



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ANÁLISIS DE ASERTIVIDAD DEL MODELO GEOLÓGICO DE LARGO  
PLAZO A PARTIR DEL MAPEO INTERIOR MINA. SCM CAROLA (REGIÓN  
DE ATACAMA, CHILE)**

María José Hormazábal Tejada

**Copiapó, Chile 2024**



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ANÁLISIS DE ASERTIVIDAD DEL MODELO GEOLÓGICO DE LARGO  
PLAZO A PARTIR DEL MAPEO INTERIOR MINA. SCM CAROLA (REGIÓN  
DE ATACAMA, CHILE)**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de  
Geólogo.

Profesor Guía: Francisco Tapia Guerra

María José Hormazábal Tejada

**Copiapó, Chile 2024**

## **Dedicatoria**

*A mis padres, Jaime y Erna, por su gran apoyo y amor incondicional*

*“No te rindas, aun estas a tiempo  
de alcanzar y comenzar de nuevo,  
aceptar tus sombras, enterrar tus miedos,  
liberar el lastre, retomar el vuelo...”*

*Mario Benedetti, No te rindas.*

## **Agradecimientos**

En primer lugar quiero agradecer a mis padres Jaime y Erna, por su gran apoyo. A pesar de la distancia física, desde Coyhaique, siempre han estado presentes y me han dado calma en los momentos difíciles, me han enseñado la perseverancia, humildad, paciencia, empatía y la fé en Dios, entre muchas cosas más. Sin ellos nada de esto habría sido posible.

A mis hermanos, Marcelo y Rodolfo, por estar siempre presentes en los momentos difíciles, con palabras de aliento y consejos de vida. También agradecer a mi mascota Toby, su amor y travesuras siempre me ha alegrado la vida.

También agradecer a mi profesor guía, Francisco Tapia, quien me apoyo y me acepto como su tesista, por su paciencia y buena voluntad. A minera Carola, por darme la oportunidad de realizar el presente trabajo de titulación.

Agradezco a mi padrino Waldo, quien me ha apoyado siempre, escuchándome y aconsejándome en los momentos que lo necesite, por su amor y su gran voluntad.

Desde que llegue a Copiapó, agradezco a todas las personas que me han acogido. A mis compañeros con los cuales muchas veces pasé navidad y año nuevo, fechas en las que siempre estuvimos solos aquellos que somos de regiones.

Mis amigos sin duda han sido fundamental durante este proceso, agradezco a todos quienes me han entregado su amistad y en particular, agradecer a mis amigas de la universidad, quienes hicieron más entretenidas las clases y trabajos grupales.

A mis amigos de escalada, los Presi, gracias por enseñarme este deporte tan lindo, que me ha dado muchas alegrías y desafíos mentales, enfrentar los miedos y progresar. Las tardes de escalada siempre fueron un día de desconexión total, llegar a la casa siempre feliz por la superación personal. Las conversaciones en la roca, las risas y también las celebraciones.

En especial quiero agradecer a Nicole, por escucharme siempre en los momentos de mayor angustia, por tener los consejos precisos y por ayudarme en todas mis dudas relacionadas con la tesis. A Jessica, por ser una amiga incondicional y estar siempre presente en mi vida.

## Resumen

En este trabajo se exponen la confección y comparación de los modelos geológicos de largo plazo y corto plazo, mediante la utilización del software Leapfrog Geo. Estos modelos fueron creados a través de la información proporcionada por sondajes diamantinos de exploración e infill, mapeo de interior mina, y en el caso del nivel 36, se realizaron 7 sondajes de producción. Esta información se ingresó al software donde se crearon dos *boundary* (límites del modelo), el primero para los niveles 150 (caserón 3T), 70 (caserón 9T) y el segundo para el nivel 36 (caserón 51A-E1).

Dentro del *boundary* del caserón 3T y 9T no hubo cambios significativos respecto al contacto litológico entre las unidades geológicas oficiales de la mina; Andesitas inferiores, Tobas de Agustina (TA) y Sedimentos Rojos (SR). De acuerdo al mapeo de interior mina, realizado en las labores de los niveles 150 y 70, se observaron cambios en el contacto (menores a tres metros) de las Andesitas inferiores con los Sedimentos Rojos. Sin embargo, éste no fue relevante al momento de comparar los modelos geológicos de largo plazo versus corto plazo. No obstante, en dicha comparación, se observó una disminución importante del volumen de los Sedimentos Rojos, en el modelo geológico de corto plazo.

Dentro del *boundary* del caserón 51A-E1, correspondiente al nivel 36, sí se encontraron cambios considerables en el contacto litológico de las Andesitas inferiores con las unidades Sedimentos Rojos y Tobas de Agustina. Esto se identificó en el mapeo de interior mina, en conjunto con la realización de los 7 sondajes de producción; cuya finalidad fue obtener mayor información de las unidades litológicas, reduciendo así el grado de incertidumbre. La información proporcionada por estos sondajes fue de vital importancia al momento de crear el modelo geológico de corto plazo, generando un cambio importante dentro del caserón 51A-E1. Debido a este cambio se generó un rediseño de la geometría del caserón, para beneficiar de mejor forma el recurso y su valor económico.

En la información obtenida del presente trabajo, se concluye la importancia de los sondajes de producción, como complemento del mapeo de interior mina, para la creación del modelo geológico de corto plazo, preciso en aquellos caserones que sostienen la producción anual de la mina.

CAPITULO I: Marco introductorio .....	9
1.1.    Introducción .....	9
1.2.    Planteamiento del problema.....	10
1.3.    Hipótesis.....	11
1.4.    Objetivos .....	11
1.4.1.    Objetivo General .....	11
1.4.2.    Objetivo Específico.....	11
1.5.    Área de estudio: Ubicación y acceso .....	11
CAPITULO II: Marco Geológico .....	13
2.1.    Alteración hidrotermal .....	13
2.2.    Depósitos IOCG (Fe-Cu-Au) .....	14
2.3.    Geología Regional.....	14
2.4.    Antecedentes metalogénicos del distrito Candalaria-Punta del Cobre .....	16
2.5.    Geología local .....	20
2.5.1.    Unidades litológicas del yacimiento Carola y alteración hidrotermal .....	20
2.5.1.1.    Dioritas.....	21
2.5.1.2.    Diques Lamprofíricos .....	21
2.5.1.3.    Grupo Chañarcillo.....	21
2.5.1.4.    Punta del Cobre superior (Kpcvs).....	22
2.5.1.5.    Tobas de Agustina (TA) .....	22
2.5.1.6.    Sedimentos Rojos (SR).....	23
2.5.1.7.    Brecha de Techo (BT).....	23
2.5.1.8.    Albitófiro .....	24
2.5.1.9.    Andesitas inferiores (Kpcli).....	25
2.6.    Geología estructural del yacimiento Carola .....	25
CAPITULO III: Metodología .....	27
3.1.    Recopilación Bibliográfica.....	27
3.2.    Trabajo de terreno .....	27
3.2.1.    Mapeo geológico interior mina .....	27
3.2.2.    Logueo de Sondaje (caserón 51A-E1) .....	29
3.3.    Muestreo y Descripción Macroscópica.....	31

3.4.	Trabajo de Gabinete .....	31
3.4.1.	Digitalizar los datos obtenidos en software AutoCAD .....	31
3.4.2.	Georreferenciar los datos obtenidos en software Leapfrog Geo .....	32
3.4.3.	Modelamiento Geológico.....	33
3.4.3.1.	Modelo geológico largo plazo .....	33
3.4.3.2.	Modelo geológico corto plazo .....	33
3.4.3.3.	Análisis comparativo del modelo geológico largo plazo versus modelo geológico corto plazo .....	34
CAPITULO IV: Resultados .....		35
4.1.	Mapeo interior mina y digitalización en AutoCAD .....	35
4.1.1.	Nivel 150.....	35
4.1.2.	Nivel 70.....	38
4.1.3.	Nivel 36.....	42
4.2.	Descripción litológica .....	44
4.2.1.	Nivel 150 (caserón 3T).....	45
4.2.2.	Nivel 70 (caserón 9T).....	46
4.2.3.	Nivel 36 (caserón 51A-E1) .....	46
4.3.	Digitalización y creación del modelo geológico a largo plazo en Leapfrog Geo .....	47
4.3.1.	Niveles 150 (caserón 3T) y 70 (caserón 9T).....	47
4.3.1.1.	Modelo geológico a largo plazo del nivel 150, caserón 3T .....	48
4.3.1.2.	Modelo geológico a largo plazo del nivel 70, caserón 9T .....	53
4.3.2.	Modelo geológico a largo plazo del nivel 36, caserón 51A-E1 .....	57
4.4.	Construcción del modelo geológico a corto plazo en Leapfrog Geo .....	61
4.4.1.	Modelo geológico a corto plazo del nivel 150, caserón 3T .....	61
4.4.2.	Modelo geológico a corto plazo del nivel 70, caserón 9T .....	64
4.4.3.	Modelo geológico a corto plazo del nivel 36, caserón 51A-E1 .....	67
4.5.	Comparación del Modelo Geológico de Largo Plazo versus el Modelo Geológico de Corto Plazo .....	69
CAPITULO V: Discusión.....		77
CAPITULO VI: Recomendaciones.....		84
CAPITULO VII: Conclusiones.....		85
Referencias bibliográficas.....		86

## Índice de ilustraciones y cuadros

Figura 1: En A se muestra Chile con sus respectivas regiones, destacando de color rosado, la región de Atacama. En B se observa la carretera C-33 (color naranja) con la intersección del camino a minera Carola, también se marca con una flecha de color negro, la entrada oficial a SCM Carola. En C se muestra la ubicación de SCM Carola, señalada con una flecha de color blanco, además, se indican la ubicación del chancado, las oficinas de la Superintendencia de Geología y la entrada al socavón Carola. Mapas de elaboración propia.....	12
Figura 2: Diagrama de clasificación de alteración, en función de temperatura y pH. Modificado de Corbett y Leach (1998).....	13
Figura 3: Imagen que muestra la ubicación de los Depósitos IOCG y su edad en el norte de Chile, también se observa la continuidad del SFA (Modificado de Sillitoe 2003). ....	17
Figura 4: Se muestra el perfil A-A', ubicado en el mapa de la figura 5. En esta imagen se puede observar el Anticlinorio de Tierra Amarilla (Tierra Amarilla Anticlinorium), con sus respectivas unidades y la ubicación de Carola (Extraído de Del Real et al., 2018)...	18
Figura 5: Mapa donde se muestra la ubicación espacial de los depósitos pertenecientes al distrito Punta del Cobre. En la leyenda se puede observar las litologías que forman parte del Grupo Chañarcillo, Formación Punta del Cobre y Batolito Copiapó (Modificado de Arévalo 1999).....	19
Figura 6: Columna representativa de las unidades geológicas oficiales presentes en el yacimiento Carola. Modificado de Marschik y Fontbote, 2001. ....	20
Figura 7: En la imagen A, se muestra la frente de la labor con líneas punteadas de color blanco, indicando las partes de la labor. En B se puede ver la misma frente desde una distancia mayor y las cajas de la labor. ....	28
Figura 8: Bosquejo que muestra los implementos y como se realiza el mapeo en interior mina (elaboración propia). ....	29
Figura 9: Esta imagen muestra la tabla y sus parámetros, los cuales son rellenados a través del logueo en el software GVMapper. ....	30
Figura 10: Imagen que muestra el sondaje de producción DDH-3825, en la línea segmentada de color azul se encuentra la unidad Andesitas inferiores, destacándose con línea segmentada de color rojo, la mineralización de calcopirita y pirita. En la línea segmentada de color amarillo, se encuentra la unidad de Tobas de Agustina. La línea segmentada de color verde, muestra la unidad de Sedimentos Rojos. En la parte superior está indicado el nombre del sondaje, el número de cajas y el metro donde inicia y termina el sondaje de la fotografía. ....	30
Figura 11: Leyenda y simbología utilizada para la digitalización del mapa de mina. Cpy = calcopirita; Py = pirita; Esp = especularita; Mt = magnetita.....	32
Figura 12: Se muestra donde ingresar una imagen al software Leapfrog Geo y georreferenciarla. ....	32
Figura 13: Imagen digitalizada en AutoCAD del mapeo de interior mina, en el nivel 150, caserón 3T, donde se muestra las litologías, mineralización y estructuras presentes. ....	36

Figura 14: En A se muestra el mapa de planta del nivel 150, caserón 3T, con el cual se ingresó a interior mina, en B se muestra la digitalización en AutoCAD. ....	37
Figura 15: Muestra la digitalización en el software AutoCAD con las unidades litológicas, alteración, mineralización y estructuras presentes del área. ....	38
Figura 16: Fotografías que muestran los dos diques presentes. En A se ve el dique de NP-3S y CZ-6. En B el dique en la labor NP-2. ....	41
Figura 17: En A se muestra la parte norte del caserón mapeado con el mapa de planta, en B se muestra la parte sur del caserón mapeado y en C se muestra la digitalización en el software AutoCAD. ....	41
Figura 18: Se muestra la digitalización del mapeo interior mina, del caserón 51A-E1 en el software AutoCAD. ....	42
Figura 19: En A se muestra el mapa de plan con el cual se ingresó a interior mina y en B se muestra la digitalización de dicho mapa en el software AutoCAD. ....	44
Figura 20: En A se puede ver la muestra de la unidad representativa de las Andesitas inferiores. En B Muestra representativa de la unidad Microdiorita Cuarcífera. En C Fotografía de la muestra representativa de los Sedimentos Rojos. En D Muestra representativa de la unidad Toba de Agustina. ....	45
Figura 21: Se muestra el boundary de los caserones 3T y 9T, de color amarillo se ve el caserón 3T y en color verde el caserón 9T. ....	48
Figura 22: Se muestra el diseño de las labores de color café y el caserón en color gris, A y B son distintas vistas del mismo caserón y mismas labores. ....	49
Figura 23: Se muestran distintas vistas de los sondajes que intersectan el caserón, el cual está representado en color gris. En A, B y C se puede observar con mayor claridad donde se encuentran los Sedimentos Rojos (dentro del círculo de color amarillo), de acuerdo a la información entregada por los sondajes. En D se ve el boundary completo del modelo geológico de largo plazo y los sondajes que se utilizaron para su construcción. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos). ....	49
Figura 24: Se muestra la creación de los sólidos correspondiente a la unidad litológica Sedimentos Rojos (SR). En A, B, C y D, se pueden apreciar distintas vistas del caserón con los sondajes y el sólido encerrado en un círculo amarillo. ....	50
Figura 25: Se muestra en A y B, un corte del modelo para poder observar donde se presenta los Sedimentos Rojos y las Tobas de Agustina. En C se observa con más cercanía el caserón, siendo visible que, en el inicio y final de la labor, afloran las Tobas de Agustina, estas se encuentran encerradas en un círculo de color amarillo. En D se muestra el boundary con los sólidos de los Sedimentos Rojos (SR), Tobas de Agustina (TA) y Microdiorita Cuarcífera. ....	51
Figura 26: En A y B, se observa el contacto entre el caserón de color gris con las Andesitas inferiores de color verde claro y los Sedimentos Rojos de color rojo, se encuentran encerrados en un círculo de color amarillo. En C se ve desde una vista más alejada, el boundary en conjunto con las unidades litológicas Andesitas inferiores, Sedimentos Rojos y Microdiorita Cuarcífera. También se observan los sondajes utilizados para la creación de los sólidos. En D se ve el modelo geológico de largo plazo final. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos). ....	52

Figura 27: Se muestra en A, B, C y D, distintas vistas del modelo geológico a largo plazo, construido en base a la información entregada por los sondajes realizados por SCM Carola. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).....52

Figura 28: En A y B, se muestra el caserón 9T de color gris, en conjunto con las labores de color café. ....53

Figura 29: Se muestran los sondajes que intersectan el caserón 9T, estos fueron utilizados para crear el modelo geológico a largo plazo.....54

Figura 30: Se muestra la creación de los sólidos de la unidad Sedimentos Rojos en conjunto con la intersección del caserón y la labor, en blanco están escrito los nombres de las labores donde se ven los Sedimentos Rojos. ....55

Figura 31: Se muestra el boundary y distintas vistas de las Tobas de Agustina (TA), las cuales están de color calipso, en conjunto con los sondajes utilizados para su creación. También se puede observar el caserón en color gris y la labor de color café, junto con la unidad de Microdiorita Cuarcifera en color rosado. ....56

Figura 32: En A y B se muestra la unidad Andesitas inferiores, en contacto con la unidad Sedimentos Rojos. En C, se ve el contacto con las Andesitas inferiores, Sedimentos Rojos y la Microdiorita Cuarcifera. En D, se puede ver el modelo geológico de largo plazo finalizado. También en A se ve el caserón encerrado en un círculo amarillo y en C se ve el caserón dibujado con una línea negra segmentada.....56

Figura 33: Muestra el boundary del caserón 51A-E1 y sus respectivos límites. ....57

Figura 34: En A se muestra la labor en color café y el caserón de color gris. En B, C y D, se ve el mapa digitalizado en AutoCAD. En D, es posible observar los sondajes que intersectan el caserón. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos). ....58

Figura 35: En A, se muestra los sondajes y los sólidos de los Sedimentos Rojos encerrado en un círculo amarillo. En B se muestra los Sedimentos Rojos y el mapa georreferenciado en Leapfrog. En C, se muestra los Sedimentos Rojos (encerrado en círculo amarillo) y el mapa digitalizado en AutoCAD, que fue georreferenciado en Leapfrog. En D se puede observar que la mayor parte del caserón, se encuentra dentro de la unidad Andesitas inferiores, el cual está encerrado en un círculo amarillo. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos). ....59

Figura 36: En A, B y C, muestra la unidad Tobas de Agustina y su intersección con la labor y el caserón, en la última imagen se encuentra encerrada en un círculo amarillo. .60

Figura 37: En A y B muestra la construcción del sólido de las Andesitas inferiores, en este último está encerrado en un círculo amarillo la ubicación del caserón dentro del sólido. En C y D muestra el resultado final del modelo geológico a largo plazo del nivel 36, caserón 51A- E1. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos). ....60

Figura 38: En A y B se puede observar el ajuste del sólido de los Sedimentos Rojos (SR), que se hizo en base al mapa digitalizado en AutoCAD, el cual se encuentra encerrado en un círculo amarillo. En C y D, se ve el corte que se realizó para poder obtener una mejor vista del resultado de los Sedimentos Rojos en la labor. ....61

Figura 39: Se muestra la construcción del sólido de la unidad Tobas de Agustina, en A y B se puede ver el corte que se hizo para observar de mejor manera la intersección del

casarón con la unidad. En C y D se puede ver el sólido de distintas distancias y los sondajes correspondientes. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos). ....	62
Figura 40: Se muestra en A, el casarón rodeado de Andesitas inferiores y el contacto junto a los Sedimentos Rojos, el cual se encuentra encerrado en un círculo amarillo. En B y C se ve una vista más alejada donde se puede apreciar el sólido de la Microdiorita Cuarcifera. En D se puede ver el resultado final del modelo geológico a corto plazo. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).....	63
Figura 41: Se muestran distintas vistas del boundary del modelo geológico a corto plazo. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos). ....	63
Figura 42: Se muestra en A y B, el ajuste realizado de los Sedimentos Rojos, a través del mapa utilizado en el mapeo de interior mina, digitalizado en AutoCAD, el cual se encuentra encerrado en un círculo amarillo. En C y D, se ve la labor de color café y con el sólido intersectando.....	64
Figura 43: Se muestra en A y B, el ajuste del sólido de los Sedimentos Rojos, junto al mapa de interior mina digitalizado. En C y D se ve un corte realizado al modelo para observar la intersección con la labor, el cual se encuentra encerrado en un círculo amarillo. ....	65
Figura 44: Se muestra la creación del sólido de la unidad Tobas de Agustina de color calipso, también se observa la intersección con el casarón de color gris, la labor de color café y el contacto con la unidad Sedimentos Rojos. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos). ....	66
Figura 45: Se muestra la creación de las Andesitas inferiores de color verde claro, también es posible observar el contacto con la unidad Sedimentos Rojos y la Microdiorita Cuarcifera de color rosado. ....	66
Figura 46: Se muestra en A (encerrado en un círculo amarillo) y B, el sólido de la unidad Sedimentos Rojos, construido a través al mapa de interior mina. En C se muestra un corte donde se puede ver como el Sedimento Rojo intersecta el casarón y la labor encerrado en un círculo amarillo. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos)..	68
Figura 47: Se muestra en A, B y C, el resultado final del sólido construido de la unidad Tobas de Agustina (TA), de color calipso. También se puede ver el contacto que existe con los Sedimentos Rojos (SR). En C, se ve el considerable cambio en el techo del casarón, donde aumento drásticamente la cantidad de Sedimentos Rojos.....	68
Figura 48: En A y B, se muestran los sólidos creados para las Andesitas inferiores. En C y D, se muestra el resultado final del modelo geológico a corto plazo del nivel 36, casarón 51A-E1. ....	69
Figura 49: Se muestra la comparación del modelo geológico de largo plazo versus el corto plazo, del casarón 3T en el nivel 150. En A y C se muestra el corto plazo, en B y D se muestra el largo plazo. El casarón se ve como una línea negra ubicada entre los contactos litológicos, se indica con una flecha en A. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos). ....	70
Figura 50: En A y C se puede ver el modelo geológico de corto plazo, en B y D se muestra el modelo geológico a largo plazo. El casarón se ve como una línea negra ubicada entre	

los contactos litológicos, señalada con una flecha de color negro en A. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).....	71
Figura 51: Imagen que muestra el Modelo Numérico de acuerdo a sus respectivas leyes, realizado en la unidad geológica Andesitas inferiores del Modelo Geológico de largo plazo y corto plazo.....	73
Figura 52: En A y C, se muestra el modelo geológico a corto plazo, en B y D se ve el modelo geológico a largo plazo. El caserón se ve como una línea negra entre los contactos litológicos, siendo señalada con una flecha en A. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos). .....	74
Figura 53: Imagen que muestra el Modelo Numérico a largo plazo y corto plazo, de acuerdo a sus respectivas leyes, de caserón 51A-E1.....	76
Figura 55: Se muestran los sondajes de producción y su intersección con el caserón, también se ve la leyenda de las leyes de los sondajes. De color amarillo se pueden ver el caserón 51A-E1 y en gris claro se ve la labor, con los sondajes que salen de la labor intersectando el caserón (imagen proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola). .....	79
Figura 56: Se muestra la ubicación espacial del caserón 51A-E1 dentro de la mina (imagen proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola). .....	79
Figura 57: Se muestra la diferencia del modelo de bloque y geológico de largo plazo versus el corto plazo (imagen proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola).....	80
Figura 58: Se muestra el cambio del modelo de bloques de largo plazo versus corto plazo (imagen proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola). .....	81
Figura 59: Se muestra un diagrama de flujo con la metodología empelada para el análisis comparativo de los modelos geológicos en el presente trabajo. ....	82
Figura 60: Se muestra un diagrama de flujo con la propuesta del Modelamiento geológico de corto plazo. ....	83

## Índice de Tablas

Tabla 1: Se muestra los nombres de los 7 sondajes de producción, con sus respectivos azimut, inclinación y largo.....	29
Tabla 2: Tabla empleada para el mapeo de la intensidad de la mineralización, que se utilizará en las tablas para la mineralización.....	31
Tabla 3: Descripción de la mineralización presente en NP-1S.....	36
Tabla 4: Descripción de la mineralización presente en CZ-1.....	37
Tabla 5: Descripción de la mineralización presente en NP-2.....	39
Tabla 6: Descripción de la mineralización presente en NP-3.....	39
Tabla 7: Descripción de la mineralización presente en CZ-6.....	40
Tabla 8: Descripción de la mineralización presente en NP-2S.....	40
Tabla 9: Descripción de la mineralización presente en NP-5.....	43
Tabla 10: Descripción de la mineralización presente en CZ-CL.....	43
Tabla 11: Descripción de la litología, alteración y mineralización de las unidades litológicas del nivel 150, caserón 3T.....	45
Tabla 12: Descripción de la litología, alteración y mineralización de las unidades litológicas del nivel 70, caserón 9T.....	46
Tabla 13: Descripción de la litología, alteración y mineralización de las unidades litológicas del nivel 36, caserón 51A-E1.....	46
Tabla 14: Se muestra las medidas que fueron utilizadas para crear el boundary de los caserones 3T y 9T.....	48
Tabla 15: Se muestran las coordenadas con las que se construyó el boundary del caserón 51A-E1.....	57
Tabla 16: Volúmenes del boundary del caserón 3T y 9T, correspondiente a sus respectivas litologías. También se ve la diferencia y variación porcentual entre los volúmenes de los sólidos creados.....	72
Tabla 17: Recursos del caserón 3T, información proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola.....	72
Tabla 18: Recursos del caserón 9T, información proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola.....	72
Tabla 19: Se muestra la comparación de los volúmenes de las Andesitas inferiores del Modelo Numérico Largo Plazo versus Corto Plazo, También se calcula la diferencia y la variación porcentual.....	73
Tabla 20: Volúmenes de los sólidos creados en el caserón 51A-E1, con sus respectivas litologías y modelo geológico. También se calcula su diferencia y variación porcentual.....	75
Tabla 21: Recursos medidos, indicados e inferidos y ley del caserón 51A-E1.....	75
Tabla 22: Comparación de los volúmenes de acuerdo a las leyes del Modelo Numérico realizado en la unidad litológica Andesitas inferiores, con Modelo Geológico de Largo Plazo versus Corto Plazo. También se calculó su diferencia y variación porcentual.....	76

## **CAPITULO I: Marco introductorio**

### **1.1. Introducción**

Chile se caracteriza por encontrarse en el margen convergente de la subducción entre la placa de Nazca y la Sudamericana, la cual se encuentra activa aproximadamente desde el Paleozoico (Oliveros, 2020). Esto ha dado origen a la formación de diversos depósitos minerales en distintos periodos del tiempo geológico.

En la zona norte de Chile, la principal estructura del arco volcánico durante Jurásico-Cretácico inferior, es el Sistema de Falla de Atacama (SFA), ubicada en la Cordillera de la Costa (Riquelme, 2003). Dicha estructura sirvió como metalotecto para el emplazamiento de la mineralización.

El cinturón de óxido de hierro-cobre-oro (IOCG) más joven, se encuentra en la Cordillera de la Costa del norte de Chile y sur de Perú, formando parte del arco volcánico del Jurásico-Cretácico temprano (Sillitoe, 2003). Dentro de esta Franja Ferrífera se encuentra el distrito Punta del Cobre, el cual cubre 100 km<sup>2</sup> ubicados al Sureste de la ciudad de Copiapó en la comuna de Tierra Amarilla.

El río Copiapó divide el distrito en dos sectores, el primer sector Occidental con las minas Candelaria, Atacama-Kozan y Alcaparrosa, y el segundo sector Oriental donde se ubican minera Carola, Santos y Punta del Cobre.

SCM Carola es una mina subterránea donde su principal extracción es calcopirita, el método de explotación utilizado es *Sub Level Stopping*. Cuenta con tres entradas principales o socavones: Cobriza, Carola Central y Meléndez.

El área encargada de realizar la planificación minera es la Superintendencia de Ingeniería. En estos programas de extracción se determinan las porciones del yacimiento y el período en que será explotadas, así como el mejor destino de los materiales (planta, stock o botadero), siendo el objetivo principal la maximización del valor económico del proyecto de acuerdo a su vida útil (*Life of Mine*; LOM).

SCM Carola en la actualidad no cuenta con un modelo geológico de corto plazo transversal. Por este motivo, la planificación minera se hace utilizando el modelo

geológico de largo plazo. Este modelo es construido mediante la información obtenida de una malla de sondajes con espaciamientos de 20 m (azimut 270°-90°) y 35 m (azimut 250°-70°). Sin embargo, el espaciamiento real entre sondajes puede aumentar debido al grado de desviación de cada perforación.

En ocasiones durante la construcción de las labores de desarrollo se observan cambios respecto de la litología proyectada en el modelo de largo plazo. Estas discrepancias se generan principalmente en las zonas de contacto entre Andesitas inferiores, Tobas de Agustina y/o Sedimentos Rojos. Lo que afecta la producción ya que la mineralización se encuentra asociada a las Andesitas inferiores.

## **1.2. Planteamiento del problema**

En SCM Carola, al momento de abrir los nuevos sectores productivos, en ciertos sectores es probable encontrar contactos litológicos con desplazamientos métricos en la horizontal respecto de lo modelado. Esto influye en la planificación minera y finalmente en la extracción, ya que no todas las unidades geológicas son de interés económico.

La explotación se lleva a cabo siguiendo la planificación minera realizada sobre la base del modelo geológico de largo plazo. Este modelo es construido empleando los datos obtenidos desde los sondajes históricos de la mina; exploración e *infill*; los cuales tienen longitudes variables entre 50 y 500 m (200 m en promedio), y están distribuidos en una malla regular de espaciamiento 20 m (azimut 270°-90°) y 35 m (azimut 250°-70°), con inclinaciones entre -90° y +90°.

Una vez que los sondajes diamantinos son cargados en el software Leapfrog Geo, por la Superintendencia de SCM Carola, éste interpola los contactos litológicos de acuerdo a la base de datos (litología, estructural); utilizando las unidades geológicas oficiales de la mina, las cuales se agrupan por semejanza en litología y contenido mineral (calcopirita, pirita). Los parámetros dados por el geólogo modelador (anisotropías, distancias mínimas, continuidad espacial, etc.) y los mapeos interior mina históricos de la mina; en zonas donde existe un mayor espaciamiento entre sondajes y ausencia de labores puede ocurrir que los contactos litológicos del modelo no se ajusten totalmente a la realidad.

### **1.3. Hipótesis**

Los modelos geológicos de largo plazo, construidos mediante los datos obtenidos desde sondajes diamantinos (exploración e *infill*), en ocasiones tienen desviaciones respecto de la información lito estructural levantada en las labores de desarrollo (interior mina). Por medio del mapeo permanente de las frentes, y la generación del correspondiente modelo geológico de corto plazo cuando aplique, será posible llevar un mejor control de la litología y estructuras presentes en el depósito, entregando una herramienta más precisa para optimizar la explotación.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General**

Evaluar la precisión y asertividad del modelo geológico de largo plazo de SCM Carola.

#### **1.4.2. Objetivo Específico**

- Caracterizar la litología y geología estructural cartografiada en los frentes de avance mina, para generar un modelo geológico de corto plazo.
- Elaborar una metodología para el análisis comparativo de coincidencia entre el modelo geológico de largo plazo y las características geológicas-estructurales existentes en el frente de avance mina.
- Comparar las características litológicas y estructurales descritas en el frente de avance mina, con lo proyectado en el modelo geológico de largo plazo.

### **1.5. Área de estudio: Ubicación y acceso**

SCM Carola se encuentra ubicada dentro del Distrito Punta del Cobre, al sur de la comuna Tierra Amarilla, a unos 21 kilómetros al sureste de la capital regional Copiapó, en la región de Atacama (ver figura 1).

El acceso principal es por la ruta C-33 la cual se encuentra en buen estado pavimentada, esta va en paralelo al río Copiapó, pasando por la localidad de Tierra Amarilla, posteriormente se debe continuar en dirección Este por un camino asfaltado durante un trayecto de 1 kilómetro.

Las coordenadas UTM de los tres socavones de la mina son las siguientes;

Socavón Carola: N 6.957.869/E 375.521 cota 526 m s.n.m.

Socavón Cobriza: N 6.956.745/E 375.671 cota 532 m s.n.m.

Socavón Meléndez: N 6.960.977/E 377.437 cota 602 m s.n.m.

Las coordenadas geográficas son 27° 30' latitud sur y 70° 15' longitud oeste, con una cota media de 540 m s.n.m., sus coordenadas U.T.M. son 6.957.885 N y 375.515 E



Figura 1: En A se muestra Chile con sus respectivas regiones, destacando de color rosado, la región de Atacama. En B se observa la carretera C-33 (color naranja) con la intersección del camino a minera Carola, también se marca con una flecha de color negro, la entrada oficial a SCM Carola. En C se muestra la ubicación de SCM Carola, señalada con una flecha de color blanco, además, se indican la ubicación del chancado, las oficinas de la Superintendencia de Geología y la entrada al socavón Carola. Mapas de elaboración propia.

## CAPITULO II: Marco Geológico

### 2.1. Alteración hidrotermal

La interacción entre un fluido hidrotermal con la roca hospedante, genera una alteración en la composición química y mineralógica de la roca, siendo conocida como alteración hidrotermal (Beane y Bodnar, 1995). Esto afecta a grandes volúmenes de roca, dependiendo de su grado de permeabilidad, este fluido va adicionar calor y componentes químicos a la roca (Lowell y Guilbert, 1970; Beane y Titley, 1981; Beane y Bodnar, 1995).

La alteración hidrotermal genera modificaciones químicas, reemplazos y/o disolución de minerales primarios (Beane y Titley, 1981). Lo que implica que nuevos minerales precipitan directamente desde los fluidos hidrotermales, ejemplo: pirita, calcopirita, molibdenita. Una alteración puede generar modificación de minerales, destrucción de minerales, formación de nuevos minerales, o las tres anteriormente nombradas, creando las zonas de alteración (Rose, 1970; Beane y Titley, 1981; Beane y Bodnar, 1995).

Las paragénesis de alteración es un grupo de minerales que se forman bajo las mismas condiciones físicas y químicas. Los factores más importantes según el diagrama que muestra la figura 2, son la temperatura y el pH del fluido, en base a esto se puede hacer una zonación y una distribución de los distintos tipos de alteración.

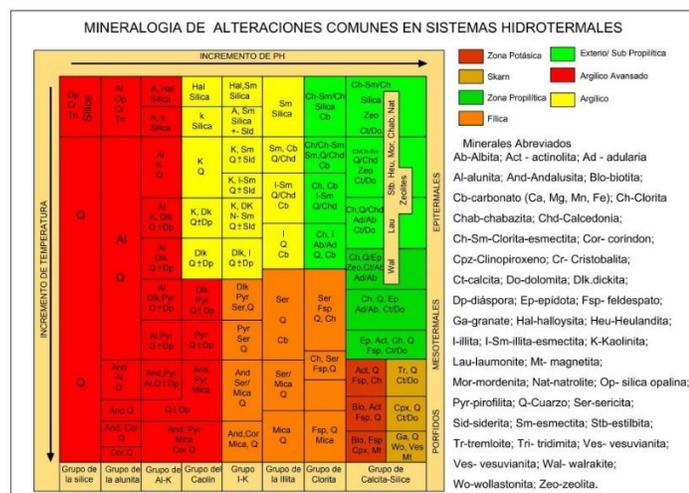


Figura 2: Diagrama de clasificación de alteración, en función de temperatura y pH. Modificado de Corbett y Leach (1998).

## **2.2. Depósitos IOCG (Fe-Cu-Au)**

La sigla IOCG (*iron oxide, copper and gold*), elementos valiosos presentes en estos depósitos. Están vinculados genéticamente con los IOA y su diferenciación no se encuentra bien definida, existe una zona de transición entre ambos depósitos (Espinoza *et al.*, 1996; Sillitoe, 2003; Knipping *et al.*, 2015; Corriveau *et al.*, 2016; Reich *et al.*, 2016; Barra *et al.*, 2017; Ootes *et al.*, 2017). El origen de los IOCG es magmático-hidrotermal, cuyos magmas son intermedios a máficos, dioríticos o gábricos.

La mineralización presente consiste en abundante magnetita, hematita-especularita, en las zonas oxidadas; calcopirita como mineral hospedante del Cu, siendo el más abundante, y el mineral de Cu más importante en los IOCG. Excepcionalmente se puede encontrar bornita y Au, este último se puede presentar de forma nativa o hospedado en sulfuros como piritita y calcopirita.

Los depósitos IOCG aportan aproximadamente un 5% de la producción mundial de Cu y el 1% de producción de Au. Se pueden clasificar subtipos con base a su génesis, geometría o modo de ocurrencia; mantiforme, vetiforme, brechiforme. Respecto a la edad, existen depósitos desde el Arqueano (por ejemplo, Salobo, Brasil; Requía *et al.*, 2003) hasta el Mesozoico-Cenozoico (por ejemplo, Candelaria, Chile; Marschik y Fontbote, 2001a; Mathur *et al.*, 2002).

Los ejemplos de IOCG más importantes a nivel mundial son: Olympic Dam y Prominent Hill en Australia del Sur, Ernest Henry en Queensland, Australia, Salobo y Sossego en Carajas, Brasil, y Candelaria y Mantoverde en Chile (Del Real *et al.*, 2018). En el norte de Chile, podemos encontrar yacimientos vinculados a estos depósitos, los cuales son: Cerro Negro, Teresa de Colmo, Mantoverde, Candelaria-Punta del Cobre, Tocopilla, Montecristo, Carrizal Alto, Panulcillo, Tamaya, Los Mantos de Punitaqui, El Espino, La Africana.

## **2.3. Geología Regional**

La ruptura del supercontinente Pangea-Gondwana comenzó en el Jurásico superior con la apertura del océano Atlántico (Dalziel y Brown, 1987; Ramos, 2009). Al mismo tiempo, se establece un régimen tectónico de subducción extensional en el margen occidental de

América del Sur (Ramos, 2009), dicho régimen se caracterizó por la formación de un arco volcánico orientado de norte a sur a lo largo de la actual Cordillera de la Costa (CC) y una cuenca de trasarco al este del arco (Coira *et al.*, 1982; Dalziel *et al.*, 1987; Stern *et al.*, 1991; Atherton y Aguirre, 1992).

Durante el período del Jurásico tardío al Cretácico temprano, se puede dividir en dos etapas distintas la evolución del arco volcánico y la cuenca de tras-arco:

(1) Pliensbachiano a Kimmeridgiano (~180–157 Ma): presencia de actividad magmática en el arco y el desarrollo de un ciclo marino transgresivo regresivo en la cuenca del trasarco (Charrier *et al.*, 2007).

(2) Kimmeridgiano a Aptiano-Albiano (157–100 Ma): actividad magmática reducida en el arco, y un segundo ciclo marino transgresivo-regresivo en la cuenca del trasarco (Charrier *et al.*, 2007). En el Cenomaniano (~94-100 Ma), el régimen tectónico se volvió predominantemente transtensional (Brown *et al.*, 1993; Arévalo *et al.*, 2003), caracterizándose por vulcanismo episódico, deposición de sedimentos en cuencas marinas y continentales poco profundas del intra-arco y tras-arco (Morata y Aguirre, 2003).

Durante la primera etapa del Jurásico superior, al este del arco volcánico, se formaron una serie de subcuencas marinas interconectadas entre sí, estas tienen por nombre Arequipa-Tarapacá, ubicada desde el centro de Perú hasta el centro de Chile (Vicente, 2006). De norte a sur, las formaciones pertenecientes a esta cuenca en el norte de Chile, son: M. Livilcar (Miembro inferior), M. Quinchamale (Miembro inferior), Fm. Montardón, Fm. Lautaro y Fm. Tres Cruces (Charrier *et al.*, 2007).

Las cuencas de trasarco de la segunda subetapa en el norte de Chile, corresponden a cuencas continentales en la zona norte, pertenecen a las unidades del miembro superior de la Formación Quinchamale y la Formación Lechos San Manuel, mientras que más al sur, la cuenca de trasarco es marina, y está conformada por el Grupo Chañarcillo y las Formaciones Río Tascadero y Quebrada Marquesa (Charrier *et al.*, 2007).

En el Cretácico inferior, existió un cambio en el régimen extensional a transtensional, comenzando en el Barremiano (130 Ma) y alcanzando su edad máxima en el Aptiano-Albiano (125-110 Ma) (Charrier *et al.*, 2007). Existió plutonismo durante toda la etapa de

la formación de cuenca, tanto en la tectónica extensional como en la transtensional. Las zonas de fallas, evolucionaron hacia el Sistema de Falla de Atacama (SFA), para efecto de esta memoria, será llamado SFA, en el Valanginiano-Barremiano (132-125 Ma), con cinemática sinistral (Morrón *et al.*, 1993).

En el Cretácico superior, existió una reorganización paleogeográfica debido a la separación entre América del Sur y África, esto ocasionó que las cuencas de trasarco generadas a lo largo del eje andino se cerrarán. Las tasas de convergencia relacionadas con la subducción en el margen andino occidental aumentaron y la compresión comenzó en la placa superior, la cual ha sido continua desde entonces (Royden, 1993; Scheuber *et al.*, 1994; Amilibia *et al.*, 2008; Ramos, 2009).

En el norte de Chile, la deformación junto con la formación del arco magmático y las cuencas del trasarco, se centraron principalmente en el SFA (Arabasz, 1971). Este sistema es un conjunto de fallas de rumbo, localizadas a lo largo de la Cordillera de la Costa, de una longitud de aproximadamente 1.000 km (ver figura 3). Se encuentra dividido en tres segmentos principales, de norte a sur: Salar del Carmen, Paposos y El Salado-Vallenar (Thiele y Pinchiera, 1984; Naranjo, 1987; Brown *et al.*, 1993; Marinovic *et al.*, 1995; Arévalo *et al.*, 2003). Se ha descrito una evolución cinemática compleja para este sistema, consiste en un desplazamiento sinistral dúctil, el cual predominó durante el Cretácico inferior y evolucionó a una cinemática sinistral frágil durante el Cretácico superior (Brown *et al.*, 1993; Scheuber *et al.*, 1995; Dallmeyer *et al.*, 1996; Scheuber y González, 1999; Grocott y Taylor, 2002).

#### **2.4. Antecedentes metalogénicos del distrito Candelaria-Punta del Cobre**

El distrito Candelaria-Punta del Cobre, es el distrito IOCG más joven e importante del cinturón andino, el conjunto de sus depósitos representan una de las áreas más productivas de depósitos IOCG en el mundo (Sillitoe, 2003; Del Real *et al.*, 2018). Contiene las siguientes minas activas: Candelaria, Candelaria Norte, Santos, Alcaparrosa, Punta del Cobre, Granate, Mantos de Cobre, Carola, Atacama Kozan y Las Pintadas, constituyendo colectivamente el distrito IOCG económicamente más importante de Chile y uno de los más significativos del mundo (Del Real *et al.*, 2018).

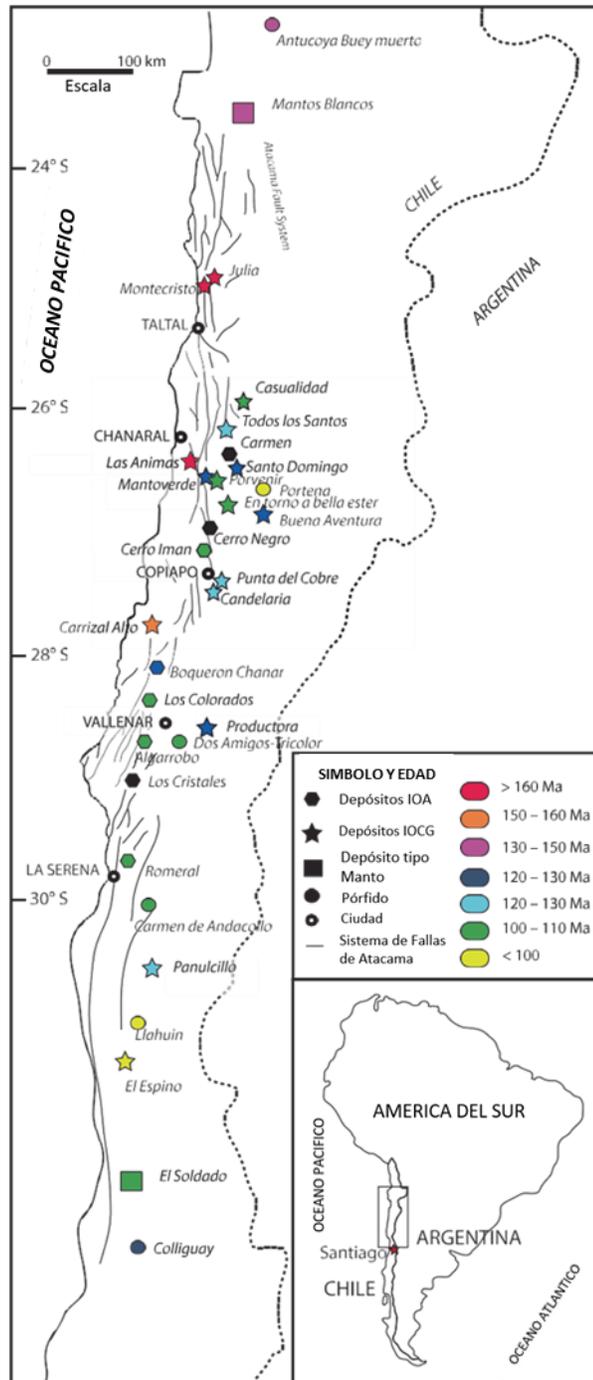


Figura 3: Imagen que muestra la ubicación de los Depósitos IOCG y su edad en el norte de Chile, también se observa la continuidad del SFA (Modificado de Sillitoe 2003).

La ocurrencia de la mineralización sulfurada se puede presentar como: en unidades estratificadas diseminadas y en cúmulos; y/o como vetas y brechas transversales, asociadas a fallas o zonas de fracturas.

Los depósitos IOCG se encuentran alojados en fallas pertenecientes al SFA (Espinoza, 1990; Grocott *et al.*, 1994; Wilson y Grocott, 1999; Grocott y Taylor, 2002), siendo visible en la figura 3. En otras zonas, los depósitos de IOCG muestran una asociación espacial y temporal con fallas de desplazamiento sinestral y dirección de rumbo norte-noroeste y oeste-noroeste por ejemplo: Candelaria, Carola, Teresa de Colmo (Arévalo *et al.*, 2006; Cembrano *et al.*, 2009; Marquardt *et al.*, 2009). En el caso de las fallas de rumbo norte-noreste, son interpretadas como fallas de segundo orden y están directamente relacionadas con el SFA. Sin embargo, hay evidencia en algunas fallas cuyo movimiento es anterior al SFA (Grocott y Taylor, 2002).

Este distrito está dominado por las rocas volcánicas de la Formación Punta del Cobre (Jurásico superior - Cretácico inferior) y las rocas sedimentarias suprayacentes del Grupo Chañarillo (Cretácico inferior), ambos son intruidos por el batolito de Copiapó hacia el oeste. Al oeste y noroeste del distrito, se asignan al Grupo Bandurrias rocas volcánicas estratigráficamente interdigitadas al Grupo Chañarillo. Su principal estructura es conocida como el Anticlinorio de Tierra Amarilla (Del Real *et al.*, 20018), ver figura 4.

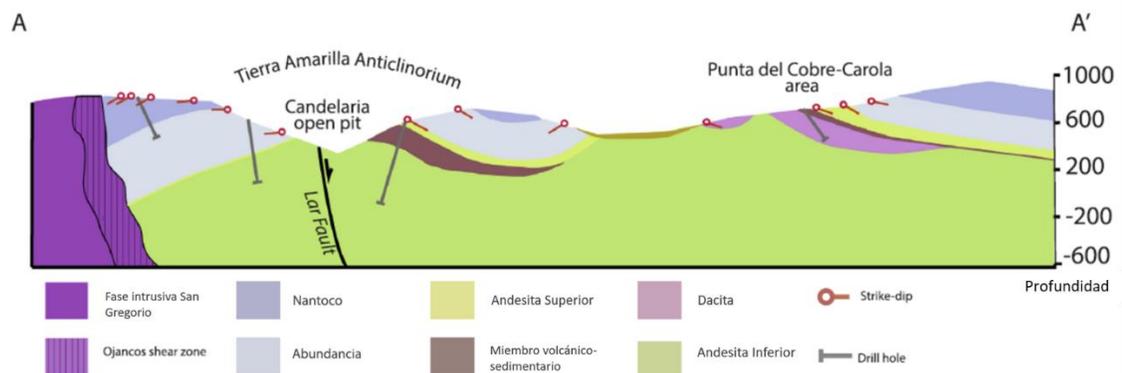


Figura 4: Se muestra el perfil A-A', ubicado en el mapa de la figura 5. En esta imagen se puede observar el Anticlinorio de Tierra Amarilla (Tierra Amarilla *Anticlinorium*), con sus respectivas unidades y la ubicación de Carola (Extraído de Del Real *et al.*, 2018).

La Formación Punta del Cobre fue definida inicialmente por Segerstrom y Ruiz (1962) como una secuencia volcanosedimentaria que subyace a la Formación Abundancia, compuesta por una sección basal volcánica, de 150 a 200 m de espesor, constituida por

lavas andesíticas de gran continuidad, en las cuales se emplazan domos de composición dacítica, y una sección superior clástica y volcánica, de unos 130 a 150 m de espesor, conformada por brechas macizas asociadas a pliegues sinsedimentarios (slumps), lutitas laminadas rojas y coladas de lavas lenticulares andesítico – basálticas con pillow lavas.

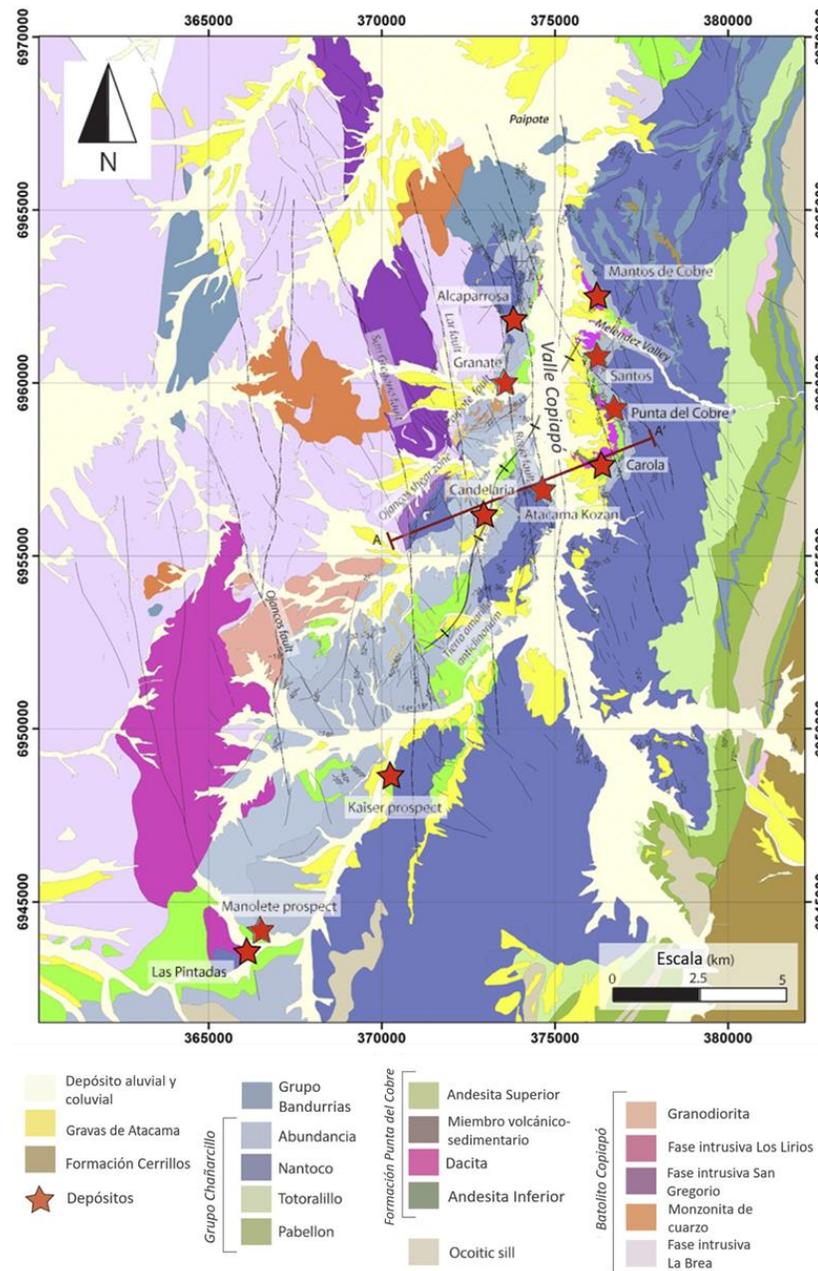


Figura 5: Mapa donde se muestra la ubicación espacial de los depósitos pertenecientes al distrito Punta del Cobre. En la leyenda se puede observar las litologías que forman parte del Grupo Chañarillo, Formación Punta del Cobre y Batolito Copiapó (Modificado de Arévalo 1999).

La sección volcánica inferior es equivalente a la unidad “Lavas Inferiores” (Kpcli) utilizada en la estratigrafía local del distrito minero Punta del Cobre. De igual forma, la sección clástica y volcánica superior corresponde a las subunidades “Brecha Basal” (Kpcsb) y “Lavas Superiores” (Kpcls) (Ortiz y Otros, 1966). En el mapa de la figura 5, se pueden observar estas litologías.

Seegerstrom y Ruiz (1962) interpretan la Formación Punta del Cobre como la acumulación de sedimentos en una plataforma clástica o línea de costa, contemporánea con una actividad volcánica submarina de tipo lávica y explosiva.

## 2.5. Geología local

### 2.5.1. Unidades litológicas del yacimiento Carola y alteración hidrotermal

En la figura 6, se muestra la columna estratigráfica tipo del yacimiento, con las unidades geológicas oficiales de la mina, utilizadas en el presente trabajo; se describe a continuación de base a techo: Andesitas inferiores (Kpcli), Albitófiro (Dacitas de Meléndez), Brecha de Techo (BT), Sedimentos Rojos (SR), Tobas de Agustina (TA), Punta del Cobre superior (Kpcvs) y Grupo Chañarillo (Formación Abundancia).

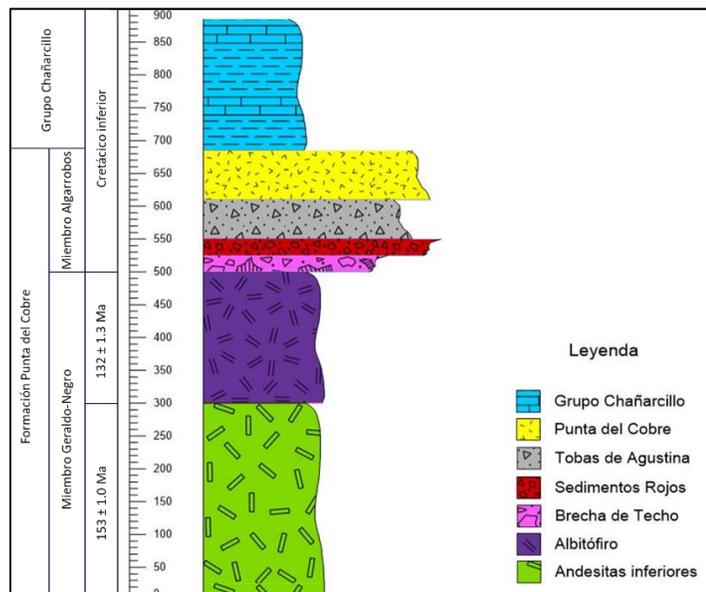


Figura 6: Columna representativa de las unidades geológicas oficiales presentes en el yacimiento Carola. Modificado de Marschik y Fontbote, 2001.

### **2.5.1.1. Dioritas**

Corresponde a una unidad plutónica – hipabisal, la cual muestra un mayor desarrollo en extremo sureste de SCM Carola (sector Teresita Sur). Esta unidad agrupa gabros, dioritas y dioritas cuarcíferas, microdioritas y microdioritas cuarcíferas.

Se emplaza cortando todas las secuencias estratigráficas (diques). No obstante, las microdioritas y microdioritas cuarcíferas se presentan en forma de sills entre las Andesitas inferiores y las Brechas de Techo.

Las Dioritas tienen presencia puntual de sulfuros, específicamente pirita, por lo que no se les considera como unidad económica.

### **2.5.1.2. Diques Lamprofíricos**

Corresponden a cuerpos hipabisales tabulares discordantes que cortan todas las unidades estratigráficas descritas anteriormente. Se emplazan en planos de fallas preexistentes y pueden coexistir con vetas de calcita. Tienen espesores variables con un promedio de 1.5 m.

La descripción petrográfica de la mina, indica que son rocas de color gris-pardo con fenómenos de contacto térmico que les otorgan un aspecto manchado. Los fenocristales están representados por olivino integralmente reemplazado por un material isótropo o criptocristalino de color verdoso, conservando el hábito euédrico y cristales de anfíbol reemplazados por uralita y augita fresca. La masa fundamental es microholocristalina orientada, formada especialmente por cristales alargados de plagioclasa en diversos estados de alteración (argílica o sericítica) y piroxeno. La roca presenta una moderada impregnación con minerales opacos. En los Diques Lamprofíricos, las alteraciones más comunes y características son la serpentización, sericitización y carbonatación.

### **2.5.1.3. Grupo Chañarcillo**

Esta unidad, estratigráficamente corresponde a las formaciones Abundancia y Nantoco, su edad es del Cretácico inferior. Con una potencia estimada superior a 200 m (Marshik y Fontbote, 2001). Está constituido por calizas, chert, tobas, areniscas, conglomerados

volcánicos y brechas, sin presencia de minerales sulfurados económicos, por lo tanto, son considerados estéril.

#### **2.5.1.4. Punta del Cobre superior (Kpcvs)**

Esta unidad, estratigráficamente corresponde al Miembro Algarrobo, su edad es del Cretácico inferior. La potencia estimada para esta unidad es hasta 75 m (Marshik y Fontbote, 2001).

Está constituida por lavas andesíticas - basálticas, rocas volcanoclásticas, con lentes locales de lutitas y calizas.

Las lavas andesíticas – basálticas tienen estructura holocristalina levemente porfídica, compuestas por plagioclasa (65%), minerales máficos (30%) y oquedades (5%) rellenas con carbonato, zeolitas y cloritas. Las plagioclasas se presentan en cristales prismáticos alargados, a veces curvados y están reemplazados en 80% por albita o feldespatos potásico impregnado con sericita. Los minerales máficos presentan contornos xenomórficos y están reemplazados total o parcialmente por minerales secundarios.

Esta unidad no tiene presencia de minerales sulfurados económicos, es considerada estéril.

#### **2.5.1.5. Tobas de Agustina (TA)**

Esta unidad, estratigráficamente corresponde al Miembro Algarrobo, de edad Cretácico inferior. Su potencia estimada es de un máximo de 60 m (Marshik y Fontbote, 2001a; b).

Las Tobas de Agustina, son brechas volcanosedimentarias polimícticas, mal seleccionadas y matriz soportadas, con clastos angulares a subredondeados de origen volcánico (andesitas) y sedimentario (sedimentos rojos, lutitas verdes, calizas), inmersos en una matriz tamaño arena a limo de color verde. Dentro de esta unidad es posible encontrar lentes de rocas sedimentarias químicas y clásticas finas (lutitas y siltitas), químicas (calizas y calcilutitas) y sedimentos de flujo, según sigue:

- **Lutitas y siltitas:** formadas por fragmentos de feldespatos (hasta 20%), cuarzo (hasta 5%) y fragmentos de rocas eruptivas (hasta 5%), con dimensiones entre 0.2 a 0.02 mm. En ciertas cantidades hay presencia de cristales angulares de epidota y circonio.

- **Calizas y calcilitas:** son rocas de color gris verdosas, compactas, compuestas por calcita microcristalina. Puntualmente se desarrolla un nivel de pedernal (“*chert*”) de color blanquecino/verdoso claro con espesores de 4-5 m.
- **Sedimentos de flujo:** compuesto por micro niveles carbonatados finamente laminados en alternancia con niveles de sílice limonitizada. El espesor varía entre 0.5 y 10.5 mm.

Esta unidad no es considerada de interés económico, debido a que presenta mineralización principalmente de pirita.

#### **2.5.1.6. Sedimentos Rojos (SR)**

Al igual que la Brecha de Techo, la unidad de Sedimentos Rojos corresponde a la Brecha Basal del Miembro Algarrobo, cuya edad es del Cretácico inferior. La potencia estimada para esta unidad es de un máximo de 25 m (Marshik y Fontbote, 2001).

Son brechas volcanosedimentarias continentales de color rojo, polimícticas y mal seleccionadas, matriz tamaño arena a limo. Los clastos son de tamaño centimétricos, dominando los de origen efusivo con diversos grados de alteración hidrotermal. La matriz está constituida por cristales de feldespato reemplazado por adularia, cuarzo, anhidrita, carbonato y óxidos de hierro amorfo; éstos últimos le confieren su característico color rojo. Puede tener diseminación de sulfuros en la matriz y/o clastos de sulfuros masivos. En algunos sectores de la mina es posible encontrar estructuras sedimentarias tales como laminaciones y estratificación cruzada desarrolladas en esta unidad.

De igual modo que la Brecha de Techo, los Sedimentos Rojos son la tercera roca huésped de la mineralización polimetálica de sulfuros, con diseminaciones y clastos dispuestos en una morfología tipo manto.

#### **2.5.1.7. Brecha de Techo (BT)**

Esta unidad, estratigráficamente corresponde a la Brecha Basal del Miembro Algarrobo, su edad es del Cretácico inferior. La potencia de la unidad es de aproximadamente 25 m (Marshik y Fontbote, 2001).

Petrográficamente incorpora brechas volcanosedimentarias, de matriz soportadas a clasto soportadas. Su característica principal es el dominio de clastos centimétricos de origen volcano-sedimentario, alterados a feldespato potásico y en menor grado albita, inmersos en una matriz de tamaño arena a conglomerado fino. Puede presentar diseminación de sulfuros en la matriz y/o clastos de sulfuros masivos.

Es posible observar en ciertos sectores de la mina, una transición estratigráfica gradual, desde la Brecha de Techo al Sedimento Rojo. Hay que mencionar que después del Albitófiro, la Brecha de Techo es la tercera unidad en hospedar la mineralización polimetálica de sulfuros, con un modo de ocurrencia diseminado.

#### **2.5.1.8. Albitófiro**

Unidad correspondiente a las Dacitas de Meléndez, que son parte del Miembro Geraldo-Negro, cuya edad es Cretácico inferior. La potencia estimada es superior a 200 m (Marshik y Fontbote, 2001).

La descripción petrográfica corresponde a rocas subvolcánicas leucocráticas de granulometría fina, compactas, duras, con textura holocristalina porfídica y abundante masa fundamental micro holocristalina. En el microscopio observa la presencia de estructuras holocristalinas, texturas porfídicas con fenocristales (40-50%) de plagioclasa (10-35%) y poca cantidad de minerales máficos: anfíboles (2-6%), piroxenos (1-2%) y biotita (<3%). La masa fundamental (55-60%) está compuesta por feldespato plagioclasa (10-30%), un agregado equigranular de cuarzo-feldespato alcalino (20-35%) y cantidades variables de minerales máficos y opacos. Los minerales accesorios están representados por opaco, zirconio y monacita.

La alteración hidrotermal se presenta con la ocurrencia de minerales secundarios, en cantidades moderadas a intensas de: feldespato alcalino (albita y feldespato potásico), clorita, biotita. En cuanto a los minerales post magmáticos, hay presencia reducida de óxidos de hierro, esfeno, turmalina y pirita; el carbonato se presenta como sustitución, también están las cavidades rellenas por feldespato potásico, clorita y alunita; igualmente hay fisuras rellenas por cuarzo, carbonato, feldespato potásico, clorita, biotita y epidota.

Esta unidad es la segunda, después de las Andesitas Inferiores (Kpcli), en ser la hospedante de la zona de mineralización polimetálica de sulfuros. El modo de ocurrencia del mineral de interés económico, es mineralizado masivo, brecha hidrotermal y disseminado.

#### **2.5.1.9. Andesitas inferiores (Kpcli)**

Estratigráficamente esta unidad corresponde a lavas inferiores de la Formación Punta del Cobre, perteneciente al miembro Geraldo-Negro, de edad Cretácico inferior. La potencia estimada para esta unidad es superior a 300 m (Marshik y Fontbote, 2001).

En SCM Carola, la unidad de Andesitas inferiores (Kpcli) está constituida por rocas efusivas de composición mayoritariamente andesítica, compactas, de color gris oscuro a verdoso. Su textura es micro porfídica con fenocristales de feldespatos, cuyo tamaño varía entre 2 mm hasta 4 mm aproximadamente (Valdman, 2016).

Esta unidad es la principal roca de caja, hospedante de la mineralización polimetálica de sulfuros, presentándose como cuerpo mineralizado masivo, brechas, en vetillas y/o disseminado.

Producto de la alteración hidrotermal los minerales primarios fueron reemplazados por minerales secundarios, haciendo imposible reconocer la textura porfídica. La alteración principal es clorítica, continúa en menor grado la alteración sericítica y biotita. Las rocas que se encuentran aledañas al contacto volcano-sedimentario del Miembro Algarrobo, presentan alteración potásica y silíceo. En los bordes del cuerpo mineralizado, si hay presencia de Fe como magnetita y/o mushketovita, la roca presenta un reemplazo total por actinolita. Respecto a la mineralización de cobre (Cu), esta va asociada a la presencia de calcita (información proporcionada por la Superintendencia de Geología).

### **2.6. Geología estructural del yacimiento Carola**

El elemento estructural dominante en el área del Distrito Punta del Cobre, es el Anticlinal de Tierra Amarilla, de inversión NNE con vergencia al este, relacionado con una geometría de despegue-rampa-despegue-rampa. Este arreglo estructural deja expuesto por casi 200 km de longitud las series *syn-rift* del Cretácico inferior que cabalgan sobre depósitos sinorogénico Cenozoicos (Martínez y Otros, 2012).

En la propiedad de SCM Carola se han definido una serie de estructuras mayores que controlan la distribución de la mineralización, estas son las siguientes:

**Fallas N20-40°W/65-90°SW:** Algunos ejemplos son la fallas Cuerpo Principal Norte, Cuerpo Principal Sur y Cuerpo Principal Satélite que controlan el emplazamiento del Cuerpo Principal; la falla Pepito-Laboratorio que controla al Cuerpo Pepito, falla Central y falla Centra Cola que domina al Cuerpo 3.

**Fallas N40-60°W/30-50°SW:** Algunos ejemplos son falla Cobriza, falla Cuerpo 8, falla Cuerpo 910B y falla Cuerpo 1, que controlan el emplazamiento y distribución de mineralización en los cuerpos homónimos.

La relación temporal entre ambos sistemas aún no está definida. No obstante, cuando interactúan generan cuencas (graben) con caídas en el techo de las Andesitas Inferiores de hasta 200 m en la vertical. En estas depresiones existe mayor desarrollo de Brechas de Techo y Sedimentos Rojos, y por ende, mayor mineralización tipo manto. Ambos sistemas cortan toda la columna estratigráfica, llegando hasta la superficie.

Existen otros sistemas de fallas que son posteriores a los antes descritos. Su relación con los cuerpos mineralizados aún no está totalmente definida. Estos son:

**Fallas NS-N20°W / subverticales:** Un ejemplo es la falla Diez que corta a la falla Cuerpo Principal, segmentándola en Falla Cuerpo Principal Norte y Cuerpo Principal Sur.

**Fallas N70°E-EW / subverticales:** Son fallas de corridas kilométricas, con diques lamprofíricos asociados. Algunos ejemplos la falla Dique NE Norte y falla Dique NE Central.

## **CAPITULO III: Metodología**

Las metodologías utilizadas para la realizar el presente trabajo están sujetas bajo los reglamentos y procedimientos implementados por SCM Carola, las cuales fueron ejecutadas en el mapeo de interior mina, descripción de muestras, logueo de sondajes (nivel 36, caserón 51A-E1) y creación de los modelos para los niveles; 150 (caserón 3T), 70 (caserón 9T) y 36 (caserón 51A-E1).

### **3.1. Recopilación Bibliográfica**

Lo primero que se hizo al momento de elaborar el presente trabajo, fue la recopilación de información bibliográfica, con el propósito de obtener mayor información del área. Con este fin, fue necesario conocer los estudios previos realizados en el sector, información de los depósitos IOCG y del Distrito Punta del Cobre, esto incluye los posibles modelos genéticos de los yacimientos del Distrito y los modos de ocurrencia de la mineralización.

La recopilación de la información se hizo a través de artículos científicos, tesis anteriores realizadas en el Distrito Punta del Cobre, artículos de congresos, cartas geológicas e información entregada por la Superintendencia de geología de SCM Carola.

### **3.2. Trabajo de terreno**

#### **3.2.1. Mapeo geológico interior mina**

Durante un mes se ingresó a interior mina, específicamente los niveles 150, 70 y 36. En algunos sectores del nivel 36 y 150, no fue posible ingresar, por falta de acuñadura y fortificación. Sin embargo, la mayor parte de las labores desarrolladas para explotar los caserones lograron ser mapeadas.

El levantamiento lito-estructural se realizó a una escala de 1:500, en la gradiente de la labor (ver figura 7). Esta se define según el proyecto o los niveles de ingeniería, consiste en la medida desde el piso (0 m) en dirección al techo, la cual se realiza por las cajas. Se considera una gradiente aceptable de 1.40 m a 1.60 m, siendo implementada en todos los niveles de interior mina. De acuerdo a esta medida se presenta un plano horizontal teórico que intersecta las paredes (cajas), traspasando la información a una plantilla de mapeo, con el cuál se genera un mapa de planta en el nivel que se desea mapear.

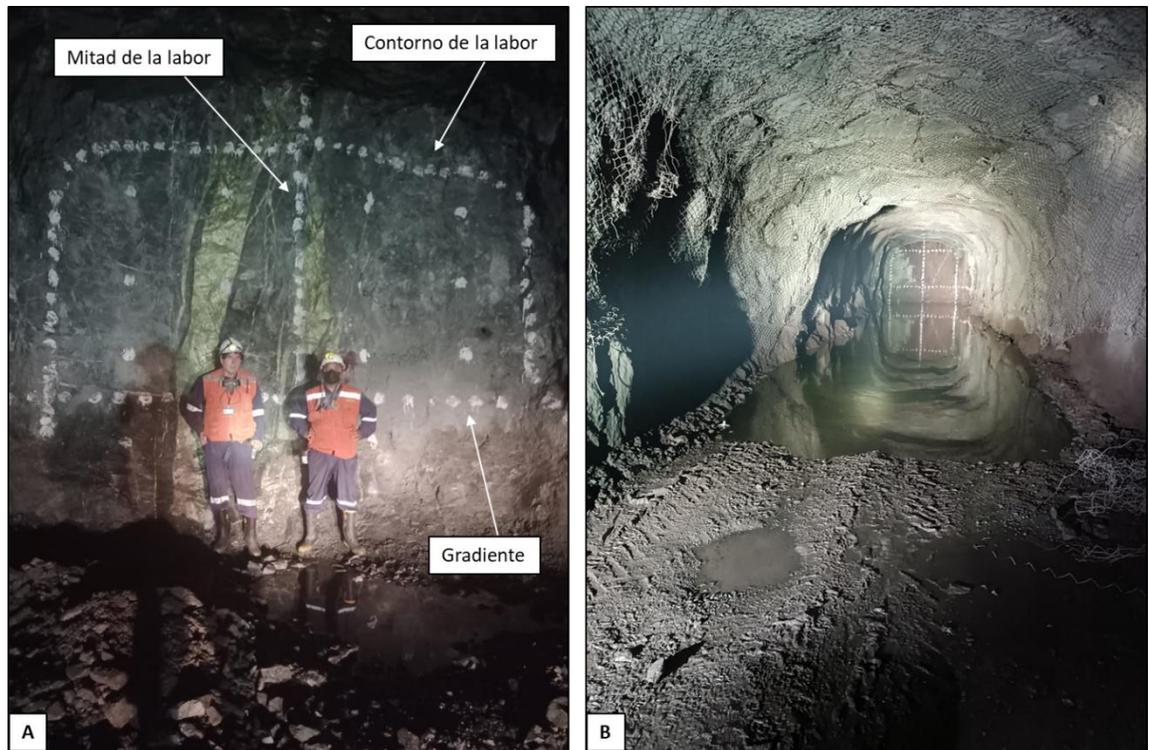


Figura 7: En la imagen A, se muestra la frente de la labor con líneas punteadas de color blanco, indicando las partes de la labor. En B se puede ver la misma frente desde una distancia mayor y las cajas de la labor.

Se realizó el mapeo de frentes y cajas de los niveles 150 (caserón 3T), 70 (caserón 9T) y 36 (caserón 51A-E1); los datos levantados fueron plasmados en el mapa topográfico, extraído de las labores diseñadas por la Superintendencia de Ingeniería, en el software AutoCAD. La mayoría de los contactos litológicos y estructurales fueron levantados con estación total (Departamento de Topografía); para esto se marcaron con spray puntos a la altura de la gradiente (caja y/o frente). No obstante, algunos contactos fueron mapeados directamente en planta empleando un distanciómetro láser (ver figura 8), con la finalidad de indicar con mayor precisión a los topógrafos la zona de contacto y/o estructura. Posteriormente el Departamento de Topografía ingresa el punto exacto en el software AutoCAD, donde finalmente el geólogo realiza la digitalización de la mineralización, contacto litológico y estructuras. Luego estos datos son empleados en el software Leapfrog Geo, para la generación del modelo geológico.

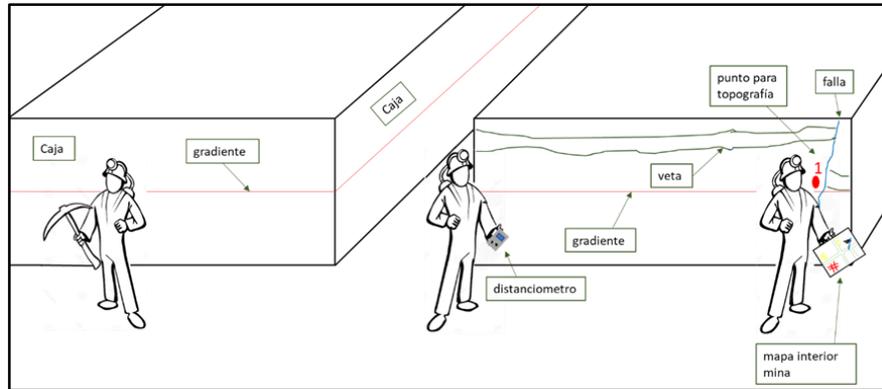


Figura 8: Bosquejo que muestra los implementos y como se realiza el mapeo en interior mina (elaboración propia).

### 3.2.2. Logueo de Sondaje (caserón 51A-E1)

Con la finalidad de reducir la incertidumbre en los contactos litológicos y tener una mayor información de la mineralización, se realizaron sondajes de producción en el nivel 36, específicamente, del caserón 51A-E1 (ver figura 10), en la tabla 1 están los nombres de cada sondaje. Estos fueron logueados con el software GVMapper (ver figura 9) en conjunto con los geólogos de testigoteca de SCM Carola. El tiempo de duración del logueo fue aproximadamente 1 mes, en el cual se loguearon 7 sondajes con un largo total de 889,05 m. Aquí se describió, litología, estructuras, mineralización y alteración. Estos sondajes fueron utilizados para crear el modelo geológico de corto plazo en el capítulo V, ítem 5.4.3.

Tabla 1: Se muestra los nombres de los 7 sondajes de producción, con sus respectivos azimut, inclinación y largo.

Sondaje	Azimut	Inclinación	Largo
DDH-3821	50°	-10°	60.75
DDH-3821A	50°	00°	120
DDH-3822	50°	-27°	150
DDH-3825	50°	-11°	130
DDH-3828	50°	-19°	136.9
DDH-3829	50°	-9°	147.6
DDH-3831	50°	-38°	143.8

Escala 1:100		MAPEO DE SONDAJE DDH-3821A				Pag. 1
INFORMACION DE SONDAJE						
Este	: 377889.721	Azimut	: 50.3162	IDProyecto	: Cas-51A	
Norte	: 6957041.058	Inclinación	: 0.1764	Sector	: Bloque 13	
Elevación	: 49.877	Profundidad	: 120	Banco/Nivel	: Nv36 Acc. NP-3	
Geotécnico	: D. Valle / D. Rojas	Geólogo	: D. Valle / D. Rojas	Contratista	: SCM Carola	
04-08-2023				Impreso en GVMapper v3.6		

Metros	LITOLOGIA - TIPO	LITOLOGIA - GEOMETRIA	LITOLOGIA - COLOR	LITOLOGIA - TEXTURA	ALTERACION 1	ALTERACION 1 - Intensidad	ALTERACION 2	ALTERACION 2 - Intensidad	ESTILO MXX 1	SUBESTILO MXX 1	MXX DETALLE 1 - Mineral	MXX DETALLE 1 - Intensidad	ESTILO MXX 2	SUBESTILO MXX 2	MXX DETALLE 2 - Mineral	MXX DETALLE 2 - Intensidad	ESTILO MXX 3	SUBESTILO MXX 3	MXX DETALLE 3 - Mineral	MXX DETALLE 3 - Intensidad	ESTRUCTURA - TIPO	ESTRUCTURAS - RELLENO 1	ESTRUCTURAS - RELLENO 2	ESTRUCTURAS - ANGULO 1	ASSAY : CUT_PCT
	0.00	0.00																							
2.00																									0.020
																									0.021
4.00																									0.030

Figura 9: Esta imagen muestra la tabla y sus parámetros, los cuales son rellenados a través del logueo en el software GVMapper.



Figura 10: Imagen que muestra el sondaje de producción DDH-3825, en la línea segmentada de color azul se encuentra la unidad Andesitas inferiores, destacándose con línea segmentada de color rojo, la mineralización de calcopirita y pirita. En la línea segmentada de color amarillo, se encuentra la unidad de Tobas de Agustina. La línea segmentada de color verde, muestra la unidad de Sedimentos Rojos. En la parte superior está indicado el nombre del sondaje, el número de cajas y el metro donde inicia y termina el sondaje de la fotografía.

### 3.3. Muestreo y Descripción Macroscópica

En esta etapa se realizó una recopilación de muestras de acuerdo a las litologías presentes en los diferentes niveles debidamente rotuladas; las cuales fueron tomadas en zonas de contacto litológico; cuya intención era identificar la zona de contacto en la labor, digitalizar y finalmente ajustar el modelo geológico. Al repetirse las unidades litológicas en los tres niveles, se decidió hacer una selección de muestras, dejando la más representativa por cada litología, las cuales fueron utilizada para hacer la descripción macroscópica de cada unidad; se encuentra en el capítulo V.

En la siguiente tabla se presenta la intensidad de la mineralización presente en el caserón. En la tabla 2 se muestra conforme sea: débil (d), moderado (m), fuerte (f), masivo (ma). Esta tabla, se aplica para todos los resultados del ítem 5.1.

Tabla 2: Tabla empleada para el mapeo de la intensidad de la mineralización, que se utilizará en las tablas para la mineralización.

Intensidad de mineralización			
débil	moderado	fuerte	masivo
d	m	f	ma

### 3.4. Trabajo de Gabinete

#### 3.4.1. Digitalizar los datos obtenidos en software AutoCAD

La cartilla de mapeo que se utilizó en interior mina para levantar la información lito-estructural, se escaneó en las oficinas de la Superintendencia de Geología de SCM Carola (en formato JPG). Luego en el software AutoCAD se inserta la imagen, se referencia y se escala; posterior a esto se crean las *layers* de mineralización (diseminado, vetas, masivo), fallas, diques, según sea el caso y se digitaliza; simbología y leyenda de la figura 11.

Estilos de Mineralización	Minerales Metálicos				Andesita Inferiores (Kpcli)	Tobas de Agustina y Sedimentos Rojos (TA)	Sedimentos Rojos (SR)	Falla Menor 45°	Dique
	Cpy	Py	Esp	Mt					
Vetileo Débil	—	—	—	—					
Vetileo Moderado	==	==	==	==					
Vetileo Fuerte	===	===	===	===					
Diseminado Débil	.	.	.	.					
Diseminado Moderado	••	••	••	••					
Diseminado Fuerte	•••	•••	•••	•••					
Stockwork/Brecha Débil	#	#	#	#					
Stockwork/Brecha Moderado	##	##	##	##					
Stockwork/Brecha Fuerte	###	###	###	###					
Masivo	—	—	—	—					

Figura 11: Leyenda y simbología utilizada para la digitalización del mapa de mina. Cpy = calcopirita; Py = pirita; Esp = especularita; Mt = magnetita

### 3.4.2. Georreferenciar los datos obtenidos en software Leapfrog Geo

El plano digitalizado en AutoCAD, descrito en el ítem anterior (3.4.1.), es exportado en formato pdf e ingresado al software GIMP 2.10.34 (convertidor de imágenes), para obtener la versión JPG de la digitalización. Finalmente, el archivo se georreferencia con el Leapfrog Geo (ver figura 12).

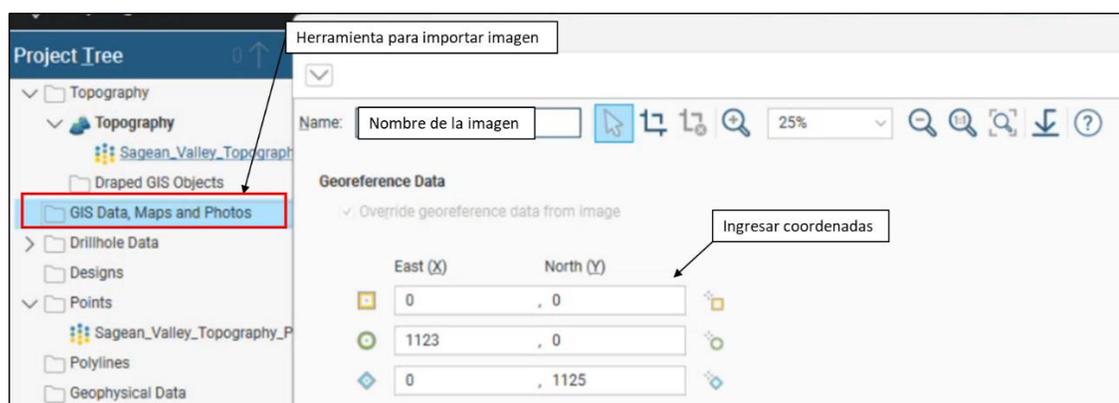


Figura 12: Se muestra donde ingresar una imagen al software Leapfrog Geo y georreferenciarla.

### **3.4.3. Modelamiento Geológico**

Una vez obtenida la información, se procede a modelar en el software Leapfrog Geo 2023.1; software que utiliza minera Carola. El modelo geológico es una representación de la información obtenida a través de los sondajes, en un modelo en 3D, con la finalidad de interpretar contactos litológicos, estructurales, tales como vetas, fallas y diques. La intención de la formación de un modelo geológico, es poder dar respuesta a la incertidumbre de la disposición de las unidades geológicas y cuerpo mineralizado. Con esta información es posible realizar cálculos de leyes, estimar las probabilidades de explotación y la rentabilidad del yacimiento en el tiempo.

#### **3.4.3.1. Modelo geológico largo plazo**

El modelo geológico de largo plazo se construyó con la base de datos de la Superintendencia de Geología de SCM Carola, en el software Leapfrog Geo. A través de la información litológica proporcionada por los sondajes diamantinos, se generaron los sólidos y los contactos litológicos considerando las medidas del *boundary* (área que delimita lo que se va a modelar), ver figura 21 y figura 33. Se utiliza para el modelamiento de largo plazo y corto plazo. Los límites deben ser representativos del área que se desea estudiar, incluyendo en su centro el caserón de interés.

Las unidades litológicas presentes fueron creadas como superficies de intrusión y de erosión, en el capítulo V: Resultados, ítem 5.3.

#### **3.4.3.2. Modelo geológico corto plazo**

Una vez completado el modelo geológico a largo plazo en el software Leapfrog Geo, se compara la imagen digitalizada de AutoCAD del mapeo interior mina, la cual fue descrita en el ítem 3.4.1., con la finalidad de poder ver los cambios litológicos entre el modelo geológico de largo plazo versus lo visto en terreno. Inmediatamente ejecutado este procedimiento, se procede a realizar las modificaciones correspondientes del modelo.

Al existir cambios en los contactos litológicos, se comienza a corregir el modelo geológico de largo plazo, modificando el contacto entre las unidades utilizando la herramienta de *polylines*, esta herramienta es empleada para dibujar a través de una línea, el contorno del

solido que se desea modificar, de esta forma es construido el modelo geológico de corto plazo.

En el caso del nivel 36, caserón 51A-E1, previamente fueron ingresados los sondajes de producción por la Superintendencia de Geología de SCM Carola, con esta información, la autora del presente trabajo, creó nuevos sólidos y los contactos litológicos fueron modificados. Posterior a esto, se procede a realizar los ajustes de la comparación con el mapeo de interior mina.

### **3.4.3.3. Análisis comparativo del modelo geológico largo plazo versus modelo geológico corto plazo**

El análisis comparativo se hizo mediante la creación de los sólidos y observando el grado de influencia que tienen en el caserón correspondiente. La mineralización económica de SCM Carola se hospeda principalmente en las Andesitas inferiores, por tanto, esta litología fue primordial al momento de realizar el cotejo, sobre todo respecto del modelo numérico proporcionado por la Superintendencia de Geología de SCM Carola.

Se generaron secciones (*slicers*) que exhibieran los contactos litológicos al interior del caserón. Paralelamente se comparó el volumen de los sólidos geológicos para ambos modelos (largo plazo vs corto plazo) y en el caso particular del caserón 51A-E1, se cotejaron los resultados del modelo de bloques proporcionado por la Superintendencia de Geología de SCM Carola, para ambos modelos.

Para calcular la diferencia del volumen de los sólidos se restó el volumen de cada unidad litológica del modelo de corto plazo vs el modelo de largo plazo (fórmula 1); el cálculo de la variación porcentual se hizo dividiendo esta resta por el modelo de largo plazo, cuyo resultado se multiplico por cien (fórmula 2).

**Fórmula 1:**  $Diferencia = Volumen\ litología\ del\ modelo\ de\ corto\ plazo$   
 $- Volumen\ litología\ modelo\ de\ largo\ plazo$

**Fórmula 2:**  $Variación\ porcentual = \frac{Diferencia}{Volumen\ litología\ del\ modelo\ de\ largo\ plazo} \times 100$

## **CAPITULO IV: Resultados**

### **4.1. Mapeo interior mina y digitalización en AutoCAD**

En este capítulo, se presentan los resultados del mapeo de interior mina llevado a cabo, en el sector de ingreso del socavón Carola Central, en los niveles 150, 70 y 36, nombrados en orden del más cercano a la superficie al más profundo. El levantamiento lito estructural se realizó durante un periodo de un mes aproximadamente, en el cual se obtuvieron las unidades litológicas, estructurales y la mineralización de los caserones 3T, 9T y 51A-E1, en el respectivo orden de los niveles.

Se debe mencionar que el rumbo de las estructuras no se midió con brújula, debido a la gran cantidad de magnetita presente en el área, haciendo poco confiable el dato. Por esta razón, se toma el manto y dirección de inclinación. Posterior a esto, se dibuja en el mapa de interior mina, haciendo posible calcular el rumbo, para utilizar la notación tipo americano.

#### **4.1.1. Nivel 150**

El nivel 150 es el más cercano a la superficie, dentro de los tres niveles de la zona de estudio. En este nivel se encuentra el caserón 3T donde se realizó el mapeo interior mina en las labores NP-1S (Nivel de Perforación- 1 Sur) y CZ-1 (Cruzado 1), como se muestra en la figura 13.

Las litologías encontradas a través del mapeo de cajas y frente fueron: Andesitas inferiores y Sedimentos Rojos. Las Tobas de Agustina sólo se observaron en la caja oeste, hacia el norte de la labor y fuera del perímetro del caserón. No fue posible acceder a la zona sur de la labor, debido a la falta de fortificación (recomendación geomecánica).

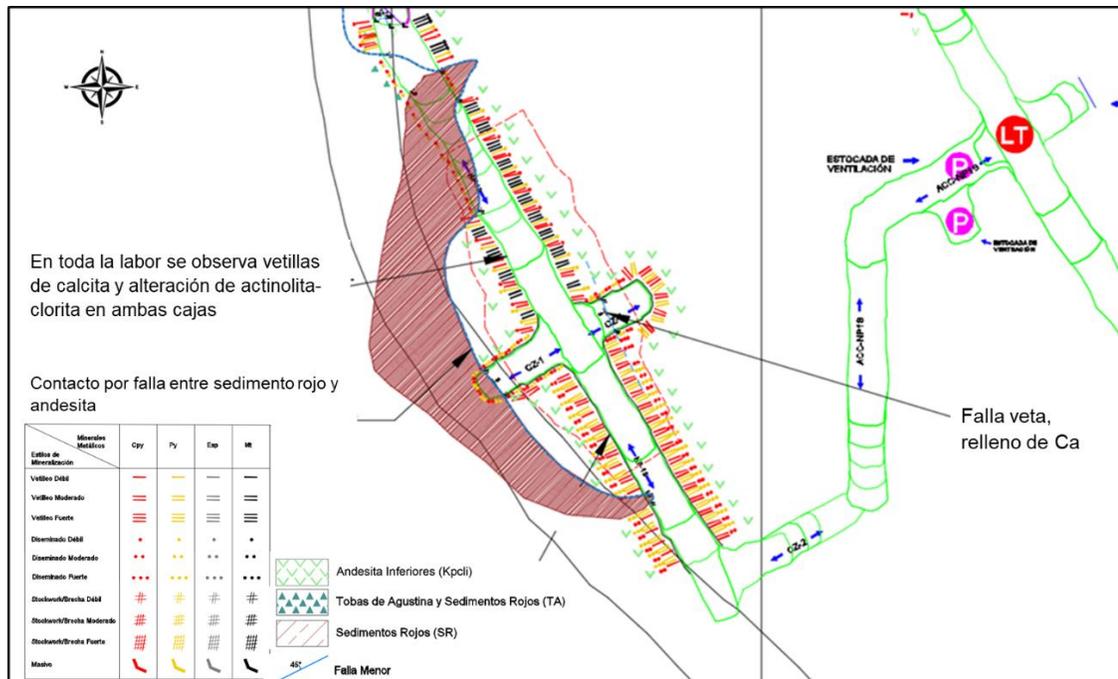


Figura 13: Imagen digitalizada en AutoCAD del mapeo de interior mina, en el nivel 150, caserón 3T, donde se muestra las litologías, mineralización y estructuras presentes.

En toda la labor existe alteración de actinolita-clorita y también se observan vetillas de calcita. En las tablas 3 y 4 se muestra la mineralización presente en el mapeo de interior mina.

Tabla 3: Descripción de la mineralización presente en NP-1S.

Mineralización caserón 3T					
NP-1S					
Minerales	Modo de ocurrencia				NW ↑
	masivo	stockwork	vetilla	diseminado	
magnetita			f	d	intersección con CZ-1
mushketovita			d		
calcopirita			m	d	
pirita			d	d	
intersección con CZ-1					intersección con CZ-1
magnetita	ma				↓ SE
mushketovita					
calcopirita			m	m	
pirita			m	f	

Tabla 4: Descripción de la mineralización presente en CZ-1.

Mineralización caserón 3T					
CZ-1					
Minerales	Modo de ocurrencia				W ↑
	masivo	stockwork	vetilla	diseminado	
magnetita	ma				
mushketovita					
calcopirita				m	
pirita				m	
intersección con NP-1S					intersección con NP-1S
magnetita	ma				
mushketovita					
calcopirita			m	m	
pirita			m	m	E ↓

Las estructuras presentes en el caserón 3T, son dos. La primera se encuentra en el CZ-1 hacia el oeste, la cual corresponde a un contacto por falla entre los Sedimentos Rojos y las Andesitas inferiores, su rumbo es N40°W/65°NE. La segunda estaría ubicada también en el CZ-1 hacia el lado este, la estructura corresponde a una falla veta rellena por calcita, cuyo rumbo es N20°W/60°SW. No se puede identificar una temporalidad de las estructuras al no existir una relación de corte entre ellas y encontrarse distantes. Estas estructuras no se correlacionan con las estructuras mayores que controlan la mineralización, son fallas locales y no modelables (ver figura 13). En figura 14 se muestra la comparación entre el mapa utilizado en interior mina y lo digitalizado.

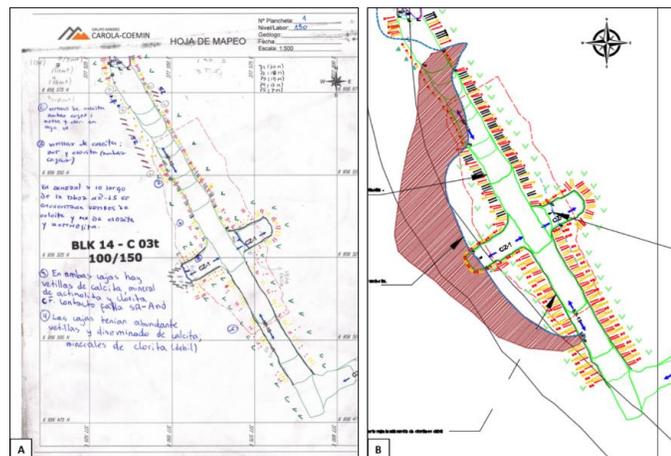


Figura 14: En A se muestra el mapa de planta del nivel 150, caserón 3T, con el cual se ingresó a interior mina, en B se muestra la digitalización en AutoCAD.

#### 4.1.2. Nivel 70

El nivel 70 es el segundo más cercano a la superficie, después del nivel 150. En este nivel se encuentra el caserón 9T, donde se realizó el levantamiento lito estructural en las labores: NP-2 (Nivel de Perforación 2), NP-3 (Nivel de Perforación 3), CZ-6 (Cruzado 6), NP-2S (Nivel de Perforación – 2 Sur), NP-3S (Nivel de Perforación – 3 Sur). Reflejado en la digitalización de AutoCAD que se muestra en la figura 15.

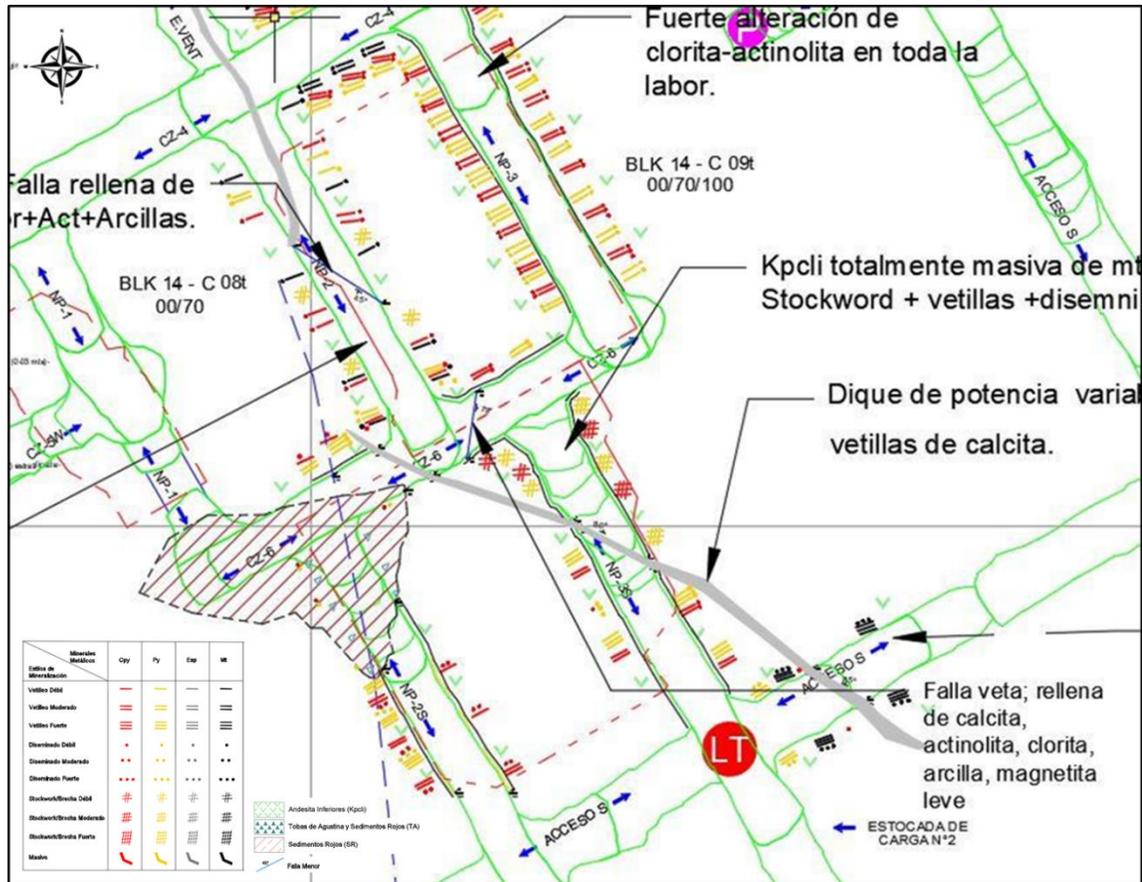


Figura 15: Muestra la digitalización en el software AutoCAD con las unidades litológicas, alteración, mineralización y estructuras presentes del área.

Las unidades litológicas presentes en esta labor son las siguientes: Andesitas inferiores, Tobas de Agustina, Sedimentos Rojos y dos diques de Microdiorita Cuarcífera, perteneciente a la unidad de Diorita. Las Andesitas inferiores se encuentran en la mayor parte de la labor, y son cortadas por los diques de Microdiorita Cuarcífera.

Las alteraciones presentes de acuerdo a las labores, son las siguientes: en NP-2 existe una cloritización débil, su modo de ocurrencia es diseminada, calcita en forma de vetillas de intensidad moderada, ocasionalmente se presenta yeso en forma de cúmulos y feldespatos potásicos acompañando a la estructura en su relleno. En todas las demás labores, hay alteración de clorita-actinolita de forma masiva y vetillas de calcita.

La mineralización presente en el caserón se presenta de acuerdo a sus labores en las siguientes tablas:

Tabla 5: Descripción de la mineralización presente en NP-2.

Mineralización caserón 9T				
NP-2				
Minerales	Modo de ocurrencia			
	masivo	stockwork	vetilla	diseminado
magnetita			d	d
mushketovita			d	
calcopirita			d	d
pirita		d	m	d

Tabla 6: Descripción de la mineralización presente en NP-3.

Mineralización caserón 9T				
NP-3				
Minerales	Modo de ocurrencia			
	masivo	stockwork	vetilla	diseminado
magnetita	ma			
mushketovita				
calcopirita			m	m
pirita		d	f	f

Tabla 7: Descripción de la mineralización presente en CZ-6.

Mineralización caserón 9T				
CZ-6				
Minerales	Modo de ocurrencia			
	masivo	stockwork	vetilla	diseminado
magnetita	ma			
mushketovita				
calcopirita			m	m
pirita		d	f	f

Tabla 8: Descripción de la mineralización presente en NP-2S.

Mineralización caserón 9T				
NP-2S				
Minerales	Modo de ocurrencia			
	masivo	stockwork	vetilla	diseminado
magnetita	ma			
mushketovita				
calcopirita			m	m
pirita			f	f

Las estructuras presentes son cuatro, dos diques (ver figura 16) y dos fallas. El primer dique atraviesa la labor en NP-3S y CZ-6, su rumbo es N75°W/80°NE. El segundo dique tiene un rumbo N65°W/45°NE y se encuentra en la labor NP-2, como se mencionó anteriormente, ambos diques son de composición Microdiorita Cuarcífera. La primera falla se encuentra en la labor CZ-6, corresponde a una falla veta cuyo rumbo N10°E/79°SE, presenta relleno de calcita, actinolita, clorita, arcilla y leve magnetita. La segunda falla es visible en la labor NP-2, su rumbo es N30°W/45°NE y presenta relleno de calcita, magnetita, clorita, actinolita y arcilla.

Estas fallas no se correlacionan con las estructuras mayores que controlan la mineralización, y al igual que los diques, no son modelables al presentarse de forma local. Tampoco se puede obtener una temporalidad de las estructuras, ya que no existen cortes entre ellas. En figura 17, se muestra la comparación entre el mapa utilizado en interior mina y lo digitalizado en el software AutoCAD.



Figura 16: Fotografías que muestran los dos diques presentes. En A se ve el dique de NP-3S y CZ-6. En B el dique en la labor NP-2.

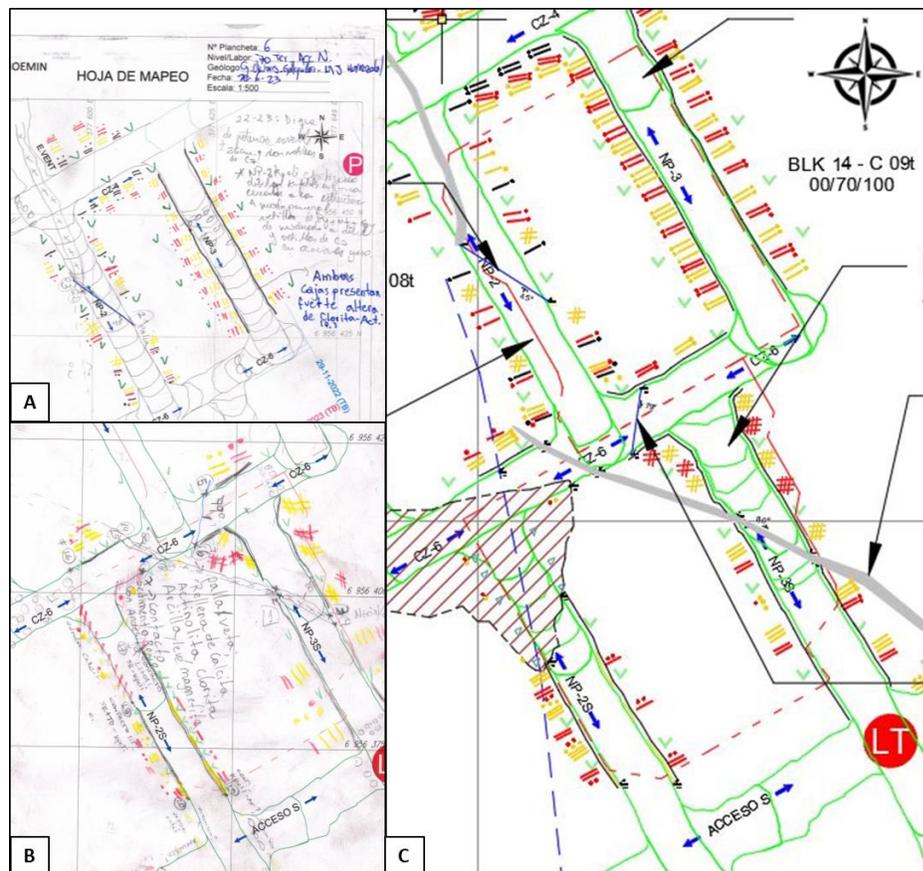


Figura 17: En A se muestra la parte norte del caserón mapeado con el mapa de planta, en B se muestra la parte sur del caserón mapeado y en C se muestra la digitalización en el software AutoCAD.

### 4.1.3. Nivel 36

El nivel 36 corresponde al nivel más profundo de todos los niveles mapeados, en este nivel se encuentra el caserón 51A-E1, se levantó la información lito estructural en las labores NP-5 (Nivel de Perforación 5) y CZ-CL (Cruzado- Cara Libre). En NP-7 (Nivel de Perforación 7) no fue posible el ingreso, debido a la falta de fortificación y acuñadura. En la figura 18, se muestra la digitalización en AutoCAD del mapeo interior mina.

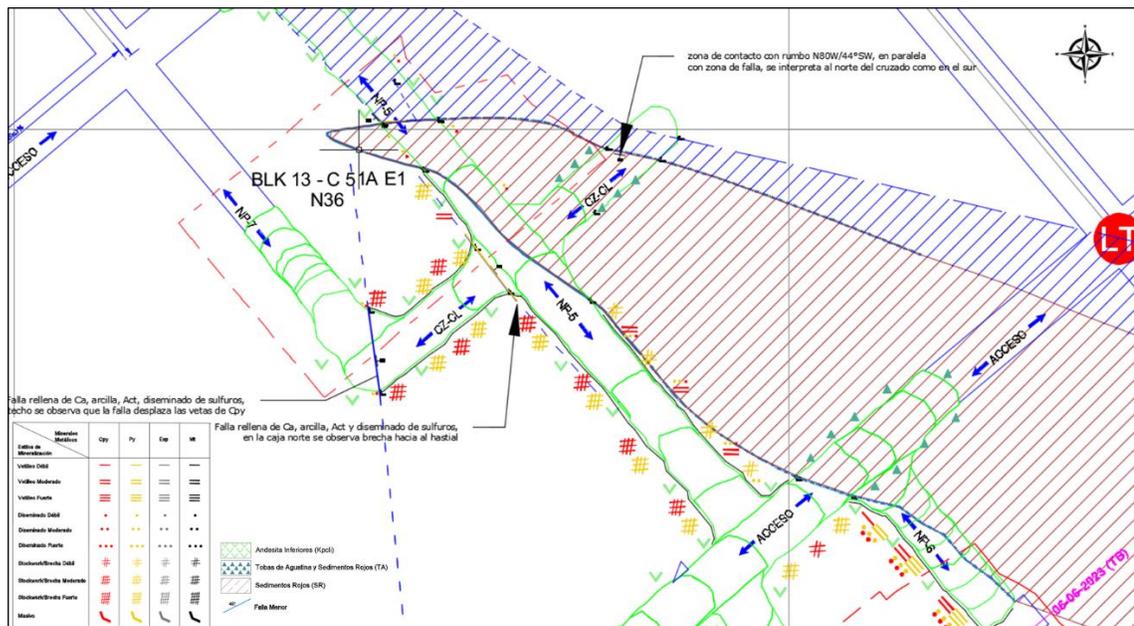


Figura 18: Se muestra la digitalización del mapeo interior mina, del caserón 51A-E1 en el software AutoCAD.

Las litologías encontradas en el caserón 51A-E1 fueron tres, Andesitas inferiores, Sedimentos Rojos y Tobas de Agustina. Las Andesitas inferiores se encuentran en la parte oeste del CZ-CL, también vuelven a aparecer al final de la labor hacia la parte este. De igual forma se presenta en la parte sur NP-5. Los Sedimentos Rojos se encuentran en la parte norte de NP-5 y al este del CZ-CL en conjunto con las Tobas de Agustina.

La mineralización presente en las labores de interior mina se presentan en las tablas 9 y 10.

Tabla 9: Descripción de la mineralización presente en NP-5.

Mineralización caserón 51A-E1				
NP-5				
Minerales	Modo de ocurrencia			
	masivo	stockwork	vetilla	diseminado
magnetita	ma			
mushketovita				
calcopirita		m	m	d
pirita		m		m

Tabla 10: Descripción de la mineralización presente en CZ-CL.

Mineralización caserón 51A-E1				
CZ-CL				
Minerales	Modo de ocurrencia			
	masivo	stockwork	vetilla	diseminado
magnetita	ma			
mushketovita				
calcopirita		m		
pirita		m		

Las alteraciones presentes en las labores, se localizan en el relleno de las estructuras de fallas. En la labor CZ-CL están las tres estructuras del área de estudio: La primera tiene un rumbo N8°W/56°NE, presenta relleno de calcita, arcilla, actinolita y diseminado de sulfuros. La segunda tiene un rumbo de N40°W/75°NE, presenta el mismo relleno de la primera falla. La tercera estructura tiene un rumbo N70W/44°SW, esta falla está ubicada en el contacto entre los Sedimentos Rojos y las Andesitas inferiores. Ninguna estructura se correlaciona con las estructuras mayores que controlan la mineralización, al ser fallas locales, estas no son modelables. En figura 19 se muestra la comparación entre el mapa utilizado en interior mina y lo digitalizado.

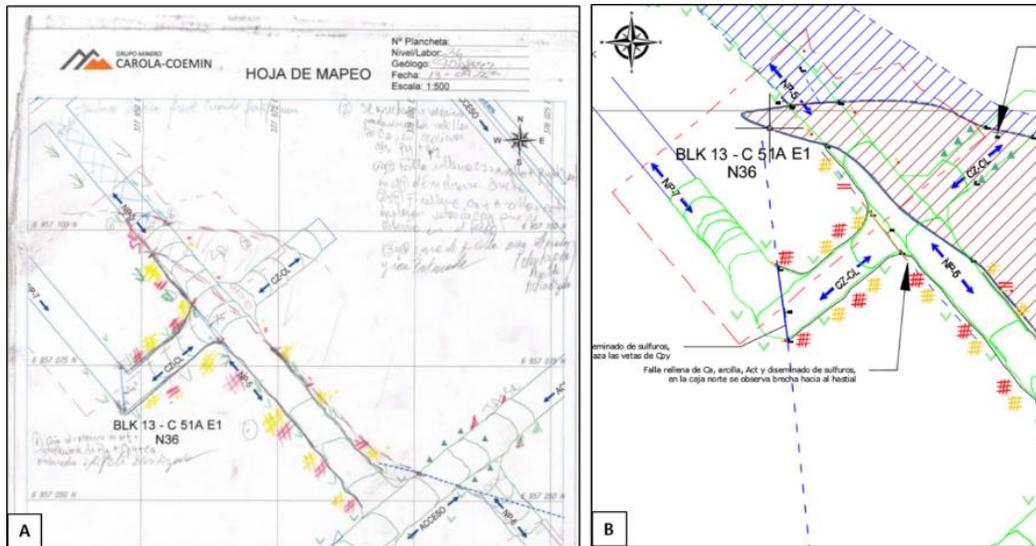


Figura 19: En A se muestra el mapa de plan con el cual se ingresó a interior mina y en B se muestra la digitalización de dicho mapa en el software AutoCAD.

## 4.2. Descripción litológica

En este ítem se presentan los resultados de la definición y descripción de las unidades litológicas que conforman los niveles: 150 (casero 3T), 70 (casero 9T) y 36 (casero 51A-E1). También se describe la mineralización y alteración presentes en cada unidad.

Las principales unidades presentes son: Andesitas inferiores, Sedimentos Rojos, Tobas de Agustina y dique de Microdiorita Cuarcifera (ver figura 20).

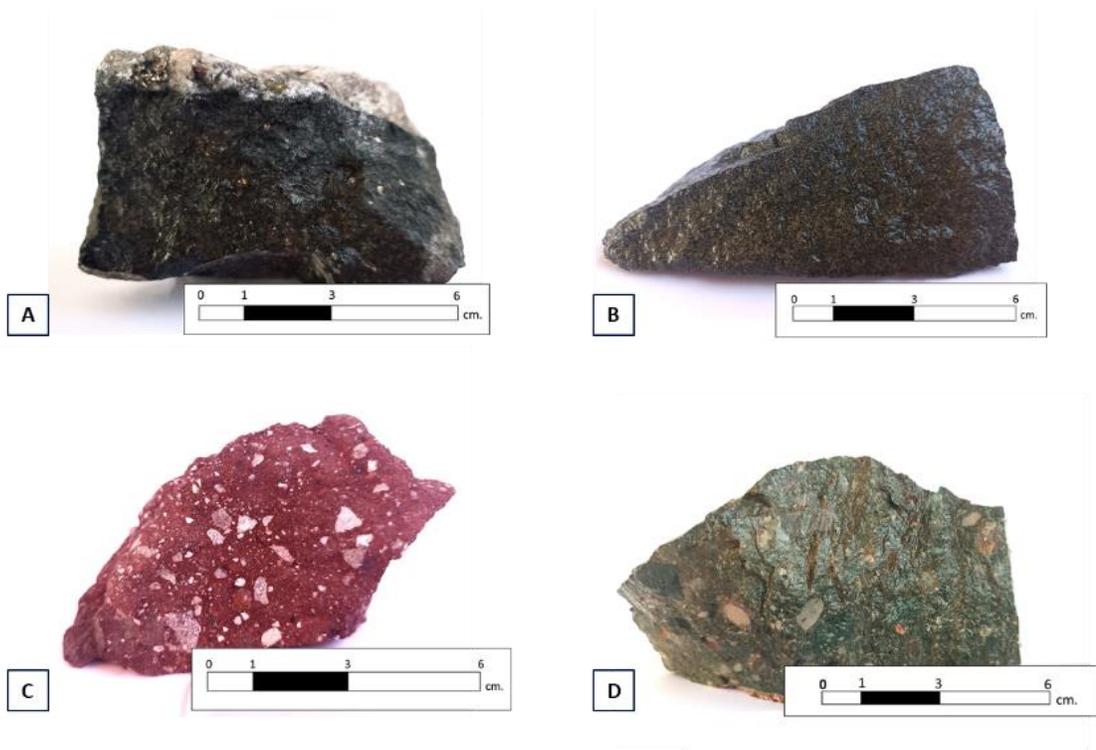


Figura 20: En A se puede ver la muestra de la unidad representativa de las Andesitas inferiores. En B Muestra representativa de la unidad Microdiorita Cuarcífera. En C Fotografía de la muestra representativa de los Sedimentos Rojos. En D Muestra representativa de la unidad Toba de Agustina.

#### 4.2.1. Nivel 150 (caserón 3T)

En este nivel se encontraron dos litologías que abarcan el caserón 3T, sin embargo, de forma aledaña hacia el norte de la labor, se encuentra una tercera litología perteneciente a la unidad de las Tobas de Agustina, se describen en la tabla 11.

Tabla 11: Descripción de la litología, alteración y mineralización de las unidades litológicas del nivel 150, caserón 3T.

Unidad	Litología	Alteración	Mineralización
Andesitas inferiores	textura porfídica, masa fundamental afanítica con fenocristales de plagioclasa	cloritización, actinolización y silicificación	pirita, calcopirita, magnetita y mushketovita
Tobas de Agustina	textura brechosa, matriz bien seleccionada, color verde pardo a gris polimítica, clastos de 0.3 cm a 1 cm aproximadamente, angulosos a sub-angulosos, mal seleccionados, algunos clastos son volcánicos y otros intrusivos	carbonatación	pirita
Sedimentos Rojos	textura brechosa, matriz bien seleccionada, tamaño limo, color roja, probablemente con un alto contenido de óxidos de hierro, clastos polimíticos, angulosos a sub-angulosos, tamaño de 0.2 cm a 1 cm aprox.	silicificación y carbonatación	pirita y calcopirita

#### 4.2.2. Nivel 70 (caserón 9T)

En este nivel las unidades presentes en el caserón 9T, fueron cuatro: Andesitas inferiores, Tobas de Agustina, Sedimentos Rojos y Dique de Microdiorita Cuarcifera, descritas en la tabla 12.

Tabla 12: Descripción de la litología, alteración y mineralización de las unidades litológicas del nivel 70, caserón 9T.

Unidad	Litología	Alteración	Mineralización
Andesitas inferiores	textura pófidica, color gris a verde oscuro, masa fundamental afanítica con fenocristales de plagioclasa.	cloritización, actinolización y silicificación	pirita, calcopirita, magnetita y mshketovita
Tobas de Agustina	textura brechosa, matriz bien seleccionada, color verde pardo a gris polimíctica, clastos de 0.3 cm a 1.3 cm aprox., angulosos a sub-angulosos, mal seleccionados, algunos clastos son volcánicos.	carbonatación	pirita
Sedimentos Rojos	textura brechosa, matriz bien seleccionada, tamaño limo, color roja, probablemente con un alto contenido de óxidos de hierro, clastos monomicticos, angulosos a sub-angulosos, tamaño de 0.2 cm a 1 cm aprox.	silicificación y carbonatación	pirita y calcopirita
Dique Microdiorita Cuarcifera	textura microholocristalina, color gris a pardo	sin alteración	sin mineralización

#### 4.2.3. Nivel 36 (caserón 51A-E1)

En el nivel 36 del caserón 51A-E1, se encontraron tres unidades litológicas: Andesitas inferiores, Tobas de Agustina y Sedimentos Rojos, su descripción litológica se hará a continuación, en la tabla 13.

Tabla 13: Descripción de la litología, alteración y mineralización de las unidades litológicas del nivel 36, caserón 51A-E1.

Unidad	Litología	Alteración	Mineralización
Andesitas inferiores	textura pófidica, color gris a verde oscuro, masa fundamental afanítica con fenocristales de plagioclasa.	cloritización, actinolización y silicificación	pirita, calcopirita, magnetita y mshketovita
Tobas de Agustina	textura brechosa, matriz bien seleccionada, color verde pardo a gris polimíctica, clastos de 0.3 cm a 1 cm aprox., angulosos a sub-angulosos, mal seleccionados, algunos clastos son volcánicos.	silicificación y carbonatación	pirita y calcopirita
Sedimentos Rojos	textura brechosa, matriz bien seleccionada, tamaño limo, color roja, probablemente con un alto contenido de óxidos de hierro, clastos monomicticos, angulosos a sub-angulosos, tamaño de 0.2 cm a 1 cm aprox.	silicificación y carbonatación	pirita y calcopirita

### **4.3. Digitalización y creación del modelo geológico a largo plazo en Leapfrog Geo**

Este fue construido por la base de datos de sondajes de la Superintendencia de Geología de SCM Carola.

Para la digitalización, además de la información entregada por los sondajes, a modo de referencia espacial, se trabajó con las labores que fueron entregadas por el Departamento de Topografía y los caserones proporcionados por la Superintendencia de Ingeniería, de SCM Carola. Las labores se encuentran de color pardo y los caserones son representados con el color gris (ver figura 22).

Al momento de crear los sólidos de la unidad litológica correspondiente a los Sedimentos Rojos, estos fueron formados como intrusivos, ya que no tienen una continuidad, apareciendo de forma esporádica dentro de las unidades litológicas Andesitas inferiores y las Tobas de Agustina, incluso aparecen también en el contacto entre ambas unidades.

En el caso de las Tobas de Agustina, fueron creadas como contacto de erosión, y superficie desplazada de la unidad litológica Andesitas inferiores. Debido a que las Tobas de Agustina se encuentran sobre las Andesitas inferiores.

Las Andesitas inferiores fueron creadas como intrusivos debido a la variabilidad de las cotas y generar un modelo más continuo, siendo esta la unidad más antigua dentro del modelo.

La Microdiorita Cuarzófera, fue creada como intrusivo debido a su origen y por encontrarse cortando las demás unidades.

#### **4.3.1. Niveles 150 (caserón 3T) y 70 (caserón 9T)**

Los caserones 3T y 9T de los niveles 150 y 70, respectivamente, fueron encerrados en el mismo *boundary* debido a la cercanía entre sus caserones. En la figura 21, se puede observar la proximidad de ellos y los límites del modelo, en la tabla 14 se encuentran las coordenadas del modelo.

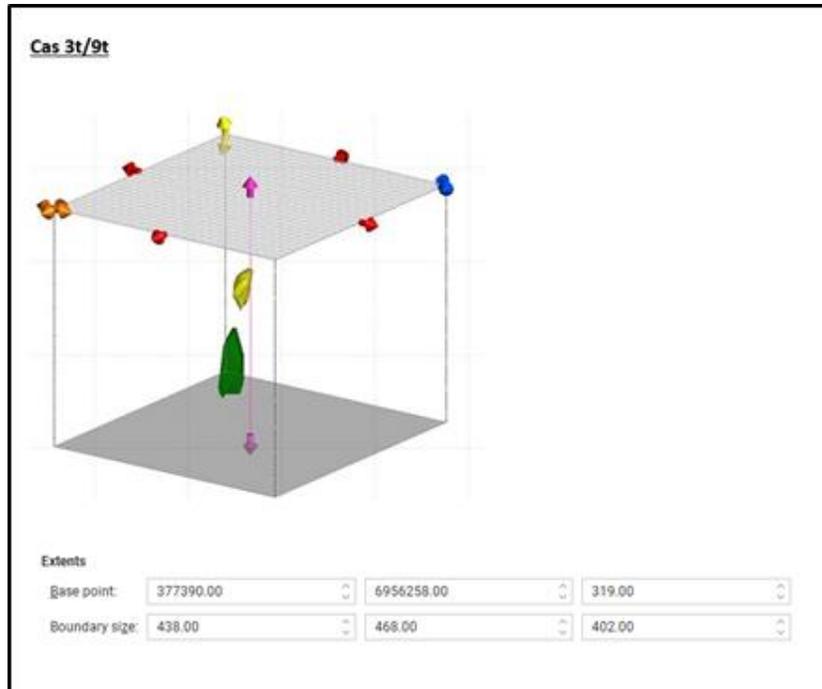


Figura 21: Se muestra el *boundary* de los caserones 3T y 9T, de color amarillo se ve el caserón 3T y en color verde el caserón 9T.

Tabla 14: Se muestra las medidas que fueron utilizadas para crear el boundary de los caserones 3T y 9T.

Caserón	Coordenada	Punto inicial	Punto final
Cas 3t/9t	x	377390	377828
	y	6956258	6956726
	z	319	-83

#### 4.3.1.1. Modelo geológico a largo plazo del nivel 150, caserón 3T

En este ítem se presentan los resultados de la creación del modelo geológico de largo plazo en el nivel 150, específicamente del caserón 3T. Se puede observar en la figura 22, el caserón de color gris localizado en la labor de color marrón.

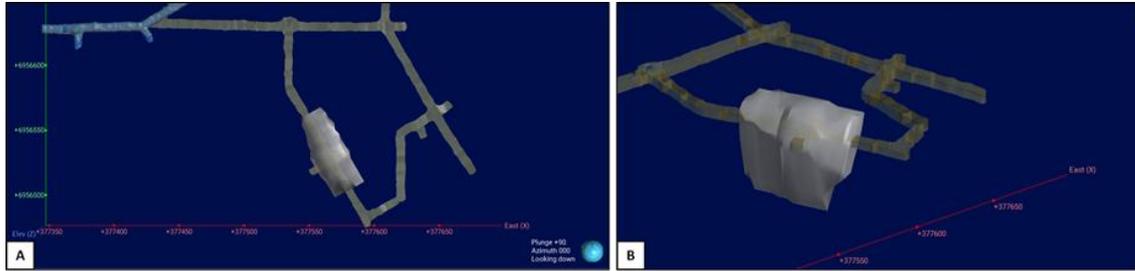


Figura 22: Se muestra el diseño de las labores de color café y el caserón en color gris, A y B son distintas vistas del mismo caserón y mismas labores.

De acuerdo a los sondajes que intersectan el caserón, y son más cercanos a la labor, se puede observar que no hay Sedimentos Rojos en la labor, solo se presentan en dos partes del caserón. En el techo y por el costado de la base, siendo visible en la figura 23, encerrado en un círculo de color amarillo. Cabe mencionar que la base del caserón no es parte del nivel 150.

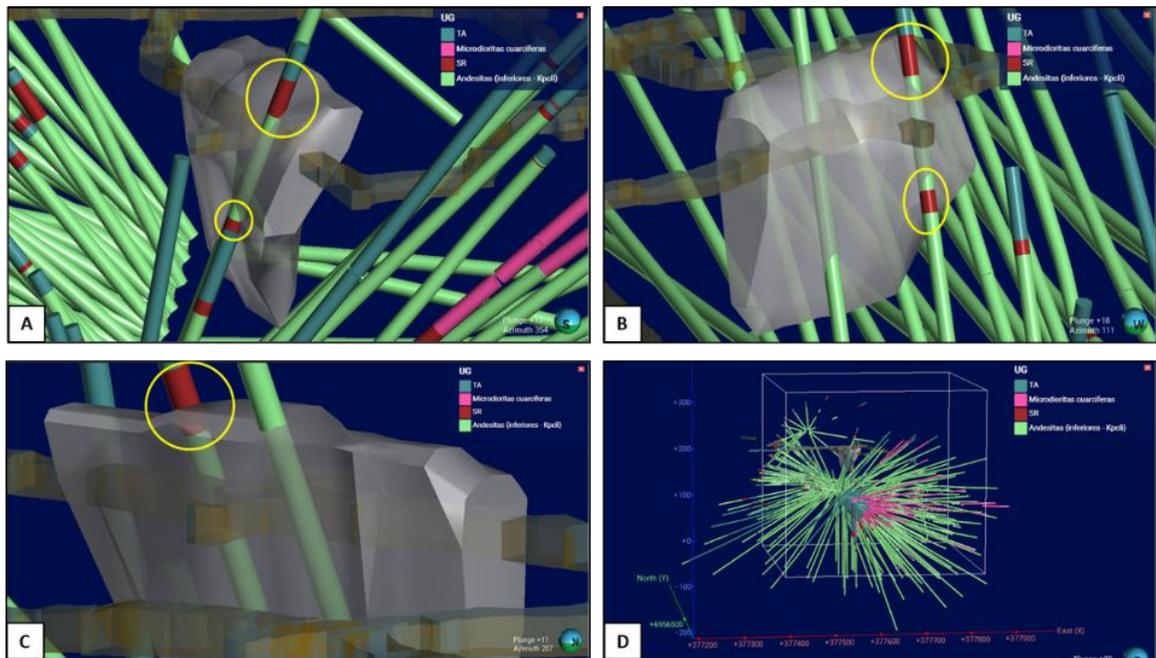


Figura 23: Se muestran distintas vistas de los sondajes que intersectan el caserón, el cual está representado en color gris. En A, B y C se puede observar con mayor claridad donde se encuentran los Sedimentos Rojos (dentro del círculo de color amarillo), de acuerdo a la información entregada por los sondajes. En D se ve el boundary completo del modelo geológico de largo plazo y los sondajes que se utilizaron para su construcción. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

En los Sedimentos Rojos se puede observar en la figura 24, encerrado en un círculo amarillo, que estos cortan al caserón solo en el techo, debido a la poca información de los sondajes empleados en este modelamiento. Sin embargo, cuando se ingresó a hacer el mapeo en interior mina, se encontró Sedimentos Rojos en las cajas (figura 13), lo cual no se observa en el modelo geológico a largo plazo (ver figura 23 y 24).

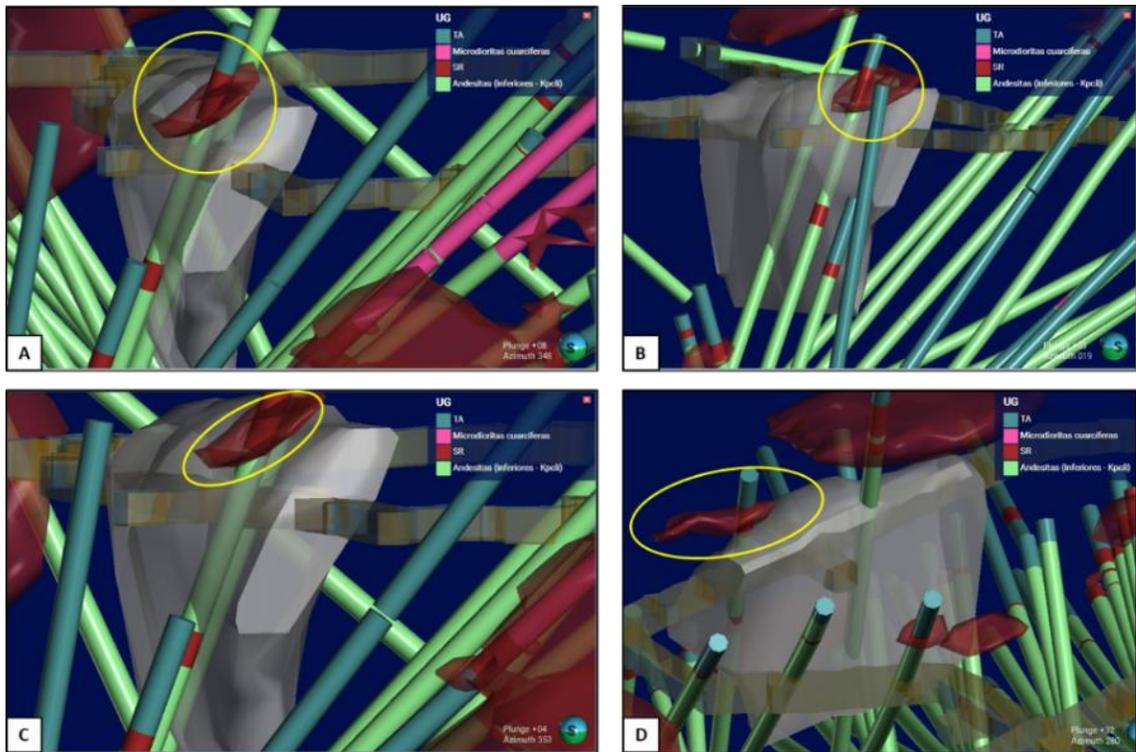


Figura 24: Se muestra la creación de los sólidos correspondiente a la unidad litológica Sedimentos Rojos (SR). En A, B, C y D, se pueden apreciar distintas vistas del caserón con los sondajes y el sólido encerrado en un círculo amarillo.

En el caso de las Tobas de Agustina se puede observar, de acuerdo a los sólidos creados, que esta unidad se encuentra al principio y al término de la labor. Esto se puede observar en la figura 25, en el sector encerrado en un círculo amarillo. Al momento de ingresar a realizar el mapeo de interior mina, las Tobas Agustina se aparecieron solamente en el inicio de la labor, en la caja oeste. No obstante, no fue posible ingresar al término de la labor, por falta de acuñadura y fortificación.

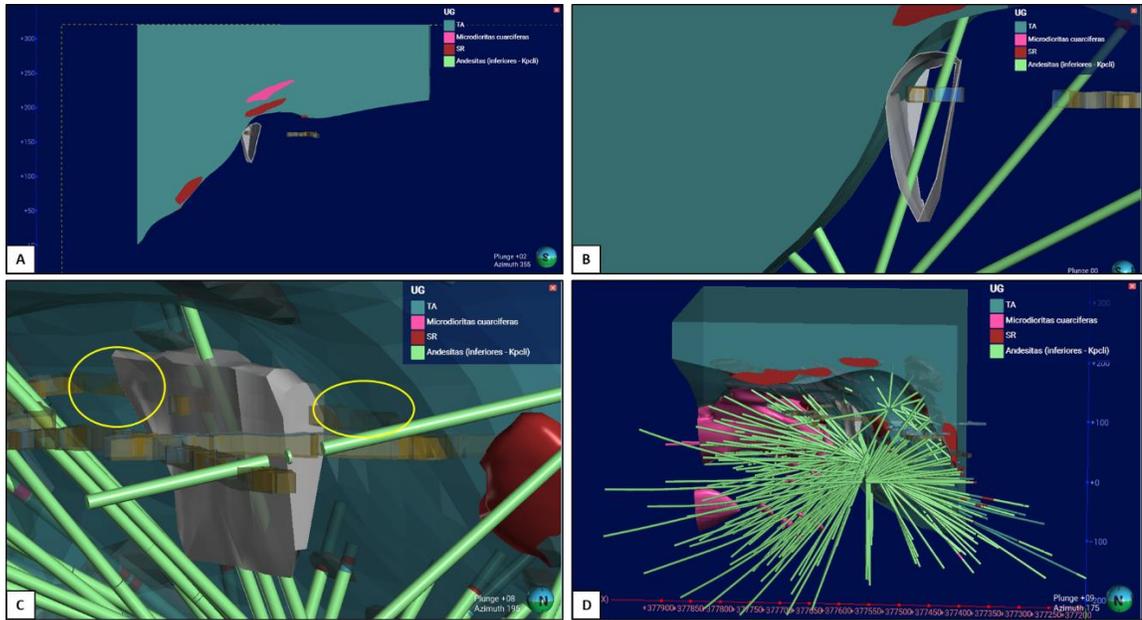


Figura 25: Se muestra en A y B, un corte del modelo para poder observar donde se presenta los Sedimentos Rojos y las Tobas de Agustina. En C se observa con más cercanía el caserón, siendo visible que, en el inicio y final de la labor, afloran las Tobas de Agustina, estas se encuentran encerradas en un círculo de color amarillo. En D se muestra el boundary con los sólidos de los Sedimentos Rojos (SR), Tobas de Agustina (TA) y Microdiorita Cuarcífera.

Respecto a la unidad litológica de Andesitas inferiores, la construcción del sólido prácticamente encerró todo el caserón, exceptuando el costado del techo, donde se evidencia la presencia de los Sedimentos Rojos y las Tobas de Agustina, como se puede observar en la figura 26, encerrado en un círculo amarillo. En la figura 27 se muestra el modelo final.

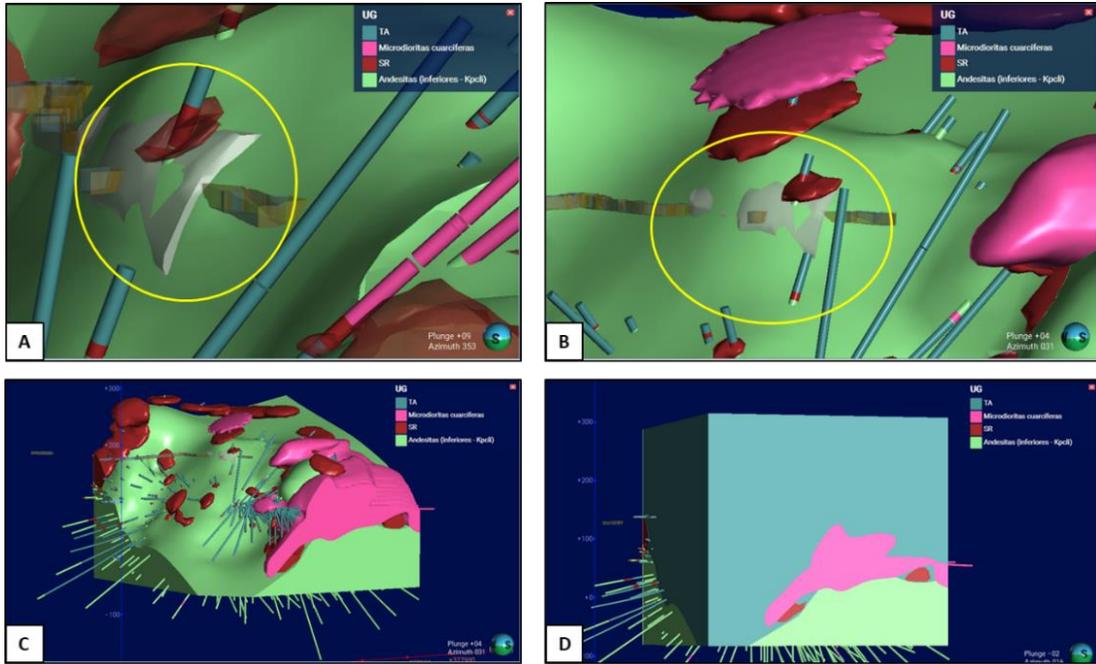


Figura 26: En A y B, se observa el contacto entre el caserón de color gris con las Andesitas inferiores de color verde claro y los Sedimentos Rojos de color rojo, se encuentran encerrados en un círculo de color amarillo. En C se ve desde una vista más alejada, el boundary en conjunto con las unidades litológicas Andesitas inferiores, Sedimentos Rojos y Microdiorita Cuarcífera. También se observan los sondajes utilizados para la creación de los sólidos. En D se ve el modelo geológico de largo plazo final. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

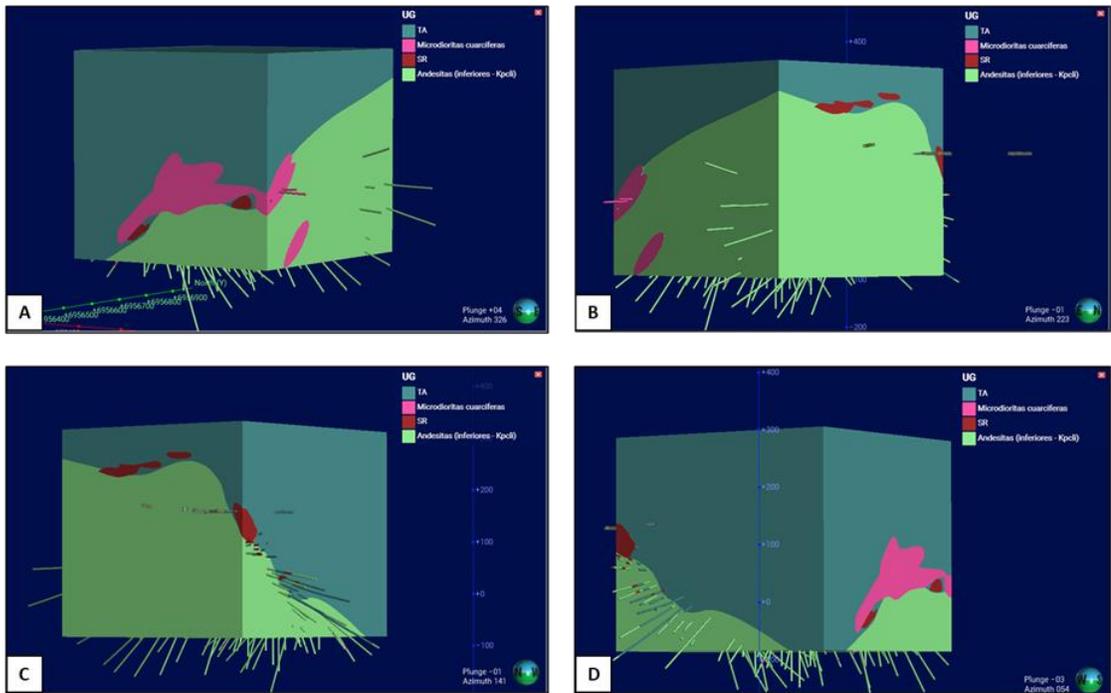


Figura 27: Se muestra en A, B, C y D, distintas vistas del modelo geológico a largo plazo, construido en base a la información entregada por los sondajes realizados por SCM Carola. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

#### 4.3.1.2. Modelo geológico a largo plazo del nivel 70, caserón 9T.

A continuación, se presentan los resultados del modelo geológico a largo plazo del nivel 70, específicamente el caserón 9T (ver figura 28). Los sólidos creados son los mismos del nivel 150, debido a que forman parte del mismo *boundary*.

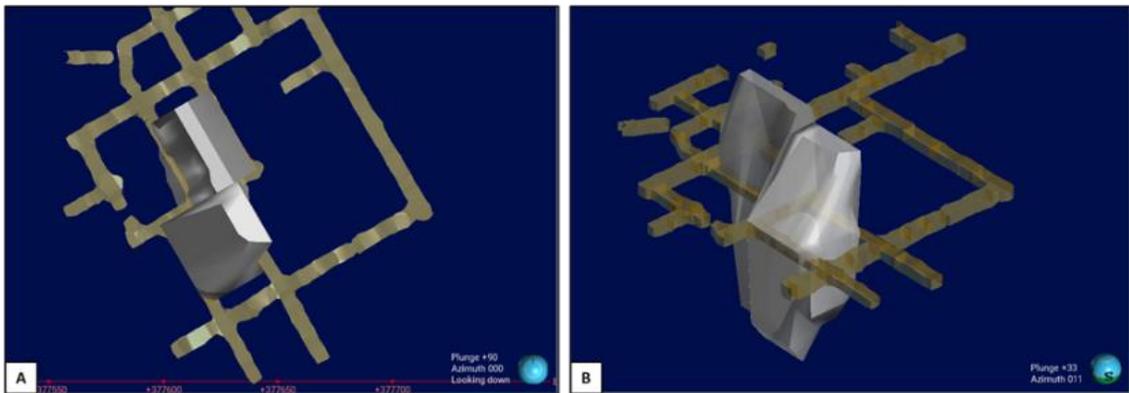


Figura 28: En A y B, se muestra el caserón 9T de color gris, en conjunto con las labores de color café.

Los sondajes que intersectan el caserón, ver figura 29, muestran la presencia de Andesitas inferiores, Tobas de Agustina y Sedimentos Rojos, también se puede ver la Microdiorita Cuarcifera. No obstante lo anterior, es importante destacar que en su mayoría, la unidad más frecuente son las Andesitas inferiores.

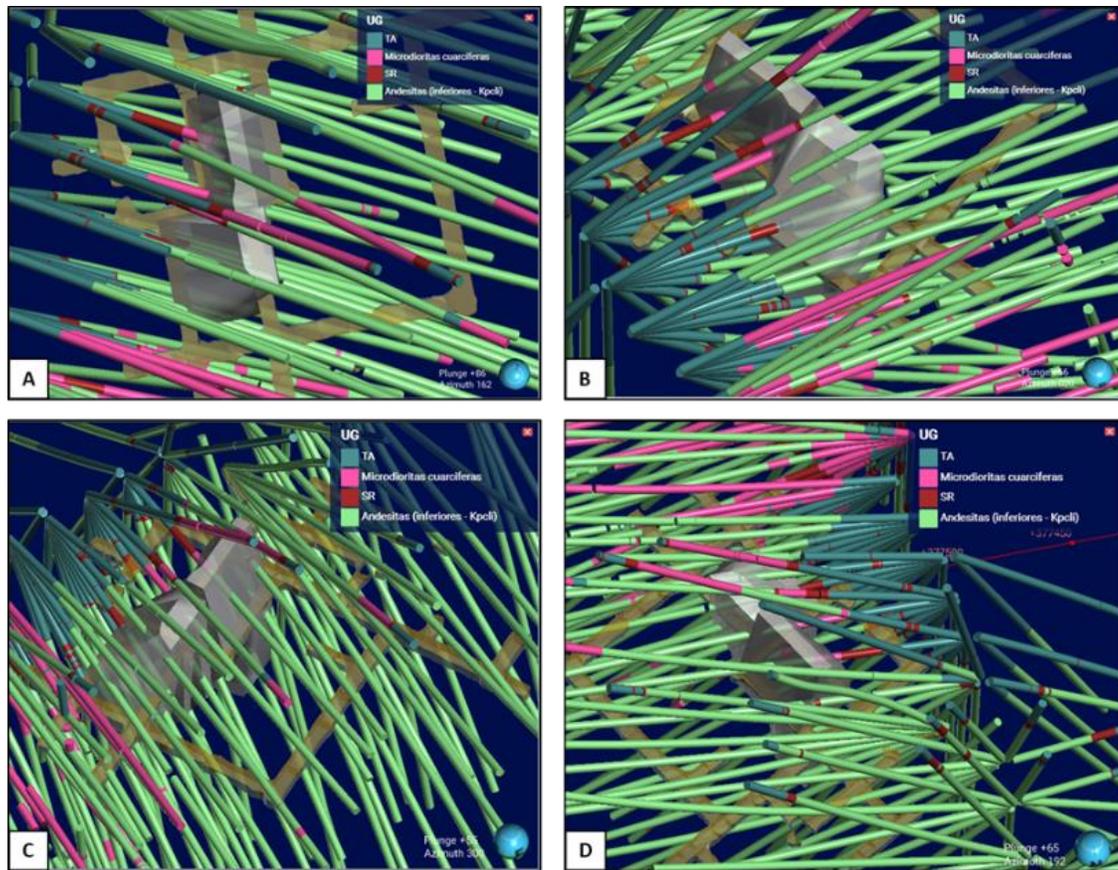


Figura 29: Se muestran los sondajes que intersectan el caserón 9T, estos fueron utilizados para crear el modelo geológico a largo plazo.

Al momento de crear los sólidos de la unidad de Sedimentos Rojos, se puede observar que este se encuentra en la labor NP-2S y CZ-6 (ver la figura 30). Sin embargo, en esta última solo existe sólido asociado a esta unidad en la base de la labor. De acuerdo a lo observado en el mapeo de interior mina, existen más cantidad de Sedimentos Rojos, de lo que representa el sólido de largo plazo (ver figura 15 y 30).

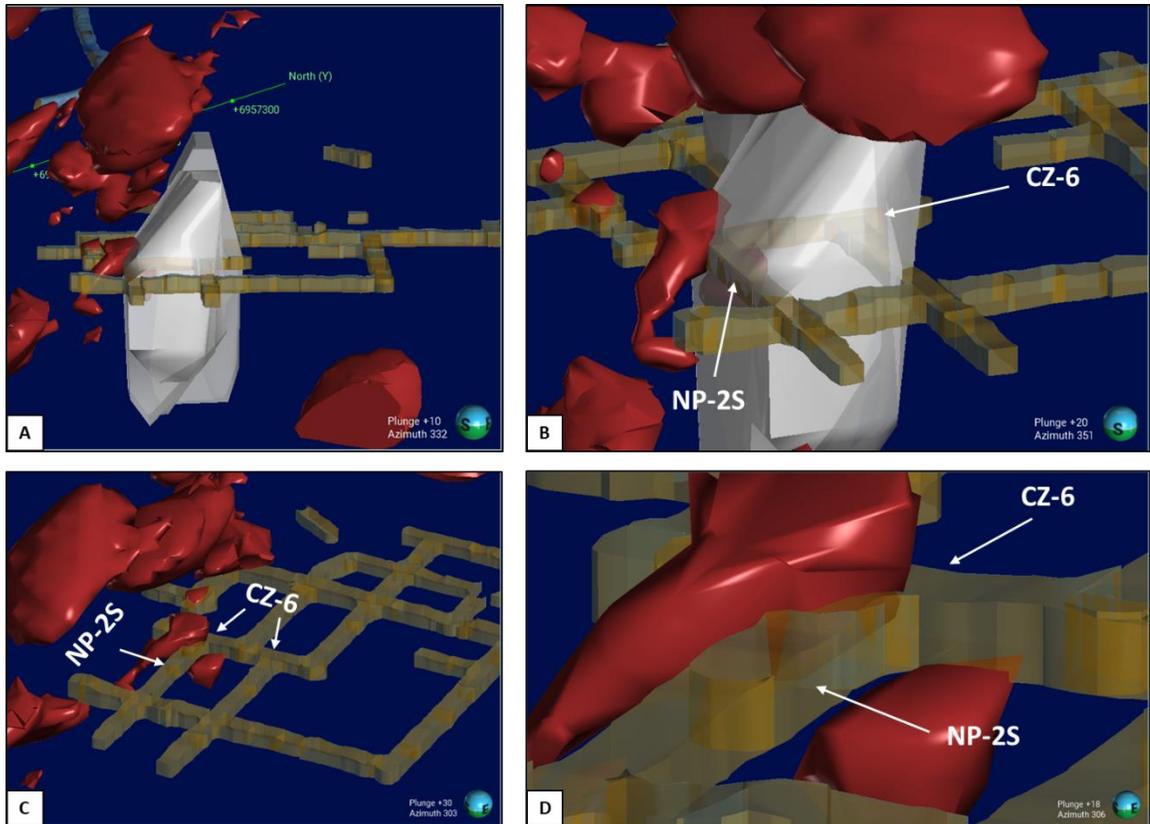


Figura 30: Se muestra la creación de los sólidos de la unidad Sedimentos Rojos en conjunto con la intersección del caserón y la labor, en blanco están escrito los nombres de las labores donde se ven los Sedimentos Rojos.

En la figura 31, se puede ver que existe una zona de la labor y el caserón donde es intersectada por las Tobas de Agustina, en conjunto con los Sedimentos Rojos.

La Microdiorita Cuarcífera, no aparece en la labor ni en el caserón, sin embargo, los sondajes dentro del *boundary*, muestran esta litología (ver figura 29).

Las Andesitas Inferiores, se encuentran presentes en la mayor parte del caserón, siendo posible ver éstas en la figura 32, encerrada en un círculo amarillo.

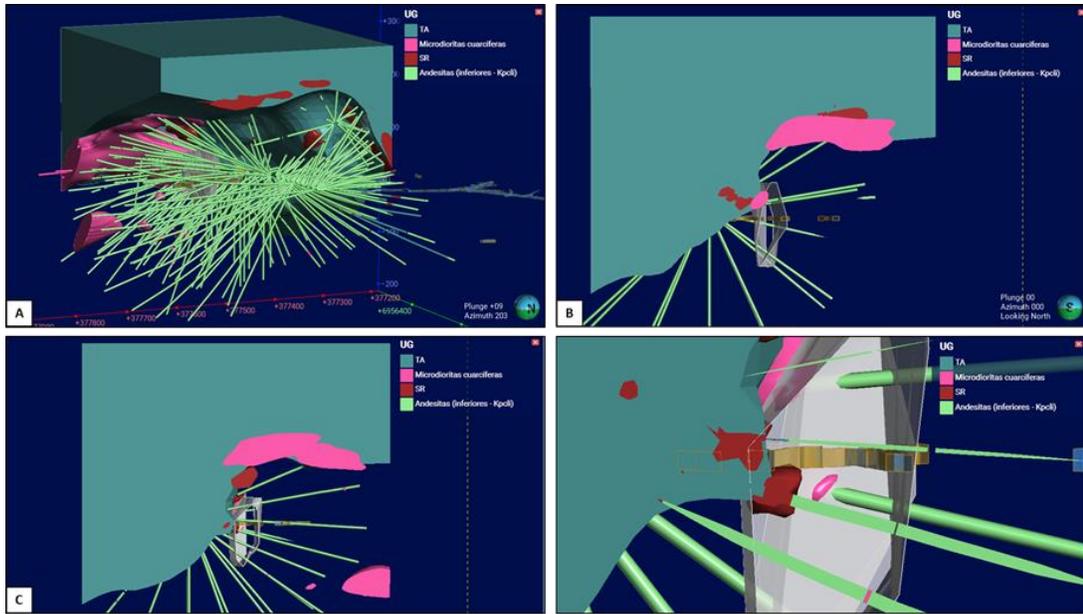


Figura 31: Se muestra el boundary y distintas vistas de las Tobas de Agustina (TA), las cuales están de color calipso, en conjunto con los sondajes utilizados para su creación. También se puede observar el caserón en color gris y la labor de color café, junto con la unidad de Microdiorita Cuarcífera en color rosado.

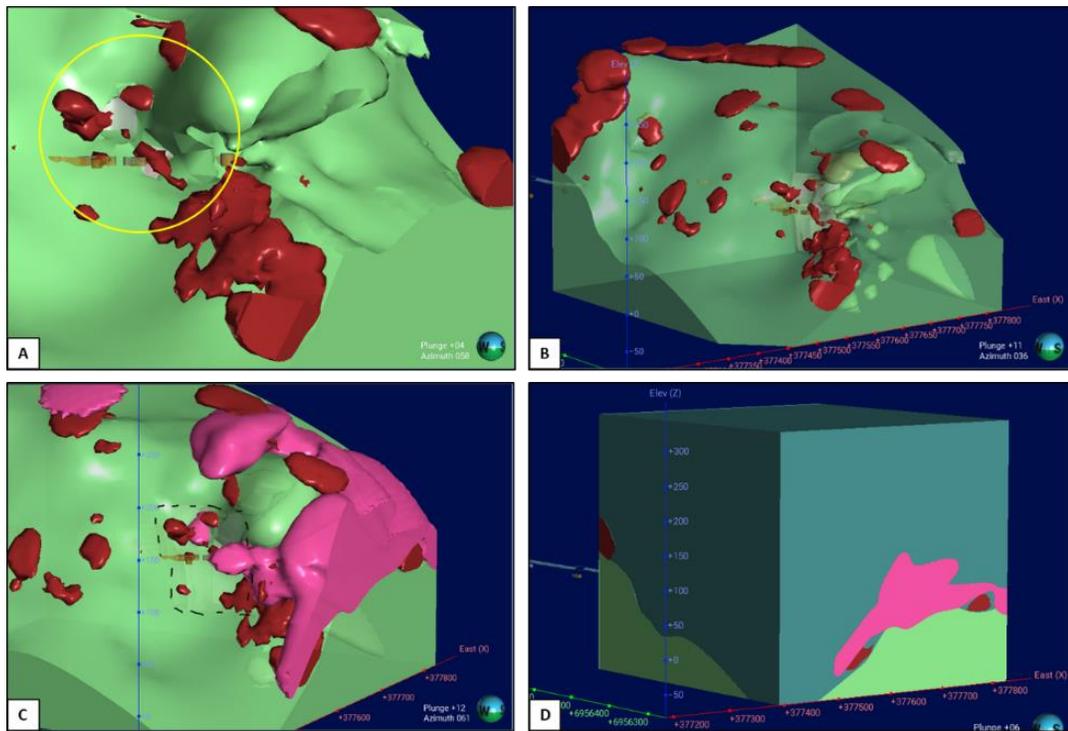


Figura 32: En A y B se muestra la unidad Andesitas inferiores, en contacto con la unidad Sedimentos Rojos. En C, se ve el contacto con las Andesitas inferiores, Sedimentos Rojos y la Microdiorita Cuarcífera. En D, se puede ver el modelo geológico de largo plazo finalizado. También en A se ve el caserón encerrado en un círculo amarillo y en C se ve el caserón dibujado con una línea negra segmentada.

### 4.3.2. Modelo geológico a largo plazo del nivel 36, caserón 51A-E1

Este nivel se encuentra en el techo del caserón. El resto del caserón abarca otros niveles de la mina, siendo visible en la figura 34.

Las medidas del *boundary* son las presentes en la figura 33, las cuales son entregadas por la Superintendencia de Geología de SCM Carola.

#### Cas 51A

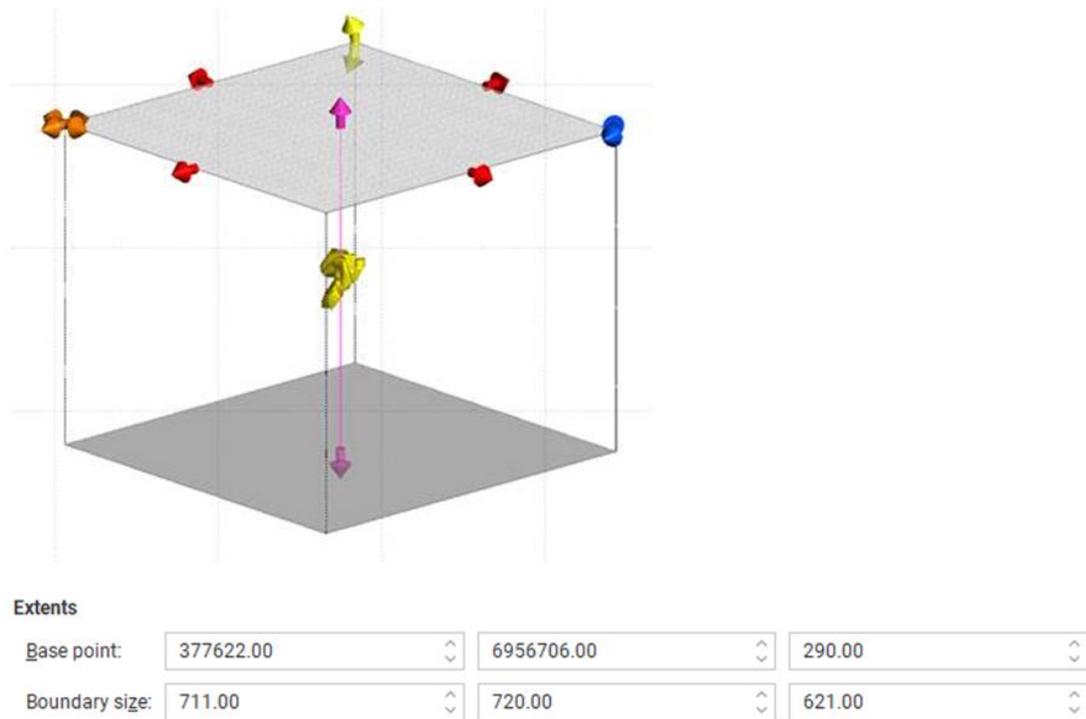


Figura 33: Muestra el *boundary* del caserón 51A-E1 y sus respectivos límites.

Tabla 15: Se muestran las coordenadas con las que se construyó el boundary del caserón 51A-E1.

Caserón	Coordenada	Punto inicial	Punto final
Cas 51A	x	377622	378333
	y	6956706	6957426
	z	290	-331

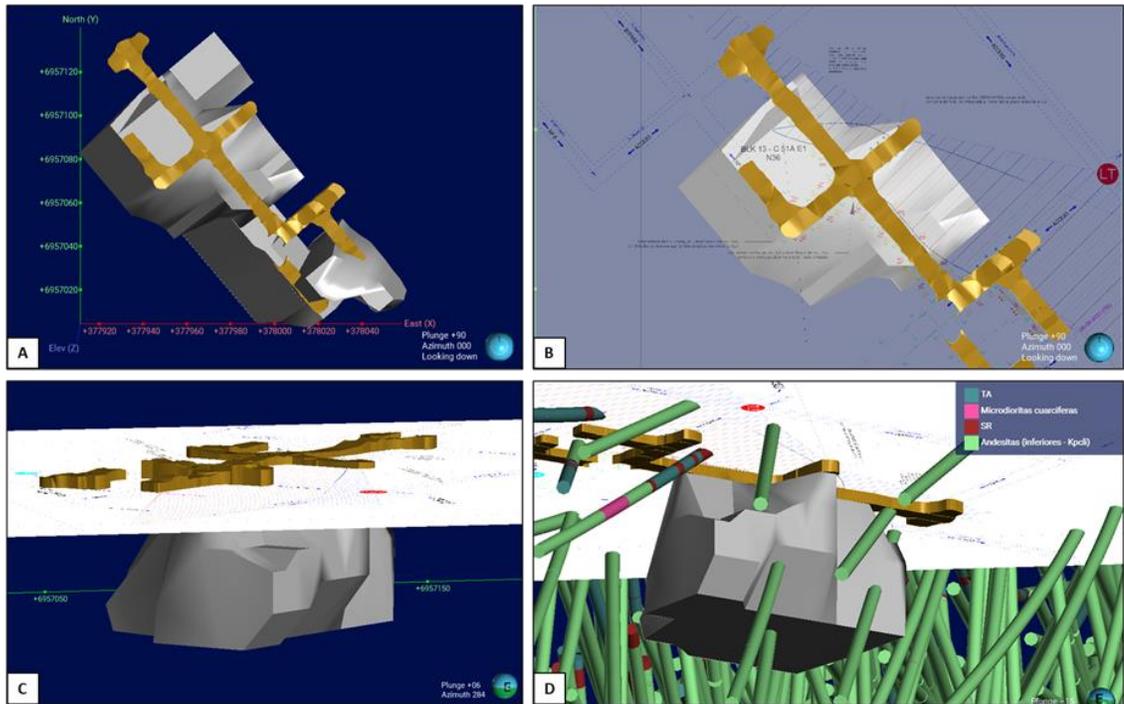


Figura 34: En A se muestra la labor en color café y el caserón de color gris. En B, C y D, se ve el mapa digitalizado en AutoCAD. En D, es posible observar los sondajes que intersectan el caserón. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

En la creación del sólido de los Sedimentos Rojos, se puede observar en la figura 35, que este intersecta una parte de la labor y el techo del caserón, sin embargo, no está presente en las zonas que se encontraron en el mapeo de interior mina.

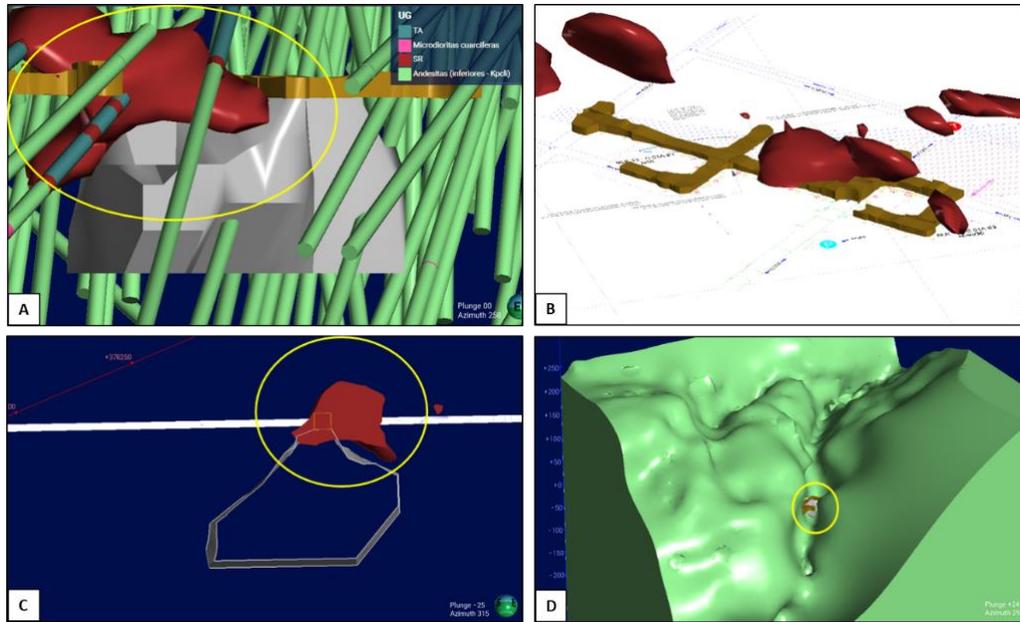


Figura 35: En A, se muestra los sondajes y los sólidos de los Sedimentos Rojos encerrado en un círculo amarillo. En B se muestra los Sedimentos Rojos y el mapa georreferenciado en Leapfrog. En C, se muestra los Sedimentos Rojos (encerrado en círculo amarillo) y el mapa digitalizado en AutoCAD, que fue georreferenciado en Leapfrog. En D se puede observar que la mayor parte del caserón, se encuentra dentro de la unidad Andesitas inferiores, el cual está encerrado en un círculo amarillo. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

Al crear los sólidos de la unidad Tobas de Agustina, se puede ver en la figura 36, encerrada en un círculo amarillo, que se encuentra intersectando una pequeña parte de la labor (CZ-CL) y el caserón.

La creación de los sólidos de la unidad Andesitas inferiores, se puede observar en la figura 37, encerrado en un círculo amarillo. Se ve el caserón envuelto en esta unidad y con poca intersección con otras unidades.

Finalmente, el modelo geológico de largo plazo se puede observar en la figura 37C y 37D. En este caserón no se encontró Microdiorita Cuarcífera y tampoco estaba presente en los sondajes de este *boundary*.

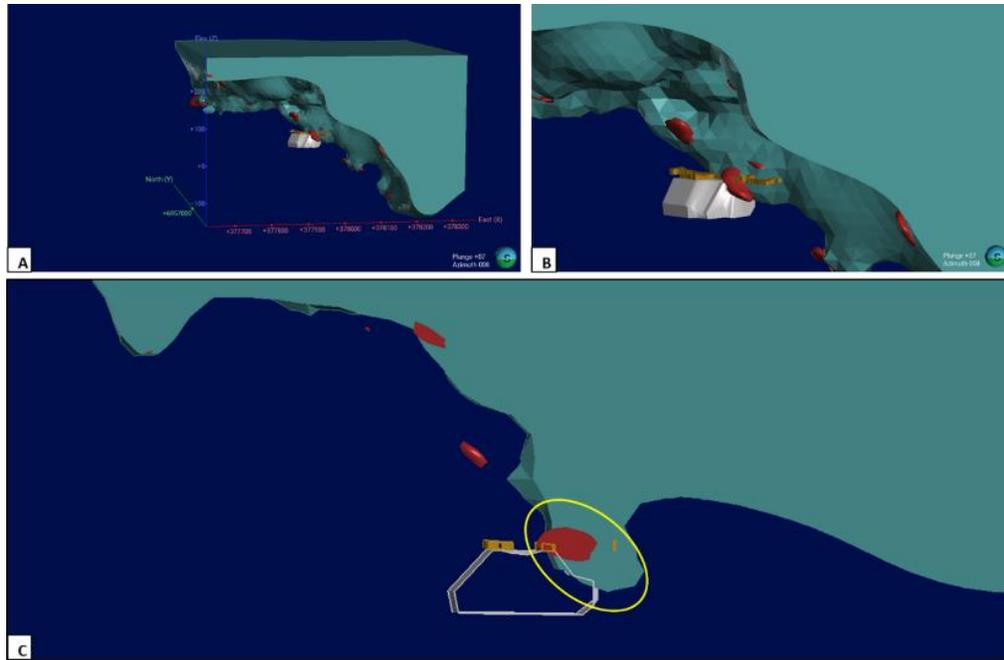


Figura 36: En A, B y C, muestra la unidad Tobas de Agustina y su intersección con la labor y el caserón, en la última imagen se encuentra encerrada en un círculo amarillo.

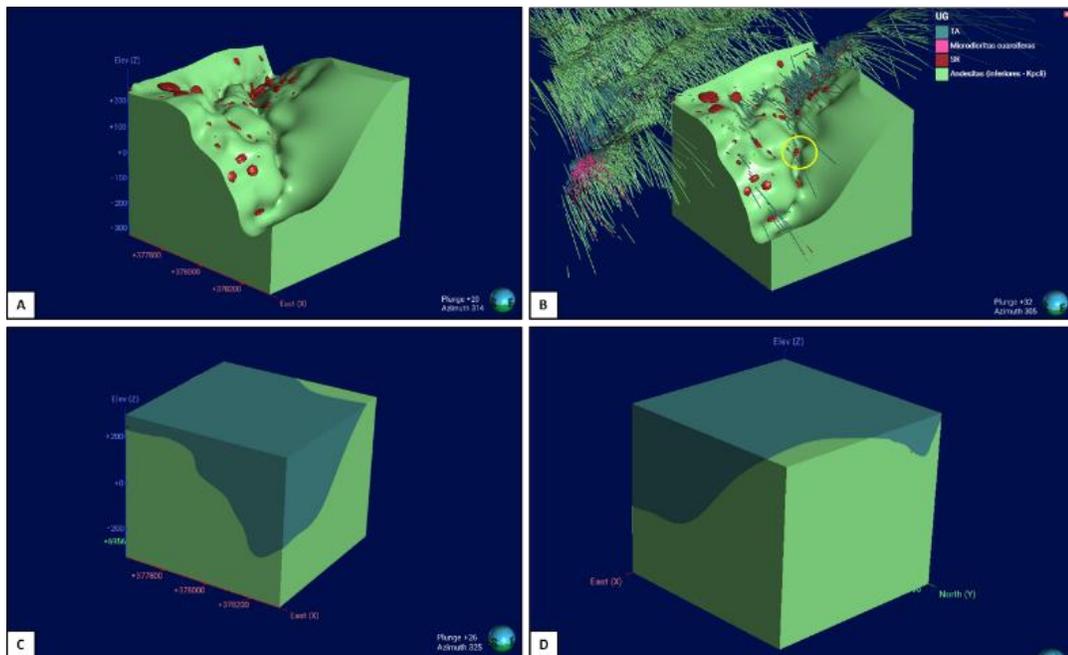


Figura 37: En A y B muestra la construcción del sólido de las Andesitas inferiores, en este último está encerrada en un círculo amarillo la ubicación del caserón dentro del sólido. En C y D muestra el resultado final del modelo geológico a largo plazo del nivel 36, caserón 51A- E1. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

#### 4.4. Construcción del modelo geológico a corto plazo en Leapfrog Geo

En el caso del nivel 36, caserón 51A-E1, se realizaron siete sondajes de producción que intersectaron el caserón. Disminuyendo la incertidumbre del contacto litológico. Se incorporó esta nueva información a la preexistente, y fueron creados nuevos sólidos. Una vez formados, se realizaron los respectivos ajustes de los contactos, de acuerdo a lo visto en terreno.

Las superficies de contacto de las unidades son las mismas creadas en el modelo de largo plazo, las cuales están descritas en el ítem 5.3.

##### 4.4.1. Modelo geológico a corto plazo del nivel 150, caserón 3T

En este ítem se presenta el resultado del modelo geológico a corto plazo del nivel 150, caserón 3T. En la figura 38 se puede observar el ajuste que se hizo a los sólidos de los Sedimentos Rojos, en el caserón 3T. Estos se encuentran intersectando la labor en dos zonas, al inicio y final del caserón, como se muestran en la porción encerrada por un círculo amarillo.

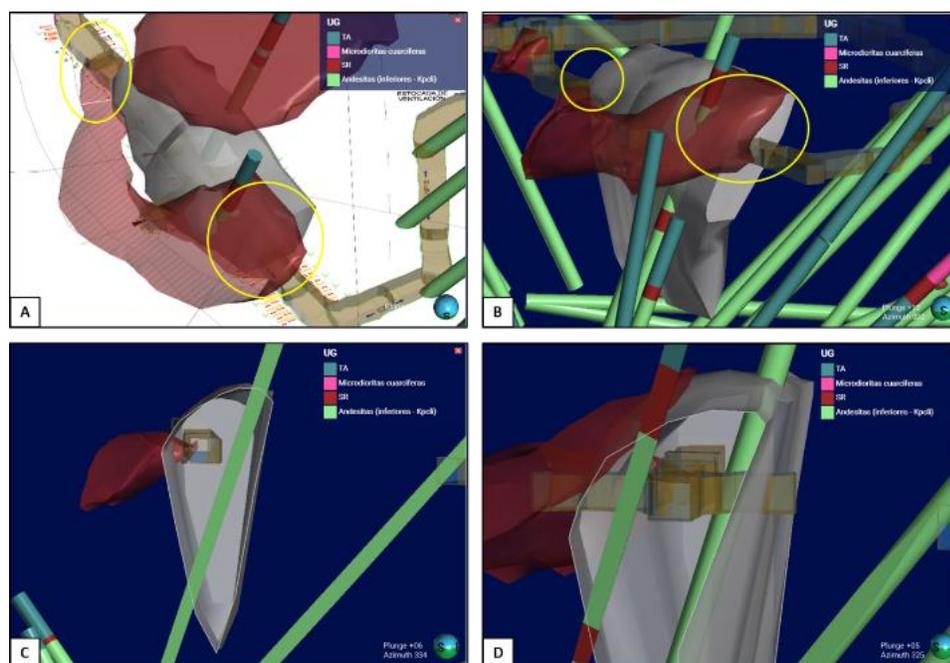


Figura 38: En A y B se puede observar el ajuste del sólido de los Sedimentos Rojos (SR), que se hizo en base al mapa digitalizado en AutoCAD, el cual se encuentra encerrado en un círculo amarillo. En C y D, se ve el corte que se realizó para poder obtener una mejor vista del resultado de los Sedimentos Rojos en la labor.

La unidad Tobas de Agustina no tuvo una mayor diferencia en el contacto litológico del modelo de largo plazo. En la figura 39, se puede ver la construcción del sólido de esta unidad de color calipso, en conjunto con la intersección del caserón en color gris y la labor de color café.

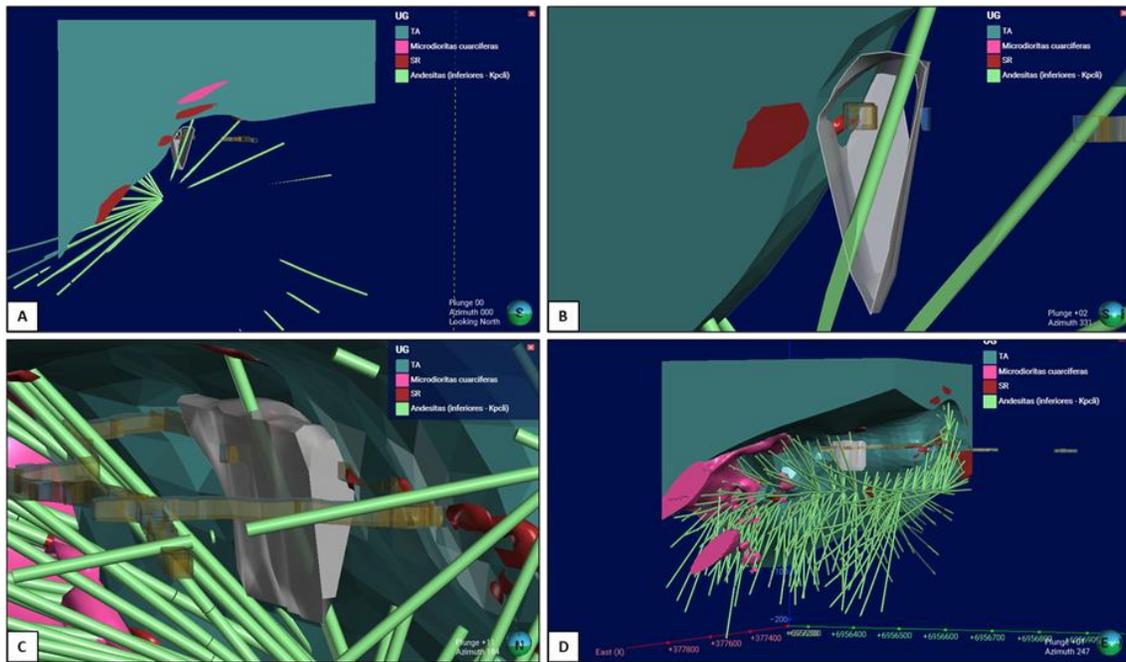


Figura 39: Se muestra la construcción del sólido de la unidad Tobas de Agustina, en A y B se puede ver el corte que se hizo para observar de mejor manera la intersección del caserón con la unidad. En C y D se puede ver el sólido de distintas distancias y los sondajes correspondientes. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

En las Andesitas inferiores, se realizó un ajuste en el contacto con los Sedimentos Rojos. En la figura 40, se puede observar el resultado de los sólidos modificados de estas dos unidades, en conjunto con Microdiorita Cuarcífera. Esta última unidad, como se mencionó anteriormente, no está presente dentro del caserón. Sin embargo, existen sondajes con esta información dentro de los límites del modelo, por esta razón se debe modelar.

Finalmente, el resultado del *boundary* del modelo geológico a corto plazo, no presenta diferencias notorias con el modelo geológico a largo plazo. Se puede ver en la figura 41, al compararla con la figura 27, que no hay diferencias en el contacto litológico (en el exterior del modelo).

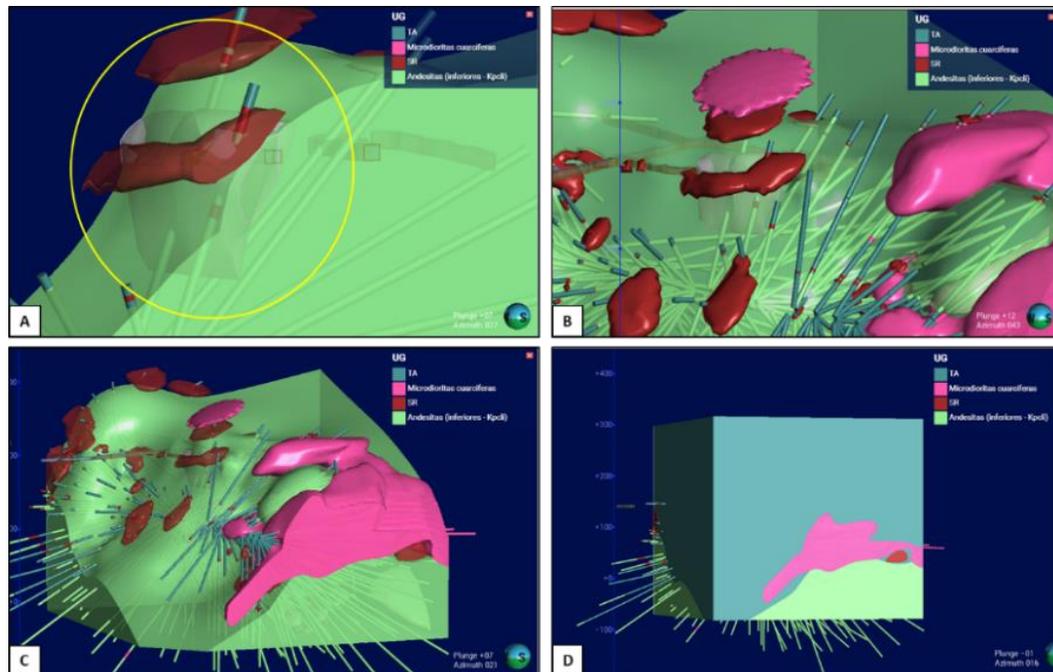


Figura 40: Se muestra en A, el caserón rodeado de Andesitas inferiores y el contacto junto a los Sedimentos Rojos, el cual se encuentra encerrado en un círculo amarillo. En B y C se ve una vista más alejada donde se puede apreciar el sólido de la Microdiorita Cuarcífera. En D se puede ver el resultado final del modelo geológico a corto plazo. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

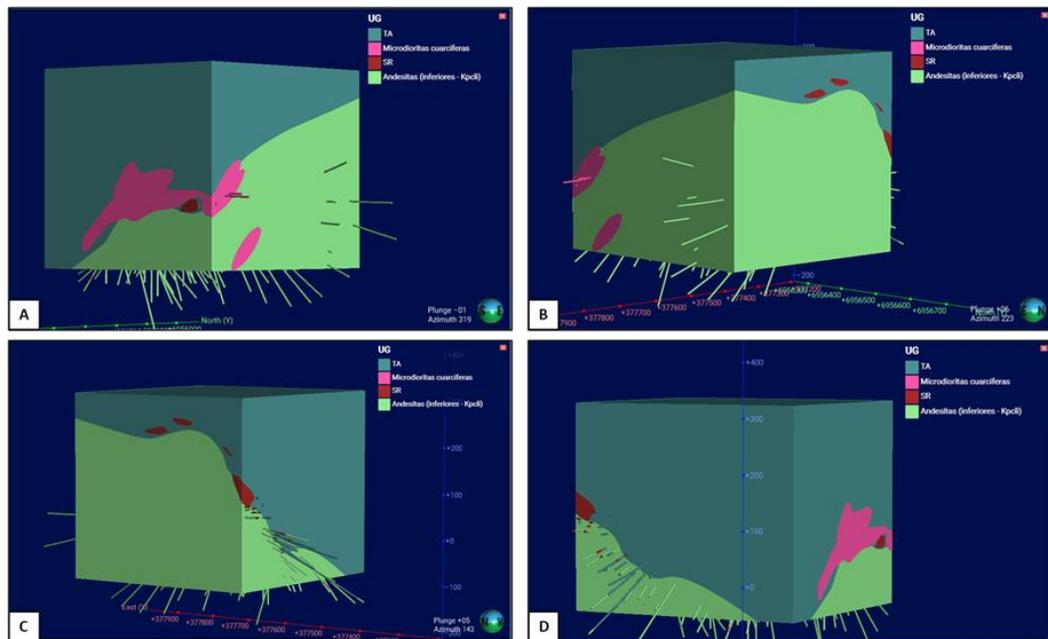


Figura 41: Se muestran distintas vistas del boundary del modelo geológico a corto plazo. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

#### 4.4.2. Modelo geológico a corto plazo del nivel 70, caserón 9T

En la figura 42, encerrado en un círculo amarillo, se puede ver la creación del sólido de la unidad Sedimentos Rojos, con sus respectivos ajustes del mapeo realizado en interior mina, ver figura 42A y 42B.

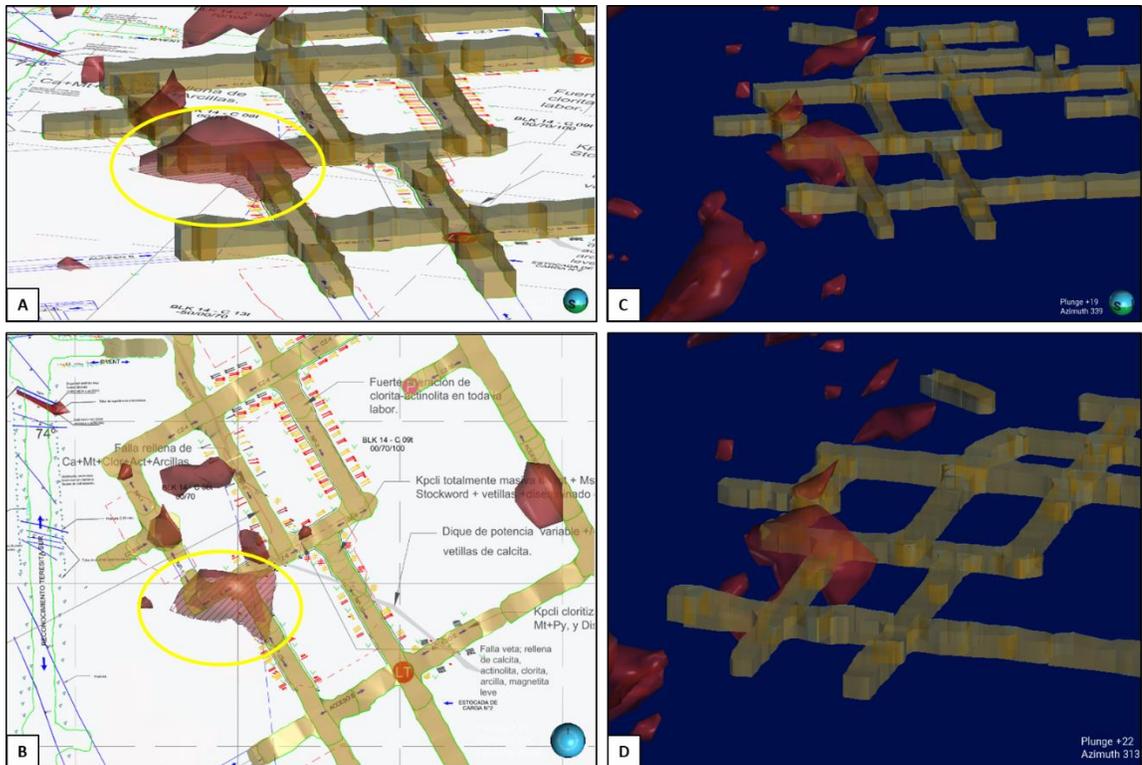


Figura 42: Se muestra en A y B, el ajuste realizado de los Sedimentos Rojos, a través del mapa utilizado en el mapeo de interior mina, digitalizado en AutoCAD, el cual se encuentra encerrado en un círculo amarillo. En C y D, se ve la labor de color café y con el sólido intersectando.

En la figura 43, encerrado en un círculo amarillo, se puede observar de mejor forma la intersección de los Sedimentos Rojos con el caserón de color gris y la labor de color café.

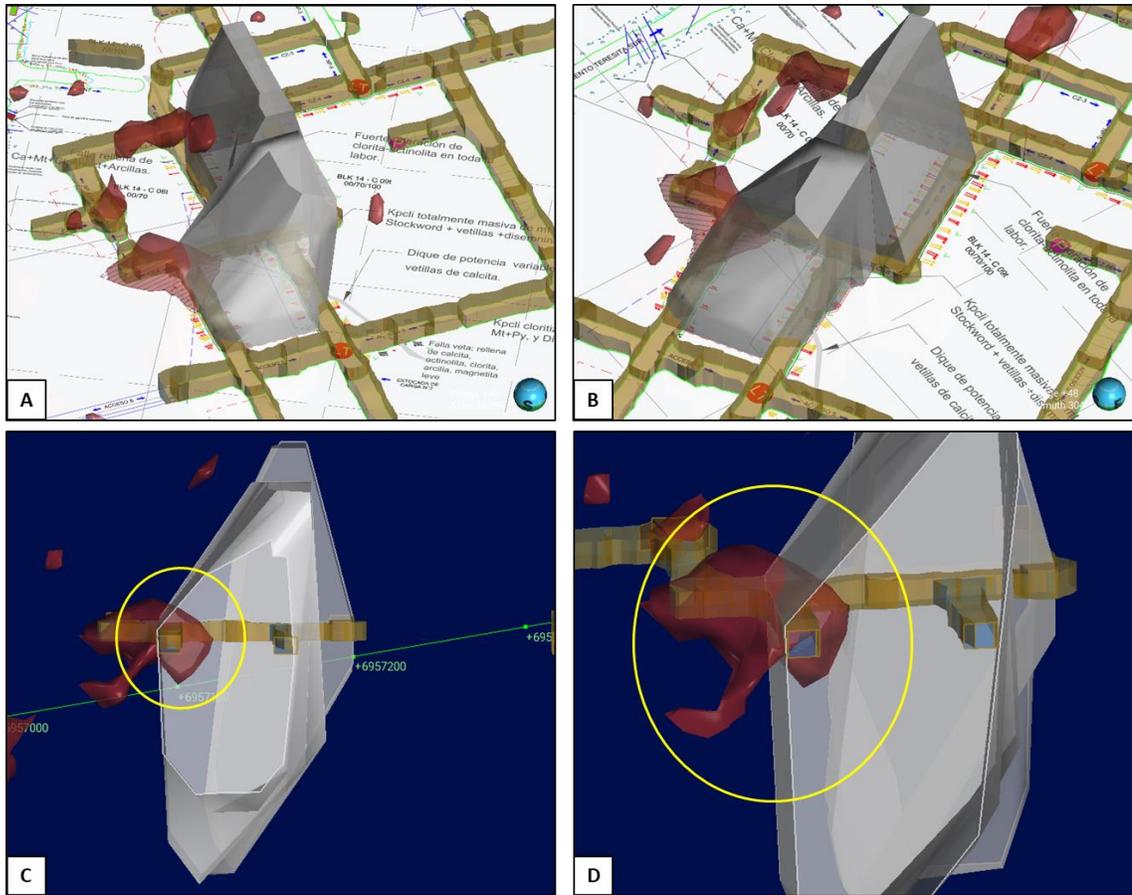


Figura 43: Se muestra en A y B, el ajuste del sólido de los Sedimentos Rojos, junto al mapa de interior mina digitalizado. En C y D se ve un corte realizado al modelo para observar la intersección con la labor, el cual se encuentra encerrado en un círculo amarillo.

Las Tobas de Agustina (ver figura 44), al modelarse como una superficie desplazada de las Andesitas inferiores; si se realizan ajustes en cualquiera de las dos unidades, automáticamente se modifica la otra. En las Andesitas inferiores se realizó un pequeño ajuste en base a la presencia de los Sedimentos Rojos.

La Microdiorita Cuarcífera (ver figura 45), no tuvo modificación en el modelo de corto plazo. Sin embargo, se encuentra como dos diques en las labores NP-3S, CZ-6 y Np-2 (ver figura 16). Estas estructuras no se pueden modelar ya que el software no lo permite, debido a su reducido tamaño dentro del *boundary*, por esta razón no se realizó ninguna modificación.

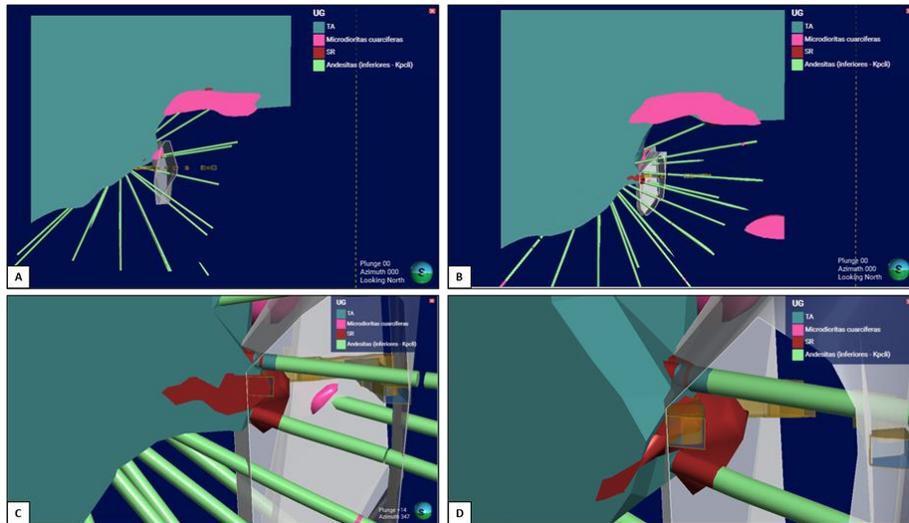


Figura 44: Se muestra la creación del sólido de la unidad Tobas de Agustina de color calipso, también se observa la intersección con el caserón de color gris, la labor de color café y el contacto con la unidad Sedimentos Rojos. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

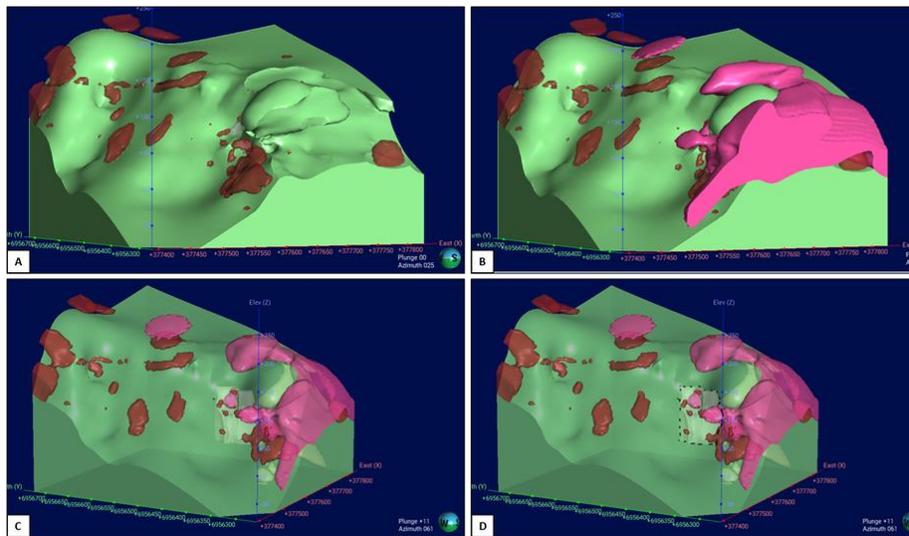


Figura 45: Se muestra la creación de las Andesitas inferiores de color verde claro, también es posible observar el contacto con la unidad Sedimentos Rojos y la Microdiorita Cuarzifera de color rosado.

Este modelo final se puede observar en la figura 41, debido a que comparten el mismo *boundary* por la proximidad de los caserones.

#### **4.4.3. Modelo geológico a corto plazo del nivel 36, caserón 51A-E1**

Para realizar este modelo, además de la información obtenida a través del mapeo de interior mina, se incorporó la información de los siete sondajes de producción realizados en el caserón.

Se hicieron ajustes a la unidad de Sedimentos Rojos, modificando los contactos y los sólidos. En la figura 46, encerrado en un círculo amarillos, son visibles los resultados del modelamiento esta unidad. También se puede ver el mapa de interior mina, en conjunto con la intersección del caserón y la labor (figura 46A y 46B).

Las Tobas de Agustina se ajustaron a medida que se fueron modificando las Andesitas inferiores. Se pueden ver los resultados de los sólidos en las figuras 47 y 48. Se observa el drástico cambio en el techo del caserón, donde aumento la cantidad de Sedimentos Rojos y Tobas de Agustina, disminuyendo las Andesitas inferiores.

A la Andesita Inferior se le realizó un pequeño ajuste en el contacto con el Sedimento Rojo. Es posible observar en la figura 48, el resultado final de la construcción del sólido de esta unidad y también se puede ver el modelo de corto plazo final del nivel 36, caserón 3T.

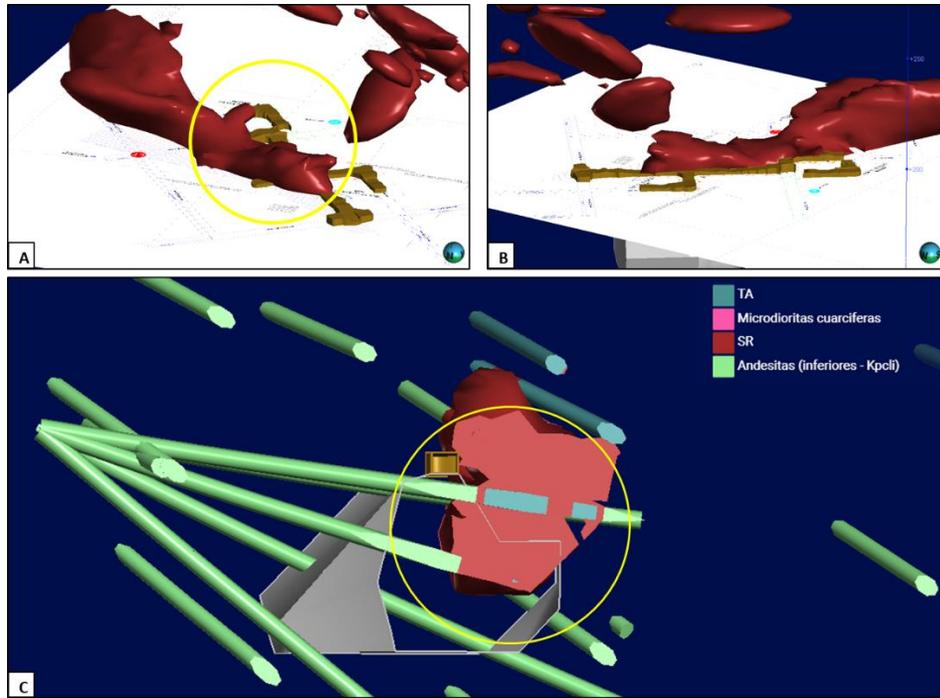


Figura 46: Se muestra en A (encerrado en un círculo amarillo) y B, el sólido de la unidad Sedimentos Rojos, construido a través al mapa de interior mina. En C se muestra un corte donde se puede ver como el Sedimento Rojo interseca el caserón y la labor encerrado en un círculo amarillo. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

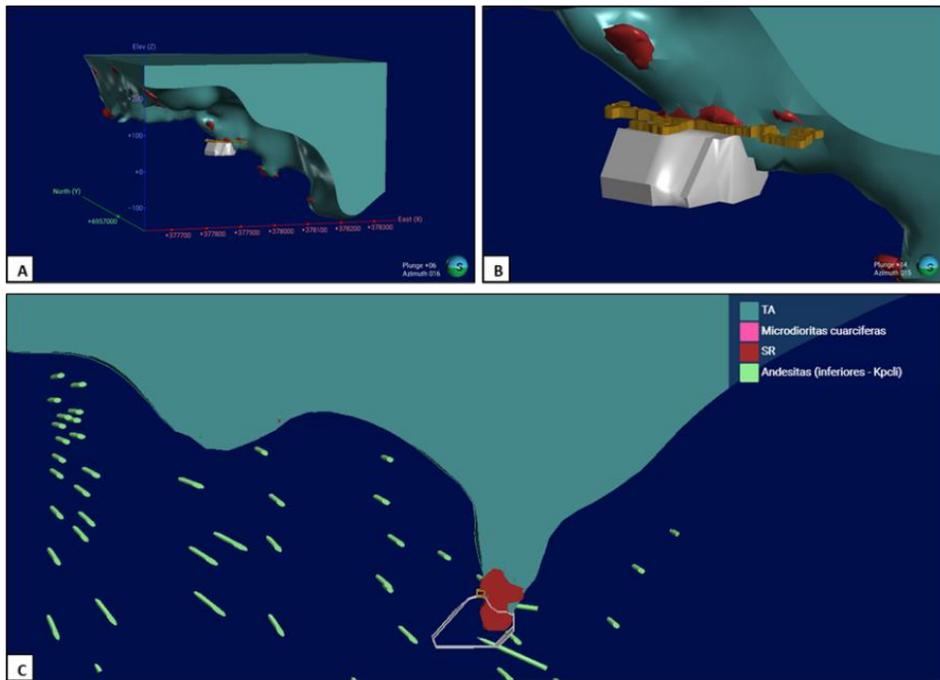


Figura 47: Se muestra en A, B y C, el resultado final del sólido construido de la unidad Tobas de Agustina (TA), de color calipso. También se puede ver el contacto que existe con los Sedimentos Rojos (SR). En C, se ve el considerable cambio en el techo del caserón, donde aumento drásticamente la cantidad de Sedimentos Rojos.

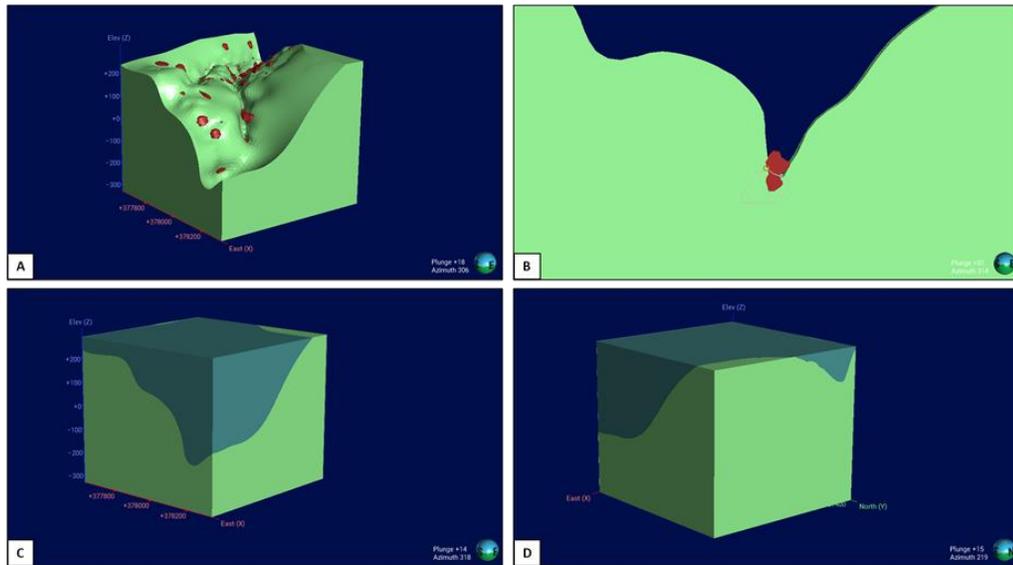


Figura 48: En A y B, se muestran los sólidos creados para las Andesitas inferiores. En C y D, se muestra el resultado final del modelo geológico a corto plazo del nivel 36, caserón 51A-E1.

#### 4.5. Comparación del Modelo Geológico de Largo Plazo versus el Modelo Geológico de Corto Plazo

Se presentan los resultados de la comparación de los modelos geológicos de largo plazo versus corto plazo. En el caso de los modelos geológicos de los niveles 150 y 70 se hicieron en conjunto ya que comparten el mismo *boundary*, por lo tanto, son parte del mismo modelo.

El caserón 3T del nivel 150, no presentó un mayor cambio litológico, si bien en el mapeo de interior mina se encontró Sedimentos Rojos en la labor, donde no había de acuerdo al modelo de largo plazo. Este cambio no fue significativamente relevante, como para llegar a modificar el caserón (ver figura 49).

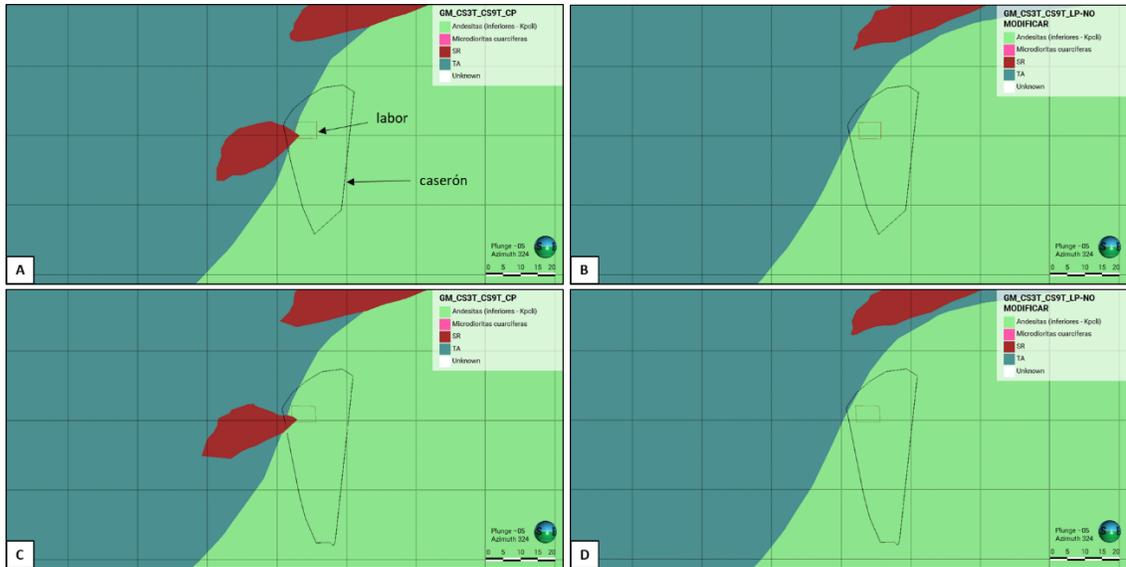


Figura 49: Se muestra la comparación del modelo geológico de largo plazo versus el corto plazo, del caserón 3T en el nivel 150. En A y C se muestra el corto plazo, en B y D se muestra el largo plazo. El caserón se ve como una línea negra ubicada entre los contactos litológicos, se indica con una flecha en A. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

En el caso del caserón 9T del nivel 70, al igual que el caserón anteriormente descrito, no presentó ningún cambio relevante, aun cuando se realizaron ajustes de la unidad Sedimentos Rojos, de acuerdo a lo mapeado en interior mina. Este cambio no fue significativo en el tamaño del sólido que se encuentra en el nivel 70. Por lo que tampoco fue necesario modificar el caserón (ver figura 50).

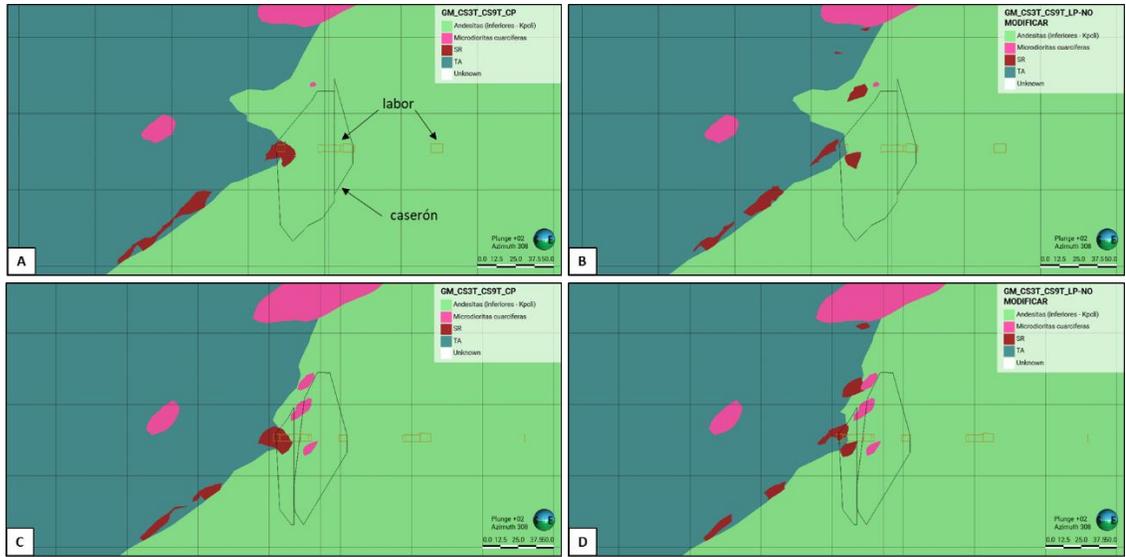


Figura 50: En A y C se puede ver el modelo geológico de corto plazo, en B y D se muestra el modelo geológico a largo plazo. El caserón se ve como una línea negra ubicada entre los contactos litológicos, señalada con una flecha de color negro en A. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

En cuanto a los volúmenes de los sólidos creados, hubo una gran diferencia en los Sedimentos Rojos. Sin embargo, al no estar presente esta desigualdad dentro del caserón, no fue de gran importancia para la extracción.

En la tabla 16, se puede observar las diferencias de los volúmenes, de los sólidos creados en el modelo geológico de corto plazo versus largo plazo. Los números positivos, indican un mayor volumen de los sólidos en el modelo geológico de corto plazo, y los números negativos, indican un menor volumen de ellos. De acuerdo a esto, se ve un aumento de los volúmenes de las Andesitas inferiores y Tobas de Agustina. En las unidades de Sedimentos Rojos y Microdiorita Cuarcifera, se observa una disminución de sus volúmenes, en el modelo geológico de corto plazo. Siendo considerable la disminución de los Sedimentos Rojos, aproximadamente de un 62%.

Tabla 16: Volúmenes del boundary del caserón 3T y 9T, correspondiente a sus respectivas litologías. También se ve la diferencia y variación porcentual entre los volúmenes de los sólidos creados.

<b>Cas 3t/9t</b>					
	Litología	Corto plazo (m³)	Largo plazo (m³)	Corto plazo- Largo plazo (m³)	Variación porcentual (%)
Volumen	Andesita Inferior	40.964.000	40.721.000	243.000	0,60
	Toba Agustina	38.944.000	38.741.000	203.000	0,52
	Sedimento Rojo	261.920	702.860	-440.940	-62,74
	Microdiorita	2.233.700	2.238.200	-4.500	-0,20

En cuanto a los recursos de los caserones 3T y 9T, al no existir un cambio significativo en los contactos dentro de estos, el modelo de bloque proporcionado por la Superintendencia de Geología de SCM Carola, no se generó para cada modelo, solamente hizo modelo de bloque en el modelo de largo plazo. En las tablas 17 y 18 se indica el tonelaje de recursos medidos, indicados e inferidos del caserón 3T y 9T, respectivamente.

Tabla 17: Recursos del caserón 3T, información proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola.

<b>Cas 3t</b>		
Ton	Recursos Medidos	125,102
	Recursos Indicados	35.900,11
	Recursos Totales	36.025,21

Tabla 18: Recursos del caserón 9T, información proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola.

<b>Cas 9t</b>			
		Etapa 1	Etapa 2
Ton	Recursos Medidos	287,128	307.484,11
	Recursos Indicados	3.296,11	178,109
	Recursos Totales	3.583,24	307.662,22

El modelo numérico en las Andesitas inferiores, proporcionado por la Superintendencia de Geología de SCM Carola, no arrojo mayores diferencias en cuanto al volumen de las leyes, las cuales se pueden ver en la tabla 19. Sin embargo, al calcular la diferencia entre el modelo geológico de corto plazo versus largo plazo, arrojo diferencias con valores negativos, indicando un menor volumen en el corto plazo y los números positivos, indican

un mayor volumen. De acuerdo a lo anterior, se observa un aumento en los volúmenes de leyes <0.15 y entre 0.15-0.3, disminuyendo el volumen entre las leyes 0.3-0.8, 0.8-1.3 y >1.3. En la figura 51 se muestra una comparación visual del modelo numérico.

Tabla 19: Se muestra la comparación de los volúmenes de las Andesitas inferiores del Modelo Numérico Largo Plazo versus Corto Plazo, También se calcula la diferencia y la variación porcentual.

Andesita CAS 3T/9T				
	Largo Plazo (m <sup>3</sup> )	Corto Plazo (m <sup>3</sup> )	Corto plazo - Largo plazo (m <sup>3</sup> )	Variación porcentual (%)
Leyes	Volumen			
<0.15	24.765.000	24.915.000	150.000	0,61
0.15-0.3	8.940.900	8.978.500	37.600	0,42
0.3-0.8	5.952.200	5.681.100	-271.100	-4,55
0.8-1.3	841.860	772.720	-69.140	-8,21
>1.3	221.380	220.180	-1.200	-0,54

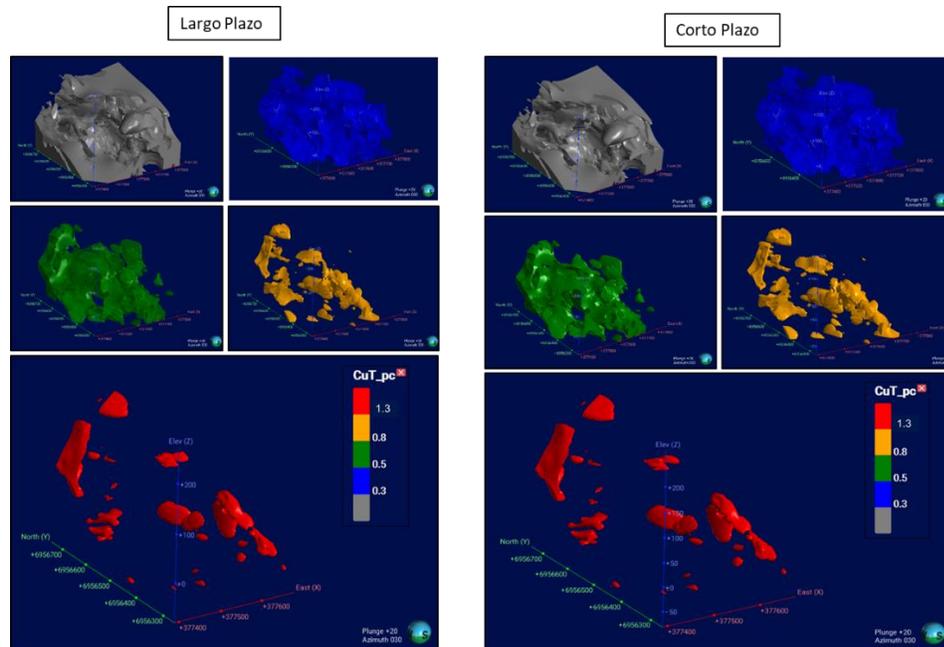


Figura 51: Imagen que muestra el Modelo Numérico de acuerdo a sus respectivas leyes, realizado en la unidad geológica Andesitas inferiores del Modelo Geológico de largo plazo y corto plazo.

En el nivel 36, caserón 51A-E1, se puede ver una notoria diferencia de los Sedimentos Rojos en el techo del caserón, lo cual sí es importante considerar ya que en el modelo de largo plazo, se ve el caserón con menor cantidad de sedimento rojo y mayormente rodeado de la unidad Andesitas inferiores. Sin embargo, después de realizar el mapeo de interior mina y encontrar la unidad de Sedimentos Rojos, se decidió generar sondajes de producción, los cuales fueron de gran importancia al momento de realizar el modelo geológico de corto plazo. Estos cambios son visibles en la figura 52A y 52B.



Figura 52: En A y C, se muestra el modelo geológico a corto plazo, en B y D se ve el modelo geológico a largo plazo. El caserón se ve como una línea negra entre los contactos litológicos, siendo señalada con una flecha en A. En la leyenda TA (Tobas de Agustina) y SR (Sedimentos Rojos).

En el modelo geológico de corto plazo versus el de largo plazo, no hubo un cambio significativo de los volúmenes de los sólidos, sin embargo, la diferencia más importante que hubo en este nivel fue en el contacto litológico que hay entre los Sedimentos Rojos, Tobas de Agustina con las Andesitas inferiores. Su grado de importancia está directamente vinculada con el caserón, pues al existir mayor cantidad de Sedimentos Rojos y Tobas de Agustina, ocurrirá una dilución de la ley, lo cual afecta la producción.

En la tabla 20, se puede observar con mayor detalle la diferencia de los volúmenes de los sólidos, que hubo entre ambos modelos. Indicando con valores negativos, una disminución

del volumen del sólido en el modelo de corto plazo, y los valores positivos indican un aumento de estos. De acuerdo a esto, se ve un aumento en la litología de Andesitas inferiores y una disminución en los Sedimentos Rojos y Tobas de Agustina, en el modelo geológico de corto plazo.

Tabla 20: Volúmenes de los sólidos creados en el caserón 51A-E1, con sus respectivas litologías y modelo geológico. También se calcula su diferencia y variación porcentual.

Cas 51A-E1					
	Litología	Corto plazo (m³)	Largo plazo (m³)	Corto plazo - Largo plazo (m³)	Variación porcentual (%)
Volumen	Andesita Inferior	245.980.000	244.220.000	1.760.000	0,72
	Toba Agustina	71.549.000	73.295.000	-1.746.000	-2,38
	Sedimento Rojo	376.380	392.460	-16.080	-4,10

En cuanto a los recursos presentes en este caserón, sí hubo cambios debido a la modificación del modelo geológico largo plazo versus corto plazo, los cuales fueron proporcionados por la Superintendencia de geología de SCM Carola, siendo visibles en la tabla 21.

Tabla 21: Recursos medidos, indicados e inferidos y ley del caserón 51A-E1.

Cas 51A-E1				
	Corto plazo		Largo plazo	
	Tonelaje	Ley % Cu	Tonelaje	Ley % Cu
Recursos Medidos	631,36	1,18	512,95	1,3
Recursos Indicados	155,65	1,06	256,43	1,43
Recursos Inferidos	8,64	0,82	26,28	1,05
Total	795,65	1,15	795,66	1,33

El modelo numérico realizado en las Andesitas inferiores, el cual fue proporcionado por la Superintendencia de Geología de SCM Carola. No se logra apreciar un cambio muy abrupto. Sin embargo, la comparación del modelo largo plazo versus corto plazo, presenta mayores cambios que el caserón 3T/9T.

En la tabla 22 se presentan las diferencias de las leyes respecto al volumen de las Andesitas inferiores y su variación porcentual del volumen respectivo de cada intervalo de ley. Los

valores negativos indican una disminución del volumen de esa ley, en el modelo geológico de corto plazo, y los valores positivos indican un aumento de estos. Se observa un aumento en el volumen de leyes <1.5 y una disminución en las leyes de los siguientes intervalos: 0.15-0.3, 0.3-0.8, 0.8-1.3 y >1.3. En la figura 53 se muestra una comparación visual de modelo numérico.

Tabla 22: Comparación de los volúmenes de acuerdo a las leyes del Modelo Numérico realizado en la unidad litológica Andesitas inferiores, con Modelo Geológico de Largo Plazo versus Corto Plazo. También se calculó su diferencia y variación porcentual.

Andesita CAS 51A_E1				
	Largo Plazo (m <sup>3</sup> )	Corto Plazo (m <sup>3</sup> )	Corto plazo - Largo plazo (m <sup>3</sup> )	Variación porcentual (%)
Leyes	Volumen			
<0.15	199.810.000	205.800.000	5.990.000	3,00
0.15-0.3	21.372.000	19.903.000	-1.469.000	-6,87
0.3-0.8	19.245.000	17.146.000	-2.099.000	-10,91
0.8-1.3	2.631.200	2.181.100	-450.100	-17,11
>1.3	1.155.400	941.030	-214.370	-18,55

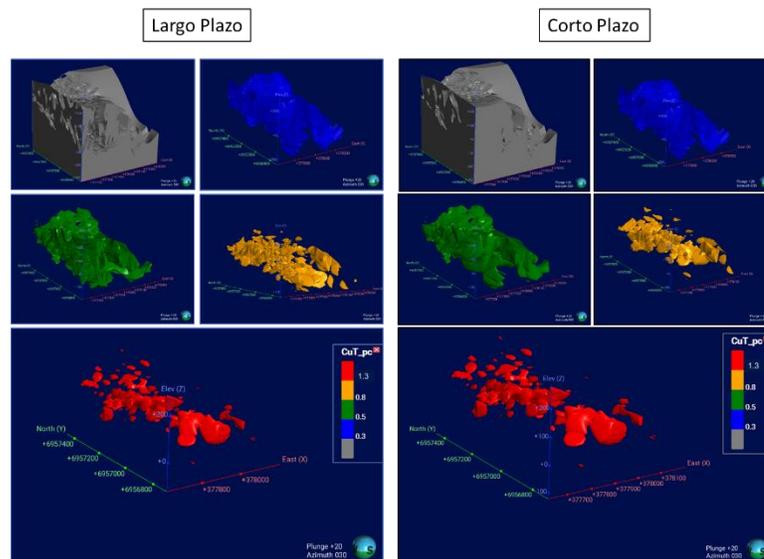


Figura 53: Imagen que muestra el Modelo Numérico a largo plazo y corto plazo, de acuerdo a sus respectivas leyes, de caserón 51A-E1

## **CAPITULO V: Discusión**

En el modelo geológico de largo plazo versus el de corto plazo del nivel 150 y 70, correspondientes al mismo *boundary*, no presentaron cambios importantes del contacto litológico, dentro del caserón estudiado. Sin embargo, sí manifiestan una diferencia significativa en la disminución del volumen del sólido de los Sedimentos Rojos. Los cuales se encuentran cercanos a las Andesitas inferiores; estas al albergarse como zona mineralizada, podría considerarse como guía de exploración al momento de proyectar la mineralización. Por lo tanto, la disminución de los Sedimentos Rojos, podría afectar la proyección de la mineralización y consecuentemente a la creación de futuros caserones.

El nivel 36 se encuentra en el techo del caserón 51A-E1. Aquí se ajustó el sólido de la unidad Sedimentos Rojos en el contacto con las Andesitas inferiores, también se realizaron sondajes de producción, para obtener una mayor información de la disposición de las unidades litológicas, lo cual redujo la incertidumbre al momento de crear los sólidos. Producto de esta información, se puede observar la gran cantidad de Sedimentos Rojos existentes dentro del caserón; por lo tanto resulta necesario reevaluar su ubicación y evaluar otro posible diseño, más beneficioso al momento de la extracción de los recursos económicos del caserón. Respecto a los volúmenes de los sólidos, estos no tuvieron cambios muy significativos, disminuyo un poco el volumen de los Sedimentos Rojos, pero no fue tan drástico como en el caso de los niveles 150 y 70.

Tomando en cuenta los antecedentes anteriores, los sondajes de producción, son necesarios para resolver dudas con la continuidad del contacto litológico. En vista de que los Sedimentos Rojos, no es la principal unidad portadora de la mineralización, el contacto entre esta unidad y las Andesitas inferiores, en la mayoría de las veces se encuentra acompañada de una fuerte mineralización. Además, los Sedimentos Rojos, presentan una mayor cantidad de diseminado fino de Cu en comparación con las Tobas de Agustina.

En los Sedimentos Rojos no se encontró ninguna estructura sedimentaria; laminaciones y estratificación cruzada. Al ser muestra de mano y no un corte transparente, no fue posible identificar los cristales de feldespato remplazado por adularia, ni tampoco los minerales de cuarzo, anhidrita, carbonato. Si se encontraron vetillas de calcitas en algunos sectores.

En las Tobas de Agustina, no se encontraron clastos de: lutitas, calizas ni sedimentos de flujo. Tal vez con corte transparente es posible identificar el origen de los clastos.

Las Andesitas inferiores no se encontraron alteraciones de sericita y biotita, si se encontró una fuerte alteración de clorita y actinolita, con una gran mineralización de magnetita.

En la figura 55 se pueden ver los 7 sondajes de producción que se realizaron desde la labor más cercana hacia el caserón 51A-E1, proporcionando la información necesaria para la creación de sólidos más certeros al momento de formar el modelo geológico de corto plazo (validación visual del modelamiento).

En la figura 56, se puede ver un plano de planta donde se encuentra el caserón dentro de la mina, para tener una mejor visualización del lugar donde se realizaron los sondajes de producción y la ubicación espacial del caserón.

En la figura 57, se puede observar el modelo de bloques realizados por la Superintendencia de Geología de SCM Carola, donde se muestra la diferencia entre el modelo geológico de largo plazo versus el modelo geológico de corto plazo, con sus respectivas leyes.

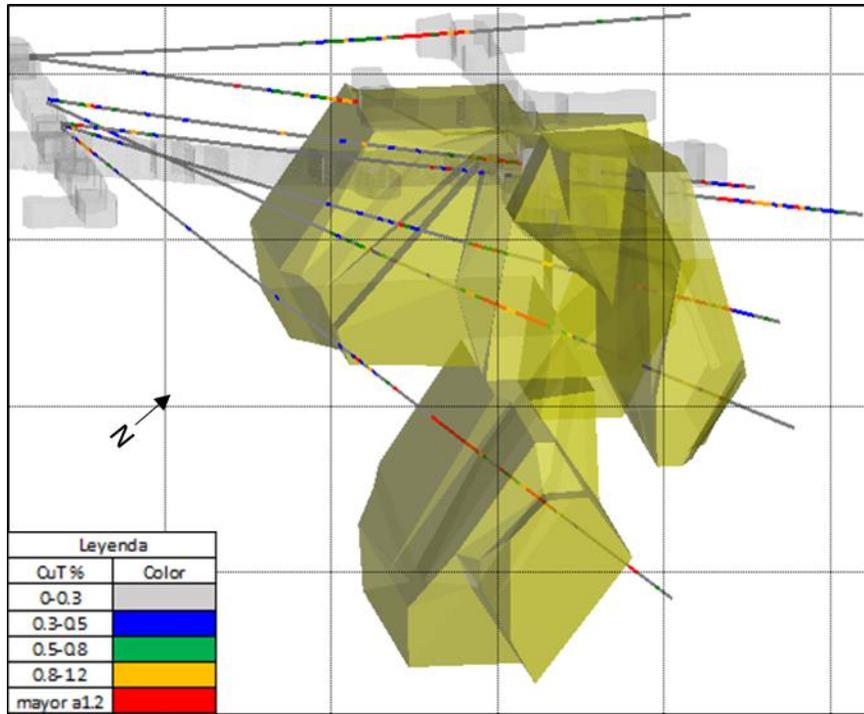


Figura 54: Se muestran los sondajes de producción y su intersección con el caserón, también se ve la leyenda de las leyes de los sondajes. De color amarillo se pueden ver el caserón 51A-E1 y en gris claro se ve la labor, con los sondajes que salen de la labor intersectando el caserón (imagen proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola).

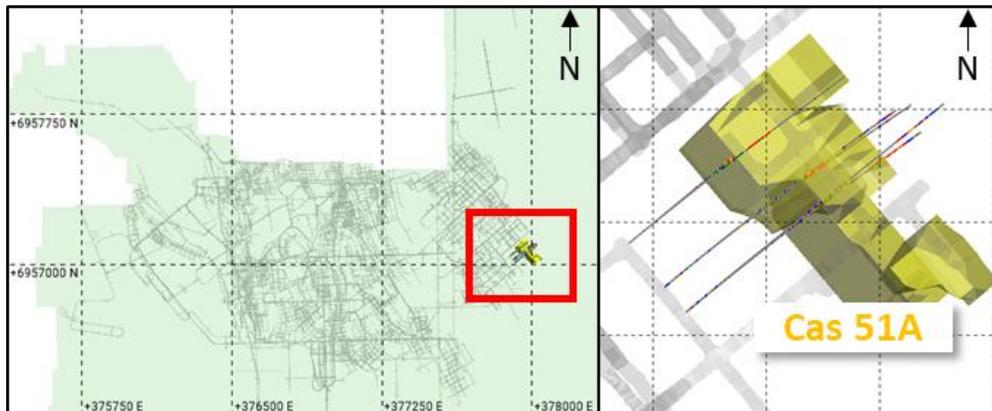


Figura 55: Se muestra la ubicación espacial del caserón 51A-E1 dentro de la mina (imagen proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola).

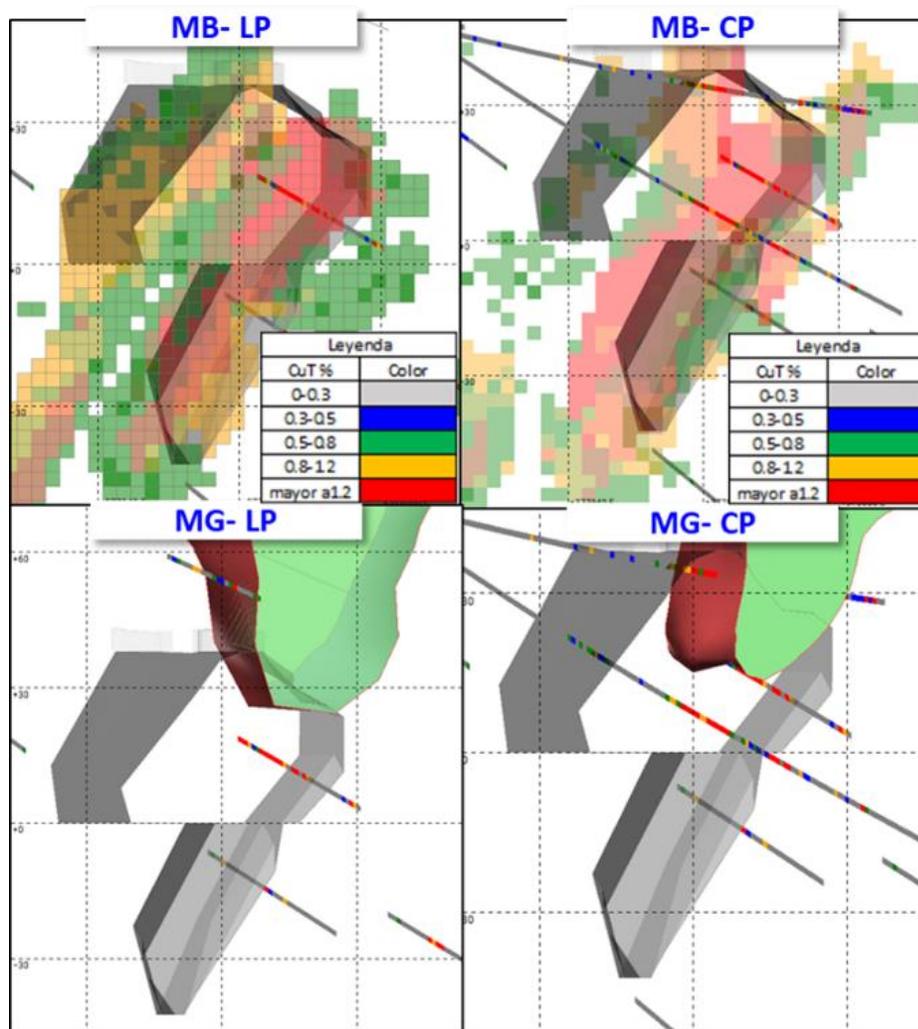


Figura 56: Se muestra la diferencia del modelo de bloque y geológico de largo plazo versus el corto plazo (imagen proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola).

En la recategorización del caserón 51A-E1 del nivel 36, muestra claramente una disminución de ley en el modelo geológico de corto plazo versus el largo plazo. Sin embargo, los recursos medidos aumentan en el modelo geológico de corto plazo, lo cual disminuye la incertidumbre de la ley. También existe una disminución de los recursos indicados e inferidos. Esto se atribuye a la realización de los sondajes de producción, estos sondajes proporcionaron la información necesaria para aumentar los recursos medidos y disminuir los recursos indicados e inferidos, también ayudaron a corroborar la existencia de los Sedimentos Rojos dentro del caserón. Por este motivo disminuyó la ley del modelo de bloque realizado en el modelo geológico de corto plazo, ya que en el modelo geológico

de largo plazo solo existían las Andesitas inferiores, lo cual aumentaba la ley. De esta forma, se elimina la sobreestimación (ver figura 58).

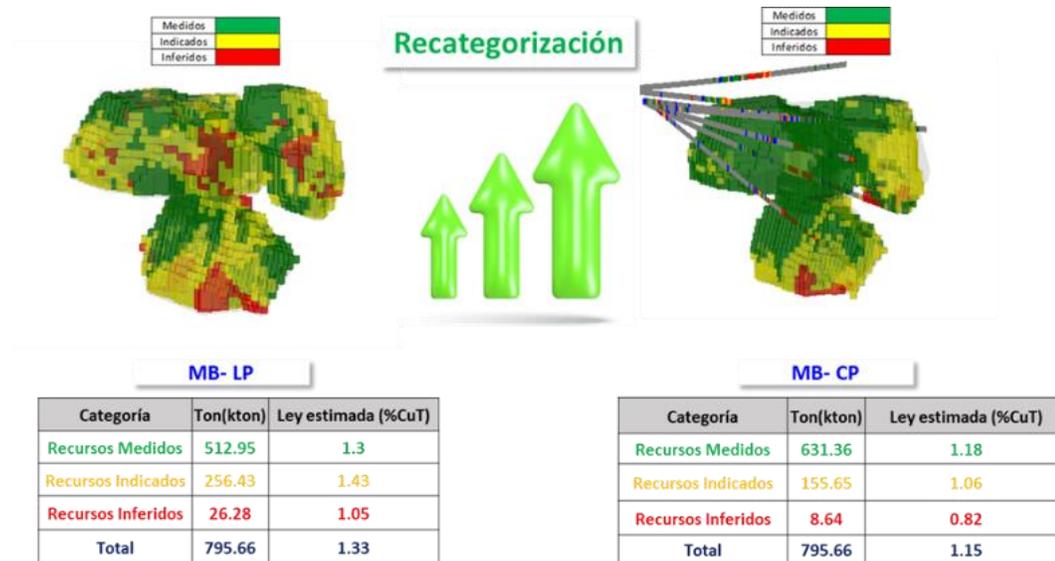


Figura 57: Se muestra el cambio del modelo de bloques de largo plazo versus corto plazo (imagen proporcionada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola).

Es posible que el caserón 3T y 9T, si se hubieran realizados sondajes de producción, podría haber generado algún cambio en la zona de contacto, lo cual podría ocasionar un rediseño del caserón. Sin embargo, al no realizarse sondajes de producción, no es posible saber con certeza esta información. El motivo por el cual no se hicieron sondajes de producción en estos caserones, fue debido a su alta información de recursos medidos, aportada por los sondajes de exploración.

Las fallas presentes en el caserón 51A-E1, no se correlacionan con las estructuras mayores de la mina. En el caserón 3T y 9T, es probable que las fallas se correlacionen con la estructura mayor Cuerpo 8. Sin embargo, no existe una continuidad de la falla en la labor, por lo que se consideró, una falla local.

Considerando la metodología empleada en el presente trabajo (ver figura 59), sería conveniente en estudios futuros, implementar cortes transparentes para obtener una mejor descripción litológica y mineralógica de las unidades presentes, también se sugiere

realizar un modelo combinado, entre el modelo geológico y el modelo numérico, así se puede comparar la variación de los intervalos de leyes, para cada unidad litológica presente, con fines comparativos y de análisis en las unidades.

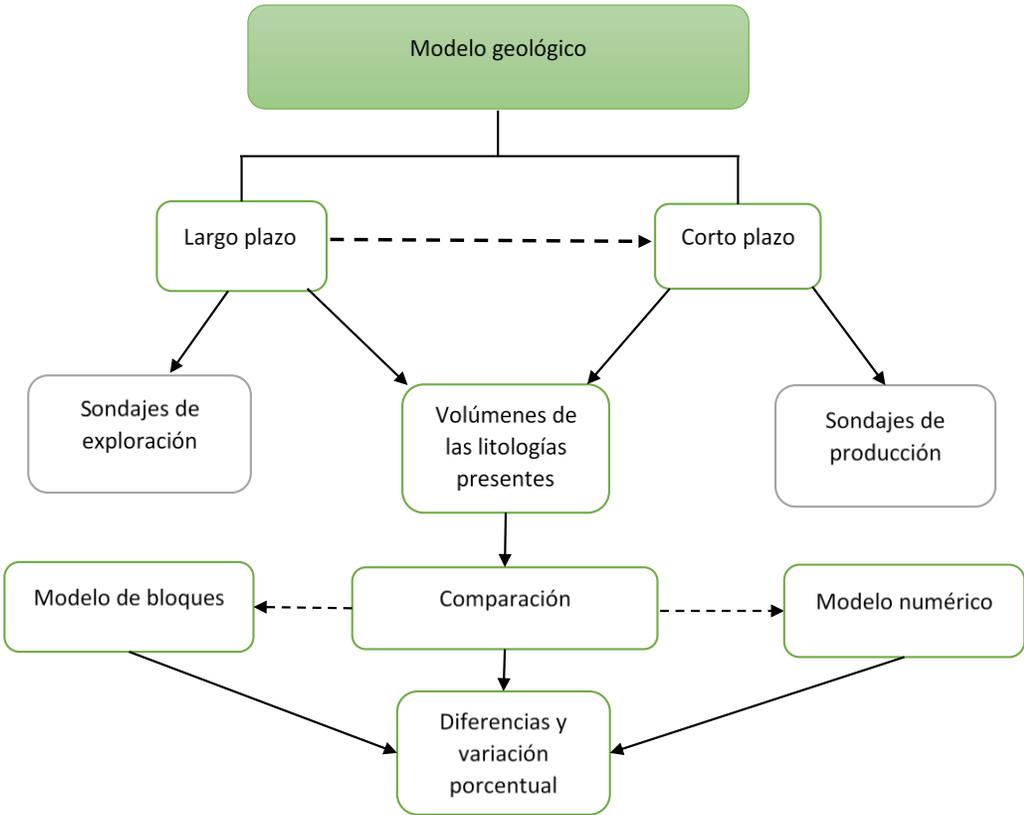


Figura 58: Se muestra un diagrama de flujo con la metodología empleada para el análisis comparativo de los modelos geológicos en el presente trabajo.

Se propone realizar la siguiente metodología para la creación de un modelo geológico de corto plazo. Esta será nombrada como Modelamiento geológico de corto plazo, visible en la figura 60.

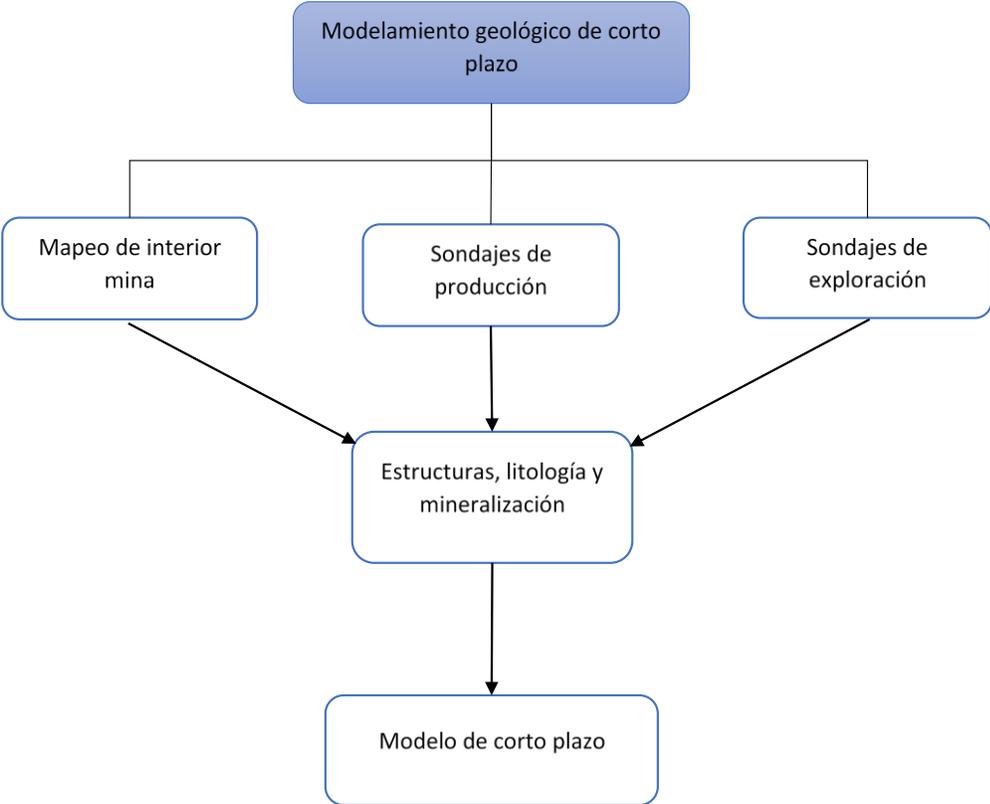


Figura 59: Se muestra un diagrama de flujo con la propuesta del Modelamiento geológico de corto plazo.

## **CAPITULO VI: Recomendaciones**

Se recomienda realizar sondajes de producción cuando el modelo geológico de largo plazo, muestre diferencias significativas (más de 10 m) en los contactos litológicos representados en el mapeo de interior mina, cuyos caserones contengan entre 700.000 y 1 millón de toneladas, de alta ley (mayor a 0.9 % de Cu total), que sostengan la producción anual de la mina. Considerando que SCM Carola debe extraer mensualmente 240.000 toneladas, con una ley de corte para realizar el modelo geológico de 0.3% de Cu total y ley de cabeza en la planta de 0.9% de Cu total.

Para la creación de sondajes de producción, se recomienda un espaciamiento de 20 m aproximadamente, con un largo mínimo de 80 m y un máximo de 150 m, estos deben realizarse de forma transversal al diseño, perpendicular al rumbo, su orientación va a depender de la estación en la que se encuentre.

Con la información de estos sondajes se debe generar un modelo geológico de corto plazo, cuya finalidad es tener una mejor definición de las unidades geológicas y certeza de los sólidos creados al momento de proyectar el caserón. Esto ayudará a tener una mejor utilización de los recursos y extracción más beneficiosa.

También se recomienda realizar estudios de cortes transparentes a las litologías presentes, con la finalidad de obtener una mejor descripción litológica y mineralógica. Investigar la posible vinculación entre los Sedimentos Rojos y el contacto con las Andesitas inferiores, que es portadora de la mineralización más fuerte, con la finalidad de determinar si los Sedimentos Rojos se pueden considerar como guía de exploración. Esto ayudará a obtener una mejor proyección de la zona mineralizada para la construcción de futuros caserones.

Se recomienda en el caserón 51A-E1 del nivel 36, realizar una comparación entre los modelos de bloques actuales, con el nuevo modelo de bloque del rediseño del caserón. Esto ayudará a ver con mayor claridad el impacto del modelo geológico de corto plazo, realizado en el presente trabajo.

## **CAPITULO VII: Conclusiones**

En el presente trabajo se puede concluir que los modelos geológicos de largo plazo son eficientes cuando existe una malla de sondajes, que permita generar un elevado valor en recursos medidos, como es el caso de los caserones 3T y 9T. De lo contrario, si existen cambios considerables en la litología al momento de mapear labores subterráneas, se debe realizar sondajes de producción, para generar un buen modelo geológico de corto plazo, siendo el caso del caserón 51A-E1. Si no hay sondajes de producción, el ajuste del modelo geológico de corto plazo, con lo mapeado en interior mina, no tendrá un cambio muy significativo y esto no ayudará a generar un modelo representativo del sector de interés.

Respecto a las estructuras mapeadas en las labores ingresadas de los niveles, 150 caserón 3T, 70 caserón 9T y 36 caserón 51A-E1, estas estructuras no son modelables debido a presentarse de forma local, y no tener proyección en las unidades representadas en el modelo geológico. Sin embargo, es probable que las fallas del caserón 3T y 9T, estén correlacionadas con la estructura mayor Cuerpo 8, pero al no tener continuidad se consideró una falla local.

Para generar una comparación de modelos geológicos de largo plazo, versus corto plazo, es necesario que los *boundary* (límites del modelo) sean los mismos, así se puede comparar los volúmenes de los sólidos de las unidades geológicas, identificando la disminución o aumento de cada una. En los caserones 3T y 9T se observó una gran disminución de los Sedimentos Rojos; un 62% menos en el modelo de corto plazo. Esto puede influir en la proyección de la zona mineralizada para la construcción de futuros caserones.

Siempre es importante tener la información lito-estructural de interior mina, debido a esta información es posible ver si el contacto litológico del modelo de largo plazo va bien proyectado o necesita un reajuste.

El cambio litológico del mapeo interior mina, es importante cuando se presente entre las Andesitas inferiores; unidad que alberga la mineralización, con cualquier unidad geológica, de lo contrario, si el cambio litológico es entre las Tobas de Agustina y los Sedimentos Rojo, no es relevante para la producción de la mina.

## Referencias bibliográficas

- Amilibia, A., Sàbat, F., McClay, K. R., Muñoz, J. A., Roca, E., & Chong, G. (2008). The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology*, 30(12), 1520-1539.
- Arabasz, W., 1971. Geological and geophysical studies of the Atacama fault zone in northern Chile: Unpublished. PhD. thesis. California Institute of Technology, Pasadena, USA.
- Arévalo, C., Grocott, J., Welkner, D., 2003. The Atacama fault system in the Huasco province, southern Atacama desert, Chile. X Congreso Geológico Chileno, Concepción Chile Extended Abstract.
- Arévalo, C., Grocott, J., Martin, W., Pringle, M., Taylor, G., 2006. Structural setting of the Candelaria Fe-oxide Cu-Au deposit, Chilean Andes (27° 30' S). *Econ. Geol.* 101, 819–841.
- Atherton, M.P., Aguirre, L., 1992. Thermal and geotectonic setting of Cretaceous volcanic rocks near Ica, Peru, in relation to Andean crustal thinning. *J. S. Am. Earth Sci.* 5, 47–69.
- Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., and Palma, G., 2017, Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach: *Ore Geology Reviews*, v. 81, p. 62–78.
- Beane, R. E., & Titley, S. R. (1981). Part I. Geologic Settings, Petrology, and Tectogenesis.
- Beane, R. E. y Bodnar, R. J. (1995) Hydrothermal fluids and hydrothermal alterations in porphyry copper deposits. In: *Porphyry Copper Deposits of the American Cordillera*. Arizona Geol. Soc. Digest. Vol. 20, p. 83-93.
- Brown, M., Diaz, F., Grocott, J., 1993. Displacement History of the Atacama Fault System 25° 00' S–27° 00' S, Northern Chile. *Geological Society of America*, pp. 1165–1174.
- Cembrano, J., Garrido, A., Marquardt, M., 2009. Tectonic Setting of IOCG Deposits in the Central Andes: Strike-Slip-Dominated Deformation. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, Chile Extended Abstract.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile: the geology of Chile. *The Geological Society of London*, London, pp. 21–114.
- Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C., Ramos, V., 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth-Sci. Rev.* 18, 303–332.

- Corbett, G. J. y Leach, T. M. (1998). Controls on hydrothermal alteration and mineralization. Society of Economic Geologists, Special Publication. no. 6, p. 69-82.
- Corriveau, L., Montreuil, J.-F., and Potter, E.G., 2016, Alteration facies linkages among iron oxide copper-gold, iron oxide-apatite, and affiliated deposits in the Great Bear Magmatic zone, Northwest Territories, Canada: *Economic Geology*, v. 111, p. 2045–2072.
- Dallmeyer, R.D., Brown, M., Grocott, J., Taylor, G.K., Treloar, P.J., 1996. Mesozoic magmatic and tectonic events within the Andean Plate Boundary Zone, 26°–27° 30' S, North Chile: constraints from <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar mineral ages. *J. Geol.* 104, 19–40.
- Dalziel, I. W. D., Grunow, A. M., Storey, B. C., Garrett, S. W., Herrod, L. D. B., & Pankhurst, R. J. (1987). Extensional tectonics and the fragmentation of Gondwanaland. Geological Society, London, Special Publications, 28(1), 433-441.
- Dalziel, I.W.D., Brown, R.L., 1987. Andean Core Complex Evolution Related to Marginal Basin Collapse; Implications for Cordilleran Tectonics. Geological Society of America, pp. 634 Annual Meeting and Exposition, extended abstract.
- Del Real, I., Thompson, J. F., & Carriedo, J. (2018). Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. *Ore Geology Reviews*, 102, 106-153.
- Espinoza, S., 1990. The Atacama-Coquimbo Ferriferous Belt, Northern Chile: stratabound ore deposits in the Andes. Springer, Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 353–364.
- Espinoza, S.R., Veliz, H.G., Squirrel, J.L., Arias, J.F., and Moraga, A.B., 1996, The cupriferous province of the Coastal Range, northern Chile: Society of Economic Geologists Special Publication 5, p. 19–32.
- Grocott, J., Brown, M., Dallmeyer, R.D., Taylor, G.K., Treloar, P.J., 1994. Mechanisms of continental growth in extensional arcs: an example from the Andean plate-boundary zone. *Geology* 22, 391–394.
- Grocott, J., Taylor, G.K., 2002. Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, north Chilean Andes (25 30' S to 27 00' S). *J. Geol. Soc. London* 159, 425–443.
- Knipping, J.L., Bilenker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A.P., Wälle, M., Heinrich, C.A., Holtz, F., and Munizaga, R., 2015, Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 171, p. 15–38.
- Lowell, J. D., & Guilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper ore deposits. *Economic Geology*, Vol. 65, p. 373-408.

- Marinovic, S.N., Smoje, T.I., Maksaev, J.V., Hervé, A.M., Mpodozis, M.C., 1995. Hoja aguas blancas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Región de Antofagasta.
- Marquardt, M., Cembrano, J., Siña, A., Garrido. 2009. IOCG-type Deposits in North- Central Chile: A Case Study and Implications for Exploration. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, Chile.
- Marschik, R., & Fontboté, L. (2001a). The Punta del Cobre Formation, Punta del Cobre-Candelaria area, northern Chile: *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 14, 401–433.
- Marschik, R., & Fontboté, L. (2001b). The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) deposits, Chile. *Economic Geology*, 96(8), p. 1799-1826.
- Martínez, F., Arriagada, C., Mpodozis, C., Peña, M., 2012. The Lautaro Basin: a record of inversion tectonics in northern Chile. *Andean Geol.* 39 (2), 258–278.
- Morata, D., Aguirre, L., 2003. Extensional Lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29° 20'–30° S), Chile: geochemistry and petrogenesis. *J. S. Am. Earth Sci.* 16, 459–476.
- Naranjo, J.A., 1987. Interpretación de la actividad cenozoica superior a lo largo de la Zona de Falla Atacama, Norte de Chile. *Andean Geol.* 31, 43–55.
- Oliveros, V., Vásquez, P., Creixell, C., Lucassen, F., Ducea, M. N., Ciocca, I., González, J., Espinoza, M., Salazar, E., Coloma, F., & Kasemann, S. A., 2020. Lithospheric evolution of the Pre-and Early Andean convergent margin, Chile. *Gondwana Research*, 80, 202-227.
- Ootes, L., Snyder, D., Davis, W.J., Acosta-Góngora, P., Corriveau, L., Mumin, A.H., Gleeson, S.A., Samson, I.M., Montreuil, J.F., Potter, E., and Jackson, V.A., 2017, A Paleoproterozoic Andean-type iron oxide copper-gold environment, the Great Bear magmatic zone, northwest Canada: *Ore Geology Reviews*, v. 81, p. 123–139.
- Ramos, V.A. 2009. Anatomy and global context of the Andes: Main geologic features and the Andean orogenic cycle. En: Kay, S.M. *et al.* (Eds.), *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*. Geological Society of América Memoir 204: 31-65.
- Reich, M., Simon, A., Deditius, A., Barra, F., and Chryssoulis, S., 2016, Trace element signature of pyrite from the Los Colorados iron oxide-apatite (IOA) deposit, Chile: A missing link between Andean IOA and iron oxide copper-gold: *Economic Geology*, v. 11, p. 743–761.
- Requia, K., Stein, H., Fontboté, L., & Chiaradia, M. (2003). Re–Os and Pb–Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper–gold deposit, Carajás mineral province, northern Brazil. *Mineralium Deposita*, 38, 727-738.

- Riquelme, R., Martinod, J., Hérail, G., Darrozes, J., & Charrier, R. (2003). A geomorphological approach to determining the Neogene to Recent tectonic deformation in the Coastal Cordillera of northern Chile (Atacama). *Tectonophysics*, 361(3-4), 255-275.
- Rose, A. W. (1970). Zonal relations of wallrock alteration and sulfide distribution at porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 65(8), 920-936.
- Royden, L. H. (1993). Evolution of retreating subduction boundaries formed during continental collision. *Tectonics*, 12(3), 629-638.
- Scheuber, E., Bogdanic, T., Jensen, A., & Reutter, K. J. (1994). Tectonic development of the north Chilean Andes in relation to plate convergence and magmatism since the Jurassic. In *Tectonics of the southern Central Andes: structure and evolution of an active continental margin* (pp. 121-139). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Scheuber, E., Hammerschmidt, K., Friedrichsen, H., 1995. 40 Ar/39 Ar and Rb-Sr analyses from ductile shear zones from the Atacama Fault Zone, northern Chile: the age of deformation. *Tectonophysics* 250, 61–87.
- Scheuber, E., Gonzalez, G., 1999. Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°–26° S): a story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics* 18, 895–910.
- Segerstrom, K.; Ruiz, C. 1962. Cuadrángulo Copiapó. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, Vol. No. 1, 115 p. , 1 mapa escala 1:50.000.
- Sillitoe, R. H. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38, 787-812.
- Stern, C.R., Mohseni, P.P., Fuenzalida, P.R., 1991. Petrochemistry and tectonic significance of Lower Cretaceous Barros Arana Formation basalts, southernmost Chilean Andes. *J. S. Am. Earth Sci.* 4, 331–342.
- Thiele, R., Pinchiera, M., 1984. Las megafallas Los Colorados-Portezuelo Tatará y La Sosita-HuanteMé, en la extensión sur de la Zona de Falla Atacama al noroeste de Vallenar: Comunicaciones Departamento de Geología. Universidad de Chile, Santiago, pp. 67–70.
- Valdman, S., 2016. Informe Geológico Evaluación de Recursos Cuerpo 1E entre estocadas 1E – 6E-1 Mina Meléndez, Volumen 1. Sociedad Contractual Mina Carola. Tierra Amarilla
- Vicente, J., 2006. Dynamic paleogeography of the Jurassic Andean Basin: pattern of regression and general considerations on main features. *Rev. Asoc. Geol. Argentina* 61, 408–437.

- Wilson, J., Grocott, J., 1999. The emplacement of the granitic Las Tazas complex, northern Chile: the relationship between local and regional strain. *J. Struct. Geol.* 21, 1513–1523.