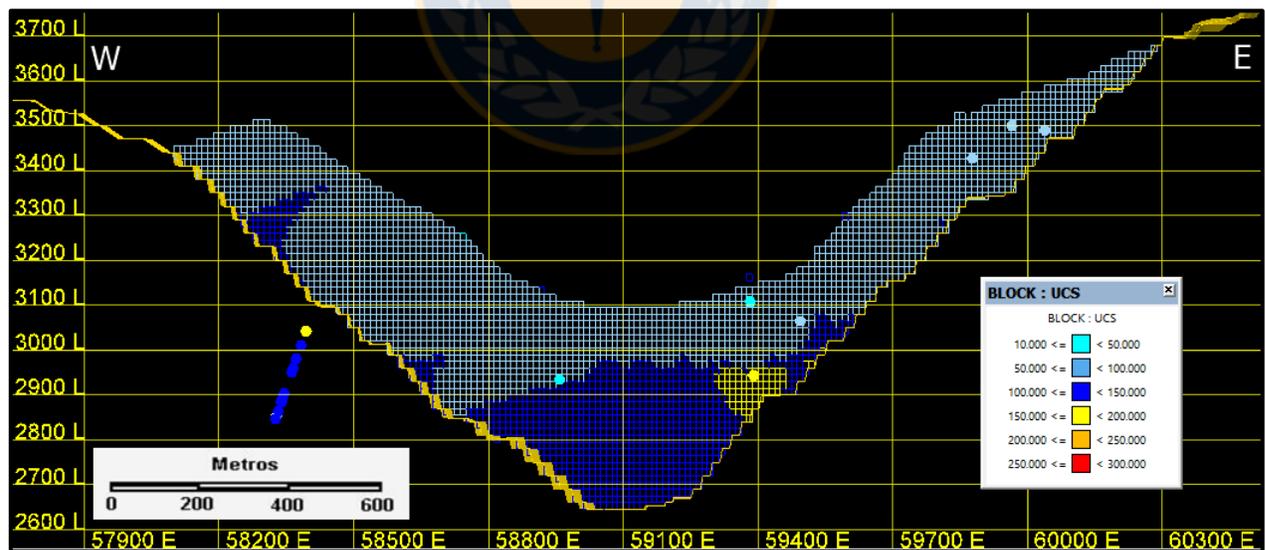
18. Perfil de contacto entre Secundario y Primario Sin Anhídrita



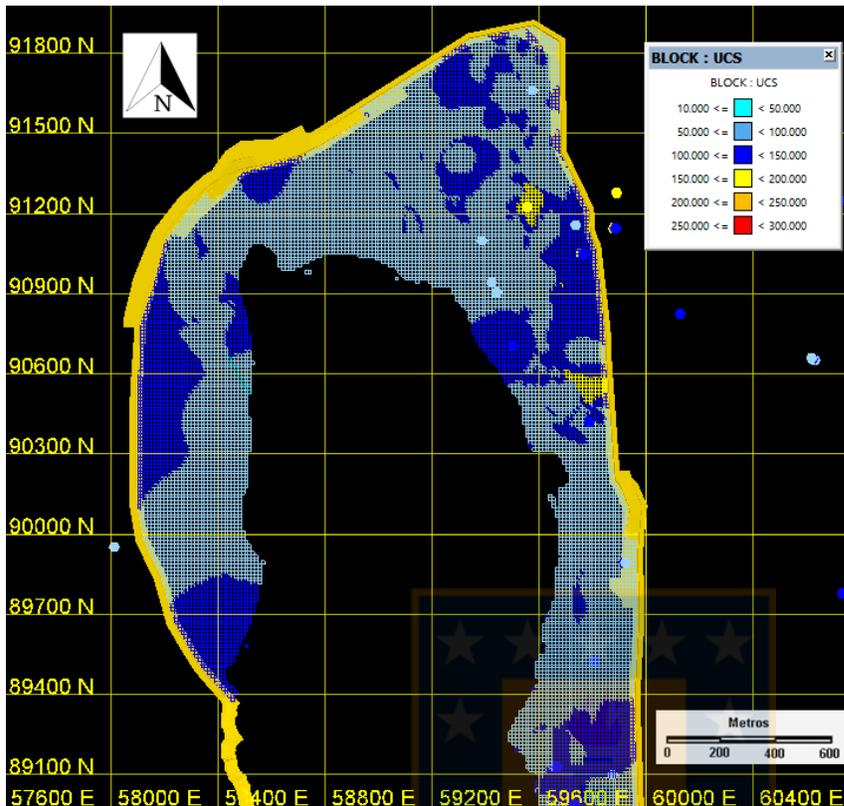
19. Perfil de contacto entre Primario Sin Anhídrita y Primario Con Anhídrita



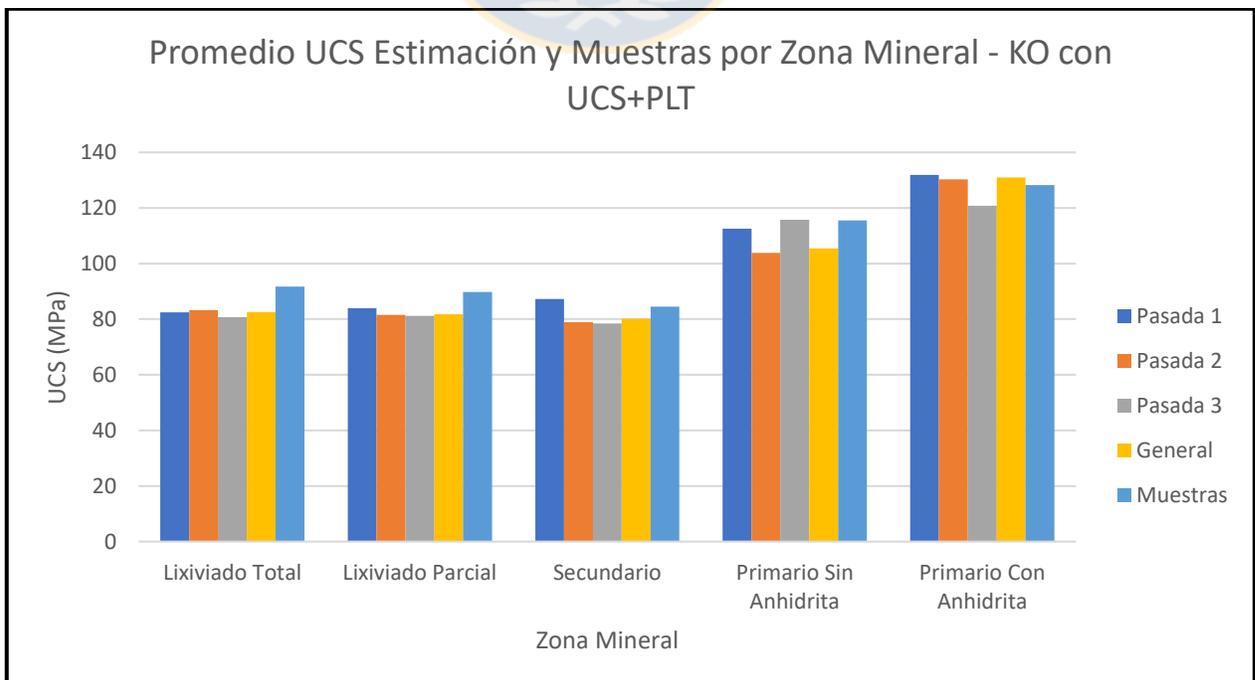
20. Validación visual del modelo de bloques en perfil sección 89.840 del modelo KO de UCS+PLT



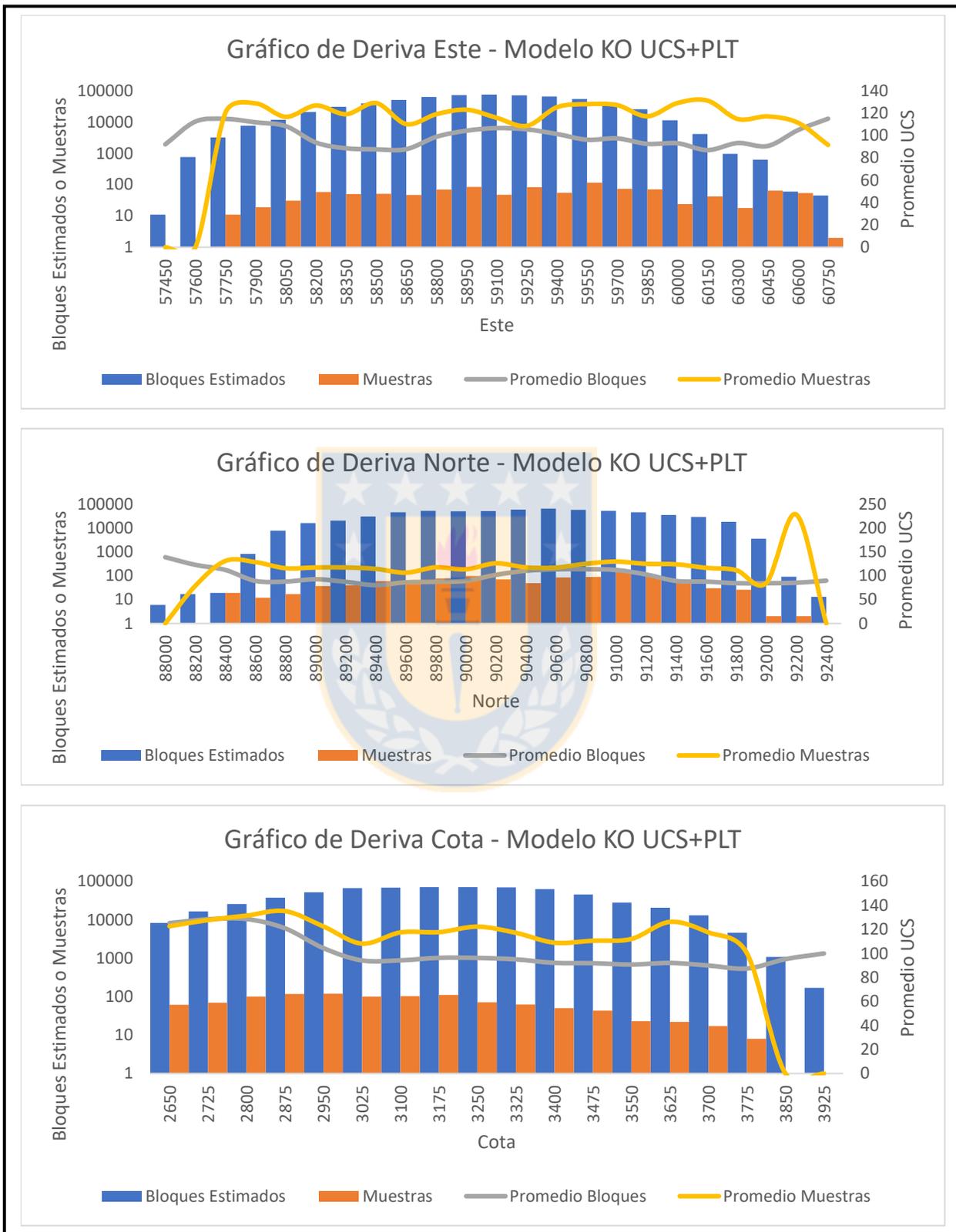
21. Validación visual del modelo de bloques en nivel 3.360 del modelo KO de UCS+PLT



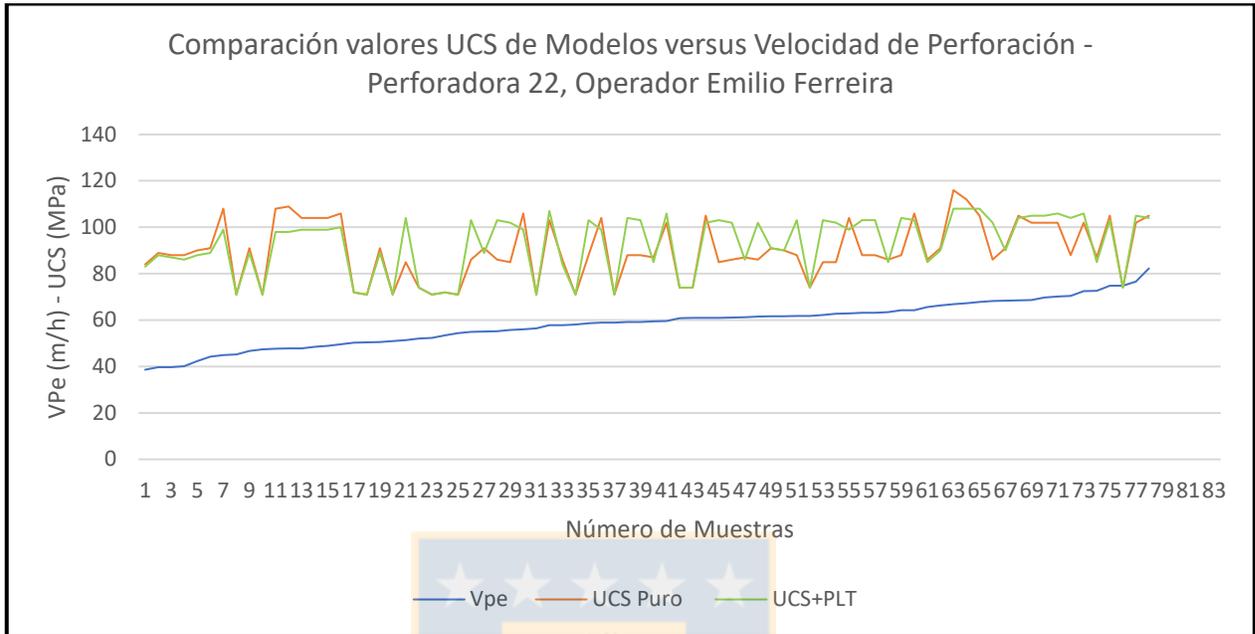
22. Promedio UCS estimado y Muestras por Zona Mineral y pasadas para la estimación por inverso a la distancia con los datos UCS+PLT



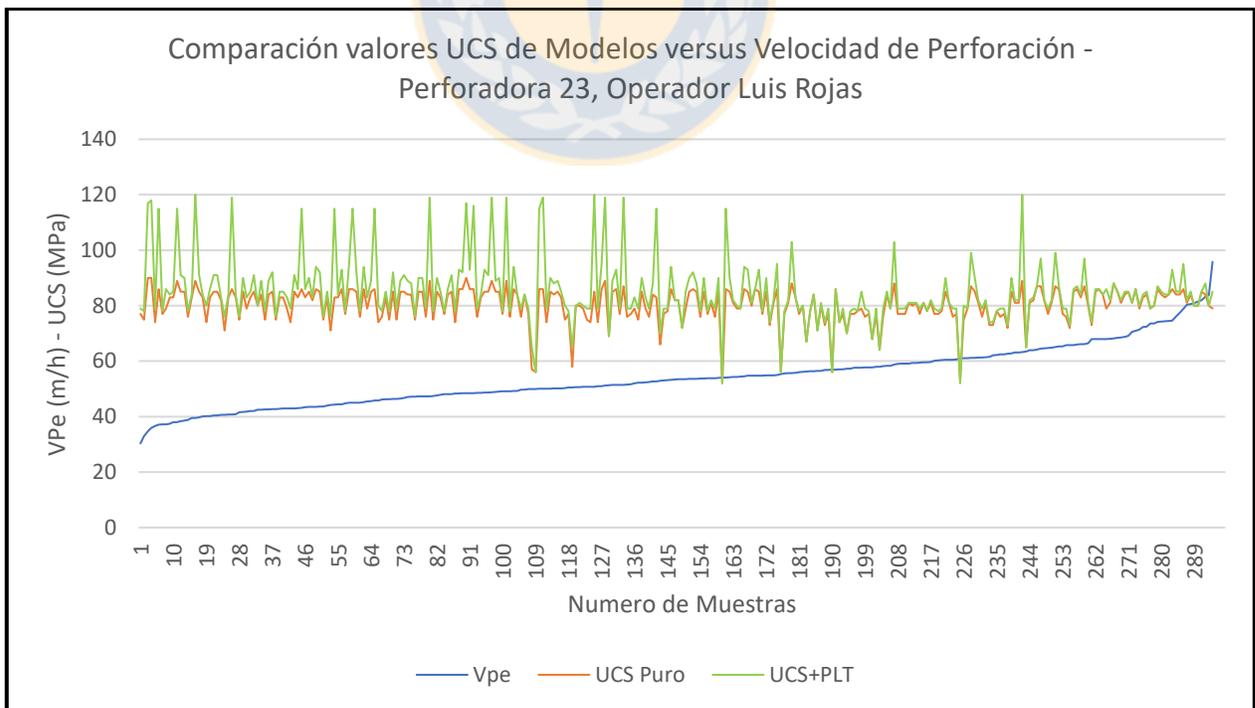
23. Gráficos de deriva del modelo KO con datos UCS+PLT



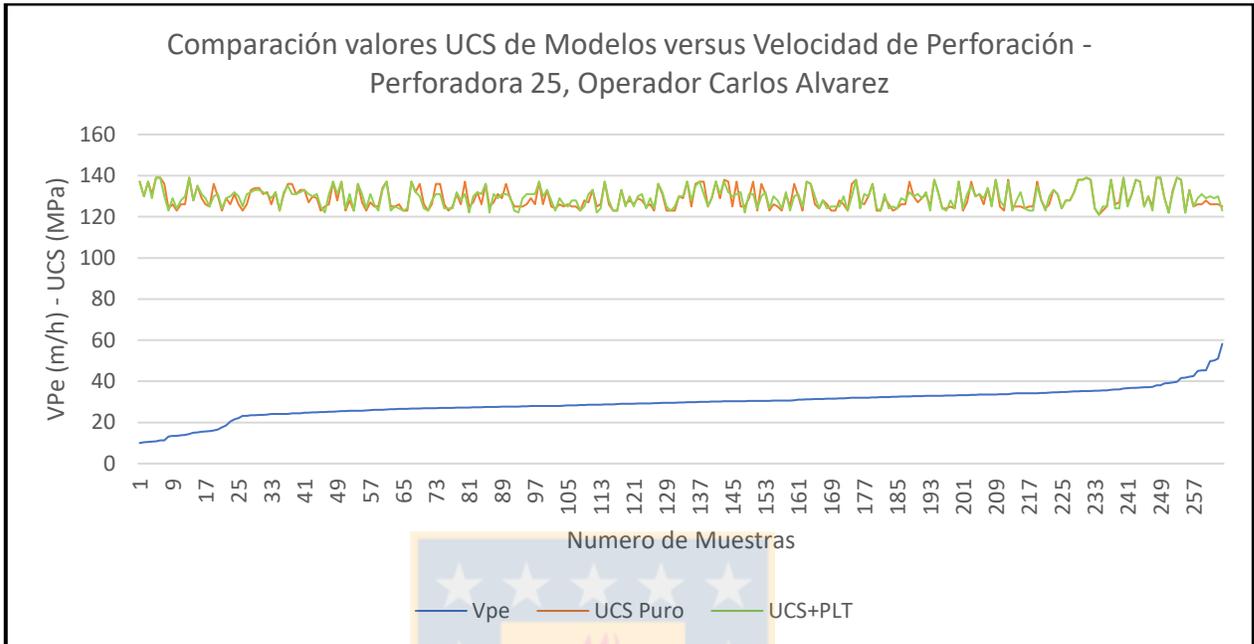
24. Comparación entre los modelos con UCS Puro y UCS+PLT frente a las Velocidades de Perforación (Perforadora 21, Operador Jonathan Lara)



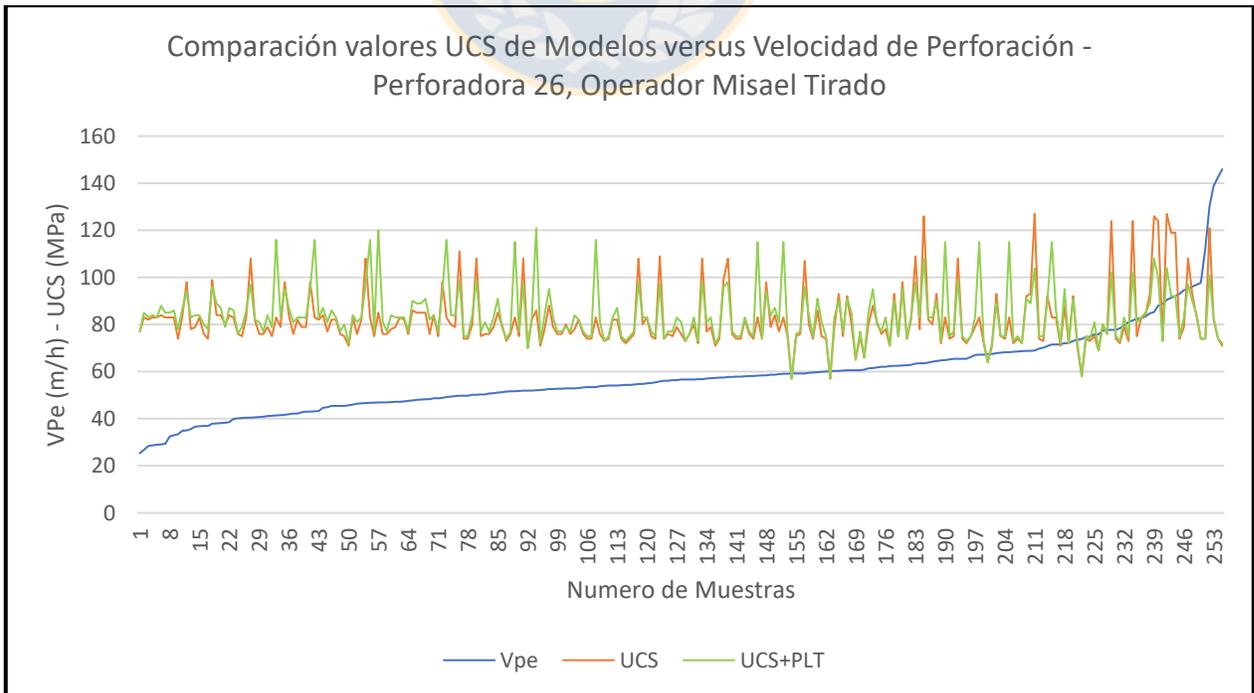
25. Comparación entre los modelos con UCS Puro y UCS+PLT frente a las Velocidades de Perforación (Perforadora 21, Operador Jonathan Lara)



26. Comparación entre los modelos con UCS Puro y UCS+PLT frente a las Velocidades de Perforación (Perforadora 21, Operador Jonathan Lara)



27. Comparación entre los modelos con UCS Puro y UCS+PLT frente a las Velocidades de Perforación (Perforadora 21, Operador Jonathan Lara)



28. Comparación entre los modelos con UCS Puro y UCS+PLT frente a las Velocidades de Perforación (Perforadora 21, Operador Jonathan Lara)

