



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ACTUALIZACIÓN DE MODELO GEOLÓGICO DEL SECTOR ADRIANA
NORTE DE SCM CAROLA, TIERRA AMARILLA, REGIÓN DE ATACAMA.**

Yeimy Fernández Leiva

Copiapó, Chile 2024



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ACTUALIZACIÓN DE MODELO GEOLÓGICO DEL SECTOR ADRIANA
NORTE DE SCM CAROLA, TIERRA AMARILLA, REGIÓN DE ATACAMA.**

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

Profesor guía: Francisco Tapia Guerra

Profesional tutor: María Montserrat Corvalán Sekul

Yeimy Fernández Leiva

Copiapó, Chile 2024

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi familia que desde siempre confiaron en mí y siempre me brindaron su comprensión, amor y apoyo incondicional. Principalmente agradezco a mis padres, por todo su esfuerzo para lograr que mi hermano y yo culmináramos nuestros estudios.

Agradezco a Sebastián, quien siempre estuvo presente para mí y demostró total confianza en mi trabajo, dándome su amor y apoyo incondicional.

Quisiera agradecer a la empresa SCM Carola por brindarme la oportunidad de realizar mi práctica profesional y mi trabajo de titulación, en especial a la Superintendencia de Geología, por darme la oportunidad de formar parte de su equipo durante este periodo y por su apoyo. Especialmente a María Montserrat Corvalán, quien fue mi tutor guía en este proceso y demostró paciencia, comprensión y compromiso, siempre dispuesta a entregar sus conocimientos y ayuda.

Quisiera extender mis agradecimientos a los geólogos de SCM Carola, quienes siempre demostraron compañerismo y disposición cuando necesité de su ayuda. Gracias por su amistad, risas, apoyo y confianza.

Finalmente, agradezco a mi profesor guía, Francisco Tapia, primero por aceptar ser parte de mi trabajo de titulación y por su compromiso y disponibilidad para cuando lo necesité. Gracias por compartir sus conocimientos y ayudarme a finalizar este proceso.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. MARCO INTRODUCTORIO	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema de investigación	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos Específicos.....	3
1.5. Ubicación y Accesos	3
1.6. Reseña histórica.....	4
1.7. Estudios previos	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Yacimiento Tipo IOCG-IOA.....	9
2.1.1. Yacimientos IOCG-IOA en Chile.....	10
2.1.2. Antecedentes metalogénicos del Distrito Candelaria-Punta del Cobre.....	15
CAPÍTULO 3. MARCO GEOLÓGICO	21
3.1. Marco geológico regional.....	21
3.2. Marco geológico local	23
3.2.1. Unidades litológicas del Yacimiento Carola.....	23
3.2.1.1. Andesitas inferiores (Kpcli)	23
3.2.1.2. Albitófiro (ALB)	24
3.2.1.3. Brecha de techo	24
3.2.1.4. Sedimentos Rojos brechizados (SR)	25
3.2.1.5. Tobas de Agustina (TA).....	26
3.2.1.6. Sedimentos de Flujo laminados (M)	26
3.2.1.7. Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	27
3.2.1.8. Calizas margosas (Cm)	27

3.2.1.9. Diques Lamprofiricos.....	27
3.2.1.10. Diorita	28
3.2.2. Geología estructural del Yacimiento Carola	28
3.2.3. Mineralización del Yacimiento Carola	30
3.2.4. Alteración hidrotermal del Yacimiento Carola.....	35
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	40
4.1. Análisis bibliográfico.	40
4.2. Caracterización litológica.	40
4.3. Creación de columnas estratigráficas para Adriana Norte.	44
4.4. Creación del modelo geológico en software Leapfrog 2023.1.....	47
4.5. Análisis e interpretación de resultados.	48
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	49
5.1. Unidades litológicas de Adriana Norte.....	49
5.1.1. Unidad Andesitas inferiores (Kpcli)	49
5.1.2. Unidad Albitófiro (ALB)	51
5.1.3. Unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR)	54
5.1.4. Unidad Tobas de Agustina (TA).....	57
5.1.5. Unidad Sedimentos de Flujo laminados (M)	60
5.1.6. Unidad Andesitas superiores (Kpcls).....	62
5.1.7. Unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	63
5.1.8. Unidad Calizas margosas (Cm).....	65
5.1.9. Dique Lamprofirico.....	68
5.2. Estratigrafía de Adriana Norte.....	69
5.3. Modelo Geológico actualizado de Adriana Norte	75
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN.....	87
6.1. Estratigrafía de Adriana Norte.....	87
6.2. Validación del modelo y planificación de sondajes exploratorios	100
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	112

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
------------------------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Foto satelital, la cual muestra la propiedad minera de Carola y la ubicación de la zona de estudio en relación con las principales mineras pertenecientes al Distrito minero Punta del Cobre.....	4
Figura 2. Modelos genéticos para depósitos IOCG andinos. (A) Modelo magmático-hidrotermal, (B) Modelo de cuenca sedimentaria (modificado de Barra et al., 2017).....	11
Figura 3. Ubicación de los depósitos IOCG-IOA, tipo manto y pórfidos formados durante el Jurásico superior- Cretácico inferior en el norte de Chile (modificado de Del Real et al., 2018).	14
Figura 4. Principales cuerpos mineralizados, los cuales se encuentran proyectados hacia la superficie, utilizando los datos actualizados de minas en el Distrito Candelaria-Punta del Cobre (modificado de Del Real <i>et al.</i> , 2018).	15
Figura 5. Columna estratigráfica de la geología en el Distrito Candelaria-Punta del Cobre (modificado de Del Real et al (2020).	17
Figura 6. Selección de sondajes y planificación de logueo de sondajes para el sector Adriana Norte.....	42
Figura 7. Planilla de software SedLog 3.1 para la construcción de estratos para la generación de columnas estratigráficas.....	45
Figura 8. Secciones realizadas en Adriana Norte para la construcción de 3 columnas estratigráficas.	46
Figura 9. Unidades litológicas utilizadas para la creación del modelo geológico para Adriana Norte.....	48
Figura 10. Fotografías representativas de las rocas que forman parte de la unidad de Andesitas inferiores (Kpcli): (A) Andesita inferior cloritizada con textura porfídica extraída del sondaje SE-CL-6. (B) Andesita inferior porfídica con alteración potásica extraída del sondaje S-08-1. (C) Brecha hidrotermal de andesita con pirita, magnetita y calcita extraída de sondaje S-08-1. (D) Andesita inferior mineralizada con vetilla de calcopirita y calcita extraída de sondaje AN-0353. (E) Brecha de techo con clastos alterados potásicamente extraída de sondaje M-14A. (F) Brecha hidrotermal con cemento de magnetita extraída de sondaje M-15.....	51

Figura 11. Fotografías representativas de las litologías correspondientes a la unidad Albitófiro (ALB): (A) Albitófiro extraído de sondaje SE-CL-3. (B) Albitófiro con patrón de flujo del fluido hidrotermal, cloritización y albitización extraído de sondaje SE-CL-2. (C) Albitófiro definido como Dacitas de Meléndez con textura porfídica extraído de sondaje AN-0003. (D) Autobrecha de Albitófiro extraída de sondaje SE-CL-3. (E) Autobrecha alterada extraída de sondaje AN-003.54

Figura 12. Fotografías representativas de las litologías que forman parte de la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR): (A) Sedimentos Rojos brechizados matriz-soportado con matriz lutítica y clastos < 20% extraído de sondaje S-02.1. (B) Sedimentos Rojos brechizados polimícticos de matriz arenosa con clastos moderadamente seleccionados extraído de sondaje SE-CL-3. (C) Sedimentos Rojos brechizados de matriz arenosa con clastos de Albitófiro muy mal seleccionados extraído de sondaje M-14. (D) Sedimentos Rojos laminados extraído de sondaje AN-0353. (E) Brecha de contacto clastosoportada con clastos muy mal seleccionados de Albitófiro extraído de sondaje S-1A-1. (F) Brecha de contacto extraída de sondaje SE-CL-2. (G) Brecha de contacto mineralizada con calcopirita extraída de sondaje AN-0030.....56

Figura 13. Fotografías representativas de las litologías que forman parte de la unidad Tobas de Agustina (TA): (A) Toba lítica-lapilli de color verde claro con aspecto poroso muy mal seleccionada, extraída de sondaje AN-0039. (B) Toba lítica-lapilli vesicular con veta de especularita extraída de sondaje AN-0003. (C) Brecha volcanosedimentaria polimíctica de matriz color verde claro con clastos muy mal seleccionados, extraída de sondaje AN-0034. (D) Toba de Agustina y Sedimentos Rojos brechizados, interdigitación entre ambas litologías extraída de sondaje M-15. (E) Brecha de contacto, brecha volcanosedimentaria de matriz lutítica verde y clastos de Sedimentos Rojos y Albitófiro extraída de sondaje AN-0008. (F) Lutita margosa de color verde con vetillas de especularita extraída de sondaje AN-0008.....59

Figura 14. Fotografías representativas de las litologías que forman parte de la unidad Sedimentos de Flujo laminados (M): (A) Roca sedimentaria con laminación y brechización correspondiente a la litología de Sedimentos de Flujo laminados, la cual muestra deformación con estructuras de slumping extraída de sondaje S-08-1. (B) Roca sedimentaria con laminación y deformación dúctil, correspondiente a litología de Sedimentos de Flujo laminados extraída de sondaje S-08-1. (C) Brecha de contacto deformada con clastos con laminación de calizas, hematita y jaspe extraída de sondaje AN-0039. (D) Roca sedimentaria con laminaciones de hematita y disseminación de piritita en la matriz extraída de sondaje M-14. (E) Brecha de contacto, volcanosedimentaria con clastos carbonáticos de hasta 5 cm extraída de sondaje AN-0353. (F) Brecha de contacto,

volcanosedimentaria con clastos polimícticos volcánicos y sedimentarios laminados con presencia de vetillas de calcita extraída de sondaje AN-0008.	61
Figura 15. (A) Roca ígnea extrusiva porfídica de color gris verdoso oscuro, presenta fenocristales de plagioclasa y alto contenido de minerales máficos, roca cloritizada y epidotizada, vetillas de calcita y cuarzo extraída de sondaje AN-0039. (B) Andesita superior con carbonatación y vetillas de calcita extraída de sondaje AN-0034.....	62
Figura 16. Fotografías representativas de las litologías pertenecientes a la unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs): (A) Brecha volcanosedimentaria polimíctica mal seleccionada extraída de sondaje AN-0034, los clastos son subredondeados a angulosos, de composición andesítica y sedimentaria: lutitas y calizas. (B) Lutita silíceas con vetillas de calcita extraída de sondaje AN-0030. (C) Lutita margosa extraída de sondaje S-02-1. (D) Litoarenitas de color gris verdoso oscuro con diseminación de piritita y vetillas de calcita extraída de sondaje M-17. (E) Lutitas de color blanco silicificadas con presencia de pirolusita, correspondiente a la litología de Chert extraída de sondaje M-17. (F) Calizas margosas en contacto con areniscas de grano grueso, vetillas de calcita y diseminación de magnetita. extraída de sondaje SE-CL-6.....	65
Figura 17. Fotografías representativas de las litologías pertenecientes a la unidad de Calizas margosas (Cm): (A) Caliza margosa de color gris oscuro con presencia de vetillas de calcita, oxidación y silicificación extraída de sondaje AN-0026. (B) Caliza margosa color gris claro silicificada con presencia de patrón de flujo y vetillas de calcita. extraída de sondaje S-08-1. (C) Calizas margosa de color gris blanquecino con presencia de oxidación y pirolusita dispuesta de manera dendrítica (dendritas de manganeso), extraída de sondaje AN-0026.....	67
Figura 18. (A) Dique Lamprofirico de color verde claro con textura porfídica, fenocristales máficos y vetillas de calcita extraído de sondaje S-02-1. (B) Dique Lamprofirico de composición microdiorítica con vetillas y diseminación de calcita extraído de sondaje M-17.....	68
Figura 19. Sección Norte con coordenada UTM 6.960.684N realizada en el Sector Adriana Norte, la cual incluye los sondajes AN-0030, AN-0026, M-14, SE-CL-6, M-15 y M-14A.....	69
Figura 20. Columna estratigráfica de la Sección Norte, la cual incluye el porcentaje de Cobre y los principales minerales de alteración en cada unidad estratigráfica.....	70
Figura 21. Sección Centro con coordenada UTM 6.960.342N realizada en el Sector Adriana Norte, la cual incluye los sondajes M-17, S-01A-1, AN-0034 y AN-0039.....	71

Figura 22. Columna estratigráfica de la Sección Centro, la cual incluye el porcentaje de Cobre y los principales minerales de alteración en cada unidad estratigráfica.....	72
Figura 23. Sección Sur con coordenada UTM 6.960.038N realizada en el Sector Adriana Norte, la cual incluye los sondajes S-08-1, AN-353, AN-0015, AN-0029, AN-0001 y AN-0003.....	73
Figura 24. Columna estratigráfica de la Sección Sur, la cual incluye el porcentaje de Cobre y los principales minerales de alteración en cada unidad estratigráfica.....	74
Figura 25. Modelo geológico para Adriana Norte con su correspondiente leyenda: (A) Vista S-W. (B) Vista S-E.	76
Figura 26. Gráfico circular, el cual muestra la distribución de los volúmenes de cada unidad litológica modelada.	78
Figura 27. Gráfico circular, el cual muestra la distribución de las unidades litológicas de la base de datos a partir de los sondajes.	79
Figura 28. (A) Vista en planta de sección transversal NE-SW en el modelo geológico actualizado de Adriana Norte. (B) Vista Sur de corte transversal NE-SW representativo del modelo geológico, en el cual se muestra disposición de las unidades litológicas definidas para Adriana Norte con su respectiva leyenda. (C) Imagen ampliada para una mejor visualización del corte transversal.	81
Figura 29. Ubicación de la sección realizada a partir de la Falla Cuerpo 1 en el modelo geológico de Adriana Norte.	82
Figura 30. Ubicación de la sección realizada a partir de la Falla Estocada Reconocimiento 5 en el modelo geológico de Adriana Norte.	83
Figura 31. Corte transversal en el modelo geológico de Adriana Norte, en base a la Falla Cuerpo 1. (A) Sección en el modelo actualizado de Adriana Norte. (B) Sección en el modelo anterior de Adriana Norte.....	85
Figura 32. Corte transversal en el modelo geológico de Adriana Norte, en base a la Falla Estocada Reconocimiento 5. (A) Sección en el modelo actualizado de Adriana Norte. (B) Sección en el modelo anterior de Adriana Norte.....	86
Figura 33. Correlación litoestratigráfica para columnas creadas a partir de la Sección Norte, Sección Centro y Sección Sur en el modelo geológico de Adriana Norte (elaboración propia).	87
Figura 34. Columna estratigráfica tipo de Adriana Norte con las unidades litológicas presentes en el sector (elaboración propia).	90

Figura 35. Columna estratigráfica de Mina Carola, extraída de informe geológico y mineralógico de la propiedad (extraído de informe local de Superintendencia de Geología de SCM Carola, 2019).....	91
Figura 36. Registros representativos de testigos de perforación del depósito de Candelaria, los cuales muestran la distribución de los principales minerales de alteración integrados con las leyes de cobre, la litología y las fallas. El mapeo de la alteración de feldespato incluye tanto la albita rosa como el K-feldespato, que no fueron diferenciados durante la descripción del testigo (modificado de Del Real et al. (2018)).	95
Figura 37. Vista norte de corte transversal representativo del modelo geológico previo y el actual con sus respectivas leyendas. (A) Superposición de modelo geológico actual sobre el modelo preexistente para mayor visualización de los cambios en la disposición de las unidades litológicas de Adriana Norte. (B) Corte transversal en el modelo geológico actualizado. (C) Corte transversal en el modelo geológico preexistente (elaboración propia).	96
Figura 38. Perfil Litológico 3E Az. 70° del Cuerpo 1E, el cual forma parte de Adriana Norte (extraído de Sepúlveda, 2017).	99
Figura 39. Vista en planta de los sondajes propuestos para Adriana Norte en sus respectivos perfiles.....	103
Figura 40. Sondajes propuestos en el Perfil 1 para Adriana Norte. (A) Vista SE de los sondajes, los cuales cortan al cuerpo mineralizado con leyes sobre 0,8%. (B) Vista Norte de los sondajes.	105
Figura 41. Sondajes propuestos en el Perfil 2 para Adriana Norte. (A) Vista SE de los sondajes, los cuales cortan al cuerpo mineralizado de leyes sobre 0.3%. (B) Vista SW de los sondajes.	106
Figura 42. Sondajes propuestos en el Perfil 3 para Adriana Norte. (A) Vista NW de los sondajes, los cuales cortan al cuerpo mineralizado con leyes desde 0,3% hasta más de 1,3%. (B) Vista SE de los sondajes.....	107
Figura 43. Sondajes propuestos en el Perfil 4 para Adriana Norte. (A) Vista Sur de los sondajes, los cuales cortan al cuerpo mineralizado con leyes desde 0,3%. (B) Vista Norte de los sondajes.	108
Figura 44. Sondajes propuestos en el Perfil 5 para Adriana Norte. (A) Vista Sur de los sondajes (B) Vista Oeste de los sondajes.....	109
Figura 45. Vista NW de Sondajes propuestos en el Perfil 6 para Adriana Norte.	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estilos de mineralización y roca huésped de los depósitos más importantes en el Distrito minero Candelaria- Punta del Cobre (modificado de Del Real et al., 2018).	20
Tabla 2. Tabla 2. Sondajes utilizados para el logueo con sus respectivas características principales.	43
Tabla 3. Tabla comparativa de los sólidos de las unidades litológicas modeladas y la base de datos que coincide con los sólidos modelados.	102
Tabla 4. Perfiles propuestos para la realización de sondajes con sus respectivas características principales. Cabe destacar que los datos de los sondajes se muestran en inglés para facilitar el ingreso a la base de datos y al software Leapfrog.	111

RESUMEN

El área de estudio, Adriana Norte, corresponde al sector de futura explotación de SCM Carola. Esta se ubica en el Distrito Minero Punta del Cobre, en la comuna de Tierra Amarilla, a 3.5 km al norte de Mina Carola. La siguiente investigación se enfocó en generar una actualización del modelo geológico de Adriana Norte, a partir de un logueo de sondajes históricos en el sector, con el propósito de caracterizar las unidades litológicas presentes, además, de definir las unidades estratificadas y sus relaciones de contacto. Se identificaron nueve unidades litológicas para Adriana Norte, de base a techo, se definieron las Andesitas inferiores (Kpcli) y Albitófiro (ALB), correspondientes a las unidades volcánicas hospedantes de calcopirita; la cual se presenta en forma de relleno de fracturas de las rocas como vetillas, vetas y stockwork, además de diseminaciones y masivos. Estas unidades se encuentran afectadas por alteración calco-sódica en niveles más profundos, alteración potásica y cloritización. Luego, se encuentran las unidades volcanosedimentarias correspondientes a Sedimentos Rojos brechizados (SR), Tobas de Agustina (TA), Sedimentos de Flujo laminados (M), Andesitas superiores (Kpcls) y Brecha volcanosedimentaria (BrVs). Estas unidades no hospedan mineral económico y presentan comúnmente carbonatación, silicificación y oxidación. Posteriormente, se definió la unidad sedimentaria correspondiente a las Calizas margosas (Cm), conformada por rocas sedimentarias carbonáticas, las cuales presentan laminaciones y/o patrones de flujos. La principal alteración asociada a las Calizas margosas (Cm) es la oxidación. Adicionalmente, se consideró como unidad a los Diques Lamprofiricos, los cuales intruyen a todas las unidades litológicas descritas anteriormente.

Finalmente, se logró establecer sondajes exploratorios para completar la información litológica y ayudar a la optimización del modelo geológico de Adriana Norte. Estos, además, ayudarán a reconocer y determinar la continuidad de los cuerpos mineralizados presentes en el sector.

ABSTRACT

The study area, Adriana Norte, corresponds to the future exploitation sector of SCM Carola. It is located in the Distrito Minero Punta del Cobre, in the Tierra Amarilla commune, 3.5 km north of Mina Carola. The following research focused on updating the geological model of Adriana Norte based on a logging of historical drillings in the area, aiming to characterize the present lithological units and define the stratified units and their contact relationships. Nine lithological units were identified for Adriana Norte from bottom to top, defining the Andesitas inferiores (Kpcli) and Albitófiro (ALB) as the volcanic units hosting chalcopyrite, which occurs as fillings in fractures such as veinlets, veins, and stockwork, as well as disseminations and massive occurrences. These units are affected by calc-sodic alteration at deeper levels, as well as potassic alteration and chloritization. Next, there are the volcanic-sedimentary units corresponding to Sedimentos Rojos brechizados (SR), Tobas de Agustina (TA), Sedimentos de Flujo laminados (M), Andesitas superiores (Kpcls), and Brecha volcanosedimentaria (BrVs). These units do not host economic minerals and commonly exhibit carbonation, silicification, and oxidation. Subsequently, the sedimentary unit corresponding to Calizas margosas (Cm) was defined, consisting of carbonate sedimentary rocks with laminations and/or flow patterns. The primary alteration associated with Calizas margosas (Cm) is oxidation. Additionally, the Diques Lamprofíricos were considered as a unit, which intrude into all the lithological units described previously.

Finally, exploratory drillings were established to complete the lithological information and aid in optimizing the geological model of Adriana Norte. These drillings will also help recognize and determine the continuity of mineralized bodies present in the sector.

CAPÍTULO 1. MARCO INTRODUCTORIO

1.1. Introducción

Los depósitos tipo IOCG (*iron oxide-copper-gold*) son una fuente importante de hierro, cobre y otros elementos metálicos en la actualidad (Del Real *et al.*, 2018). De esta manera, uno de los centros productores de cobre más importante en Chile, es el Distrito Minero Punta Del Cobre, el cual se ubica en la región de Atacama, norte de Chile. Este distrito alberga una serie de depósitos minerales importantes, entre los cuales se encuentra la Mina Carola, localizada en el límite entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera de Copiapó. El yacimiento está emplazado dentro de los miembros de la Formación Punta Del Cobre (Segerstrom y Ruiz, 1962). Principalmente, la mineralización se aloja en el Miembro Geraldo Negro, el cual constituye el miembro inferior de dicha Formación y corresponde a rocas volcánicas denominadas Andesitas inferiores (Kpcli). Esta unidad está sobreyacida por el miembro superior de la Formación Punta del Cobre, denominado Miembro Algarrobo, el cual consiste en rocas volcanoclásticas y brechas volcanoclásticas. Posteriormente se encuentra la Formación Abundancia, la cual sobreyace a la Formación Punta del Cobre. La Formación Abundancia es de carácter sedimentario y está constituida por Calizas y Calizas margosas (Biese, 1942).

Mina Carola posee 2.800,48 hectáreas de propiedad minera del Distrito Punta del Cobre. La mineralización sulfurada de cobre (oro, plata y zinc) presente en el yacimiento es generalmente tipificada como IOCG. Las futuras extracciones se enfocan hacia el sector Adriana Norte, el cual se ubica a 3.5 km al norte de Mina Carola. Este sector, a diferencia de Carola central y Carola Norte, no cuenta con un modelo geológico actualizado. Es por esto, que el objetivo de este trabajo es la generación de un modelo geológico para Adriana Norte, con el fin de determinar las relaciones de las unidades estratigráficas sector y actualizar la información existente sobre las litologías y la mineralización de mena. El modelo se creará en el software Leapfrog de acuerdo a la información recolectada a partir del logeo de 21 sondajes diamantinos realizados en la zona entre los años 1990 y 2012.

1.2. Planteamiento del problema de investigación

Mina Carola se emplaza en el Distrito Minero Punta del Cobre, uno de los centros productores de cobre más significativos de la mediana minería en Chile, que destaca por importantes depósitos del tipo IOCG.

Los yacimientos del Distrito Punta del Cobre representan el clúster más importante de minas y depósitos en la Cordillera de la Costa del norte de Chile y el sur del Perú (Sillitoe, 2003), con más de 13 Mton de cobre fino contenido.

Junto con Mina Carola, los principales yacimientos del distrito son: La Candelaria, Alcaparrosa, Santos, La Española (Lundin Mining), Socavón Rampa, Granate, Mantos de Cobre (PuCobre) y Atacama Kozan.

En particular, el sector de Adriana Norte se ubica 3.5 km al norte de Mina Carola, sector Cuerpo 910 (Carola Norte), donde se centra actualmente la extracción. Este sector conecta con la Mina Carola a través de las labores subterráneas con Rampa Meléndez.

La Mina Carola, tanto Carola Central como Carola Norte, cuenta con un modelo geológico actualizado y completo. Sin embargo, el sector de Adriana Norte consta de un modelo geológico basado en datos de sondajes que deben ser corroborados, debido a inconsistencias litológicas en la roca de caja hospedante de la mineralización. Adicionalmente, las numerosas litologías existentes en la zona de estudio no permiten la generación de un modelo continuo en el espacio bajo el concepto de unidad geológica. Por tanto, es relevante desarrollar la propuesta de un nuevo modelo geológico que permita redefinir la estratigrafía local.

1.3. Hipótesis

A partir de un re-logueo exhaustivo de los sondajes diamantinos empleados para la elaboración del modelo de Adriana Norte, será posible definir las unidades litológicas del sector, y establecer la sucesión de las mismas dentro del yacimiento. A su vez, a

partir de esta información, será posible la creación de un modelo actualizado, el cual permitirá plantear posibles correlaciones entre las unidades definidas en este estudio, y las existentes en el sector de actual explotación en Mina Carola. Esta información, servirá como un valioso insumo para la localización de futuros sondajes exploratorios.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Actualizar el modelo geológico para el sector Adriana Norte, perteneciente a SCM Carola.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Definir y caracterizar las unidades litológicas pertenecientes al sector Adriana Norte mediante el logueo de sondajes diamantinos.
- Generar una correlación de las unidades estratificadas de Adriana Norte, para su comparación con las unidades litológicas del Distrito minero Punta del Cobre.
- Elaborar un modelo geológico para el sector Adriana Norte.
- Establecer recomendaciones de sondajes exploratorios para zonas de interés económico y para precisar la información del modelo geológico.

1.5. Ubicación y Accesos

Adriana Norte se ubica en la comuna de Tierra Amarilla, a 3,5 km al norte de Mina Carola (Figura 1). Específicamente en la Quebrada Meléndez, en el flanco oriental del valle del río Copiapó. El sector Adriana Norte está delimitado por las coordenadas UTM [380.603 – 376.559]m E y [6.961.066 – 6.959.840]m N y cuenta con una superficie total de 2.058.755 m².

El acceso principal a la zona se efectúa por la carretera pavimentada, ruta C-35, la cual conecta la ciudad de Copiapó con la localidad de Tierra Amarilla. En esta ruta se deben recorrer 17 km en dirección sureste hasta llegar al cruce originado con el camino no pavimentado C-385, el cual se ubica en el extremo norte de la comuna de Tierra

Amarilla. Finalmente se debe seguir este camino en dirección a Quebrada Meléndez durante 2.5 km hasta llegar a Adriana Norte.



Figura 1. Foto satelital, la cual muestra la propiedad minera de Carola y la ubicación de la zona de estudio en relación con las principales mineras pertenecientes al Distrito minero Punta del Cobre.

1.6. Reseña histórica

El Distrito Punta del Cobre, es uno de los principales centros productores de cobre de la pequeña y mediana minería del país, este se ubica en la región de Atacama, 15 km al sur de Copiapó. La explotación en el distrito se llevó a cabo por inmigrantes españoles a fines del siglo XVII y principios del siglo XVIII, de esta manera se mantuvo una

producción de cobre reducida debido al escaso comercio de la época (Ruge, 1976). Durante el siglo XIX, a partir del año 1952, la explotación fue incrementando gradualmente en el establecimiento de la Fundición Paipote. Las principales minas del distrito eran Abundancia, Bateas, Agustina, Buena Esperanza y Manto Verde. La producción total del distrito entre los años 1800 a 1978 alcanzó una cifra de 3.5 millones de toneladas de mena, de ley media de 6% Cu total (Camus, 1980). Produciéndose así en el año 1923, alrededor de 19.000 toneladas provenientes sólo de Agustina, Bateas y Manto Verde.

Mina Carola es la extensión ininterrumpida de las labores realizadas en la antigua Mina Agustina, la cual se desarrolló en el siglo XIX y los primeros trabajos conducentes a la explotación en esta mina comenzaron en el año 1840. Ya transcurrido más de un siglo desde el comienzo de la explotación de la Mina Agustina, el 26 de junio de 1956, se formó legalmente la Compañía Minera Agustina. En cuanto a la operación, la explotación en la mina se realizaba mediante los métodos de *shrinkage* y *sublevel stoping* y chimeneas de rebaje. Finalmente, en el año 1988, el yacimiento minero Agustina es adquirido por SCM Carola y actualmente el método de explotación en la mina es *sublevel stoping*.

A modo de resumen de los principales hitos de la historia de la Sociedad Contractual Minera Carola, se tiene lo siguiente:

Siglo XVII: Primeros antecedentes de explotación del Distrito Punta del Cobre.

1840: Comienza la explotación de Mina Agustina.

1956: Formación de la “Compañía Minera Agustina”.

1978: Planta Cerrillos recibe mineral de Mina Agustina.

1982: Planta Cerrillos es adquirida en su totalidad por Don Jonás Gómez Gallo.

1986: Compañía Minera Agustina es adquirida en su totalidad por Don Jonás Gómez Gallo. Desde entonces lleva el nombre de Sociedad Contractual Minera Carola (SCM Carola).

1988: Inicio del Socavón Carola.

2004: Inicio del Socavón Cobriza y Socavón Meléndez.

1.7. Estudios previos

La geología del Distrito Minero Punta del Cobre ha sido extensamente estudiada por la riqueza de sus depósitos minerales tipo IOCG. Los estudios se centran en la definición y caracterización litológica, estratigráfica, mineralógica y estructural. Sin embargo, en Adriana Norte, no existen muchos estudios, ya que esta es un área de futura exploración y explotación. Los principales trabajos a modo general son los siguientes:

Little, 1926. Describió la geología, mineralogía y control de la mineralización de los yacimientos del Distrito Punta del Cobre.

Ruiz, 1940. Realizó estudios geológicos en la región de Ojancos - Punta del Cobre, definiendo a la vez el Albitófiro como una andesita de carácter intrusivo. Además, hace un análisis de la petrografía y estratigrafía de la zona.

Ruiz, 1942. Confeccionó la geología de la parte central del área de Tierra Amarilla a escala 1:25000 y estudió la petrogénesis de las rocas batolíticas y los yacimientos de minerales.

Biese, 1942. Realizó el primer estudio estratigráfico del Grupo Chañarcillo, estableciendo una subdivisión de éste en cuatro formaciones, recolectando, además, una abundante fauna fósil en cada una de ellas.

Ortiz et al., 1966. Realizaron un estudio detallado en el que se reconoce la estratigrafía, los controles estructurales y litológicos, características mineralógicas del Distrito Punta del Cobre y principales yacimientos.

Ortiz y Silva, 1967. Efectuaron un informe geológico y geofísico del distrito entre Puntillas de Bateas y Quebrada Meléndez, basado en un levantamiento magnético del área.

Camus, 1980. Configuró un modelo genético para los yacimientos de cobre del Distrito Minero Punta del Cobre. Este estudio comprende una recopilación de datos de trabajos anteriores en la zona, y además aporta nuevos antecedentes con respecto a la geología de los yacimientos y mecanismos de formación de estos últimos.

Lino, 1984. Aportó nuevos antecedentes sobre el origen del yacimiento en Mina Agustina, realizó una descripción de las principales estructuras geológicas en la mina, además de, las alteraciones presentes, metalogénesis y etapas de mineralización.

Hopf, 1990. Realizó una descripción de la geología, mineralización, alteración de la mina Agustina, entregando además un modelo genético para la formación del yacimiento.

Barriaga, 1992. Efectuó estudios de tipo económico en mina Agustina.

Arevalo, 1994, 1995. Realizó el levantamiento geológico de las Hojas de Copiapó y Los Loros, escala 1: 100.000.

Miroslav et al., 1997. Entregaron antecedentes geoquímicos de Co y Ni, en piritas y calcopiritas en el yacimiento de Mina Carola, los cuales evidencian el origen magmático de este.

Delgado et al., 1997. Ejecutaron estudios de microtermometría en cuerpos mineralizados del Yacimiento Carola-Agustina, destinados a complementar antecedentes sobre la génesis de este yacimiento.

Miroslav *et al.*, 1997. Entregaron antecedentes geoquímicos de Co y Ni de piritas y calcopiritas en el yacimiento de Mina Carola, los cuales evidencian el origen magmático de este.

Tarnovschi, 1999. Determinó la alteración hidrotermal y mineralización asociada al Yacimiento Carola.

Marschik y Fontboté, 2001. Redefinieron la Formación Punta del Cobre subdividiéndolo en dos miembros, que de base a techo son: (1) Miembro Negro Geraldo; (2) Miembro Algarrobo, entregando además datos de la mineralización.

Pop *et al.*, 2008. Aportó nuevos conocimientos a la geología y mineralogía de la Mina Carola y nuevos antecedentes de la geología del Distrito Minero Punta del Cobre.

Sepúlveda, 2017. Realizó una validación y redefinición de la geología del Cuerpo 1E de Mina Meléndez de SCM Carola.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Yacimiento Tipo IOCG-IOA

Los yacimientos de óxidos de hierro-cobre-oro, conocidos como IOCG, por su sigla en inglés *iron oxide, copper and gold*; consisten en yacimientos abundantes de hierro, con porcentajes menores de cobre y oro, pero económicamente rentables, los cuales se forman por procesos magmáticos-hidrotermales, principalmente de magmas básicos, ricos en volátiles derivados del manto (Sillitoe, 2003). Este tipo de depósitos surge en la década de los setenta con el descubrimiento en Australia del depósito de clase mundial de Olympic Dam, y así posteriormente, de acuerdo a los mecanismos de formación de este depósito, se evidenció que otros depósitos proterozoicos, los cuales habían sido clasificados con otra tipología, pasaron a formar parte de un grupo más amplio que comparte un origen en común. De esta manera, fueron propuestos tres miembros para esta tipología; Tipo Olympic Dam, caracterizado por brechas hematíticas con contenidos considerables de Cu, Au y U. Tipo Kiruna, caracterizado por depósitos de magnetita, pobre en Ti, con contenidos de apatita y cantidades subordinadas de Cu y Au. Y el Tipo Bayan Obo, caracterizado por grandes acumulaciones de REE y Nb (Corona-Esquivel *et al.*, 2010). Una de las características principales de los depósitos tipo IOCG es la variación de las edades, ya que van desde el Paleoproterozoico hasta el Paleógeno-Neógeno (Barton, 2014). Otra característica es que se localizan en áreas que fueron márgenes continentales o cratónicos durante el Proterozoico y, generalmente, se asocian espacial y temporalmente a fenómenos de tectónica extensional. Según evidencias petrológicas (Groves *et al.*, 2010), los tipos de depósitos IOCG guardan relación con magmas básicos o ultramáficos derivados del manto, generando con alguno de ellos afinidad alcalina en el contexto de un evento magmático regional. Además de asociación con magmas del manto ricos en volátiles con evidencias de devolatización profunda indicada por el extremo enriquecimiento de LREE y volátiles, la gran cantidad de cuerpos de brecha y los halos de alteración.

La composición química de la mena consta de hierro, cobre, oro, plata, uranio, cobalto y REE. Posee menas principales de óxidos de fierro como magnetita hidrotermal en los niveles más profundos y/o hematita especular en niveles más someros (Ray y Lefebure, 2000), también sulfuros como calcopirita, bornita, covelina, calcosina. Los depósitos tipo IOCG muestran una estrecha relación con los complejos plutónicos y la permeabilidad de las estructuras regionales representadas por pliegues, discontinuidades, fallas, zonas de cizalla y hasta contactos intrusivos, de tal manera que los parámetros litológicos y estructurales, definen la morfología del depósito; vetas, brechas hidrotermales fuertemente discordantes que cortan las estructuras regionales, mantos de reemplazo, skarn cálcicos, estratoligado o irregulares (Sillitoe, 2003).

Los yacimientos tipo IOA, denominados así por su sigla en inglés, *iron oxide-apatite*, se componen de magnetita masiva y contenidos variables de apatito y actinolita. Son yacimientos ricos en hierro y pobres en cobre (Sillitoe, 2003; Williams *et al.*, 2005). Poseen mineralización principalmente de magnetita masiva acompañada de apatito y alteración sericita potásica, sericita-hematita, actinolita-albita. La génesis de estos depósitos es controversial, postulándose como hipótesis contrapuestas la segregación magmática de un fundido rico en hierro, y por otra parte un origen netamente hidrotermal. Este tipo de yacimiento contiene de diez a cientos de millones de toneladas de Fe y una cantidad sustancial de REE, P, Co y V (Hitzman *et al.*, 1992).

2.1.1. Yacimientos IOCG-IOA en Chile

El cinturón más joven se encuentra en la Cordillera de la Costa en el norte de Chile y al sur de Perú (Marschik y Fontboté, 2001), el cual forma parte de un arco volcánico-plutónico del Jurásico al Cretácico inferior. Los depósitos IOCG en el norte de Chile están asociados a regímenes extensionales y en Chile se asocian al Sistema de Falla Atacama (Espinoza, 1990; Grocott *et al.*, 1994; Wilson y Grocott, 1999; Grocott y Taylor, 2002). Se han determinado diferentes fuentes de fluidos formadores de este tipo de depósito, uno de ellas es un fluido proveniente de salmueras salinas derivadas de

evaporitas que se formaron en cuencas continentales de trasarco durante el Jurásico superior y Cretácico inferior (Figura 2B) (Barton y Johnson, 1996; Hitzman, 2000). Otro modelo asocia a los yacimientos IOCG a fluidos de origen magmáticos-hidrotermales (Figura 2A) que evolucionaron a partir de una intrusión ígnea (Marschik y Fontboté, 2001; Sillitoe, 2003; Del Real *et al.*, 2018), caracterizado por complejos plutónicos toleíticos a calcoalcalinos de composición gabroica a granodiorítica (Groves *et al.*, 2010; Sillitoe, 2003). Ambos modelos están ligados a una configuración tectónica transtensional (Arévalo *et al.*, 2006; Groves *et al.*, 2010) y transpresional, la cual coincide con la formación de los depósitos de tipo IOCG en el Cinturón Andino.

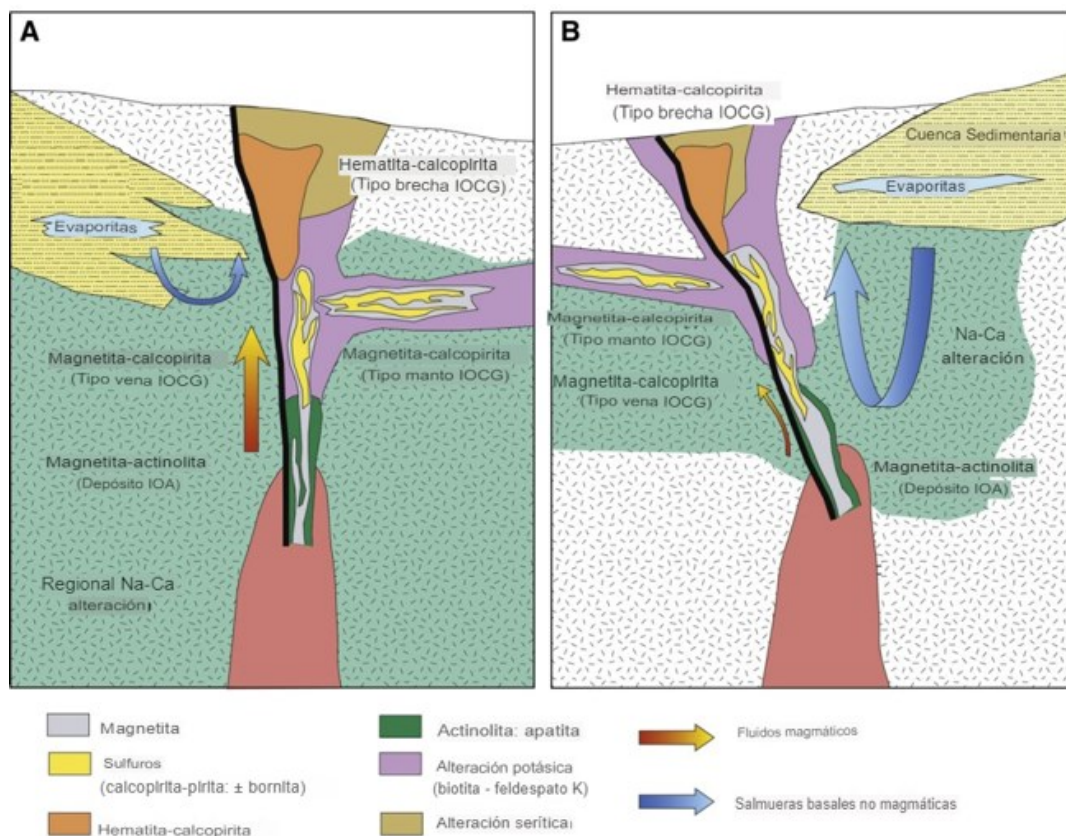


Figura 2. Modelos genéticos para depósitos IOCG andinos. (A) Modelo magmático-hidrotermal, (B) Modelo de cuenca sedimentaria (modificado de Barra *et al.*, 2017).

En la zona centro-norte de Chile los depósitos IOCG que forman parte del cinturón andino IOA-IOCG, se extienden desde el norte de Santiago hasta el norte de Antofagasta, con la mayoría de depósitos localizados entre Taltal y Vallenar (Figura 3). La edad de estos depósitos tiene un rango desde 90 a 165 Ma, siendo el depósito El Espino el más joven, con una edad de 88.4 Ma, el cual se ubica en la comuna de Illapel (Lopez *et al.*, 2014; Arriagada, 2015). Los depósitos más antiguos son Montecristo y Julia, ambos depósitos mineros pertenecen a la región de Antofagasta y tienen edades de 164 Ma y 159 Ma, respectivamente. Además, en el cinturón, se encuentran los depósitos Mantoverde y Candelaria, los cuales son los mayores productores de cobre (Del Real *et al.*, 2020). Estos grandes depósitos presentan morfologías de brechas, *stockwork* y manto, y ocurren dentro de secuencias volcánicas o volcanosedimentarias (Sillitoe, 2003). Es así como los depósitos de tipo IOCG andino tienen varios estilos de mineralización, como por ejemplo el Distrito Tocopilla y la Mina Dulcinea, los cuales presentan enjambres de vetas distribuidas por varios km cuadrados dentro de cuerpos intrusivos félsicos, los cuales llegan a extensiones de 1 a 5 km de largo.

Candelaria entró en producción en el año 1995 con un método de explotación *open pit*. La mineralización se da en dos estilos principales; mineralización de sulfuro diseminada y vetas y cortes transversales, en donde la mineralización se encuentra alojada en brechas, mediante estructuras, como fallas y zonas de fracturas. Las reservas probadas y probables son de 459 millones de toneladas a 0.5% Cu. Si todas las minas y productores antiguos en el Distrito Candelaria-Punta del Cobre son considerados, el total considerado es de aproximadamente 13 millones de toneladas de contenido de Cu (Del Real *et al.*, 2018).

Otros ejemplos de depósitos IOCG en Chile son Punta del Cobre, Mina Carola, Alcaparrosa, Atacama Kozan, Mantos del Cobre, Granate y Santos. De la misma forma, entre los 26° a 31°S existen muchos yacimientos IOA hospedados en rocas volcánicas del Cretácico inferior en sectores asociados a intrusivos dioríticos a granodioríticos del

Albiano. Estos depósitos ferríferos están dentro del dominio del segmento meridional del Sistema de Falla de Atacama, algunos ejemplos son Cerro Imán, Cerro Negro, Banadurrias, Algarrobo, El Tofo, Romeral (Del Real *et al.*, 2018). En la Figura 3 se muestran los principales depósitos tipo IOCG- IOA en Chile.

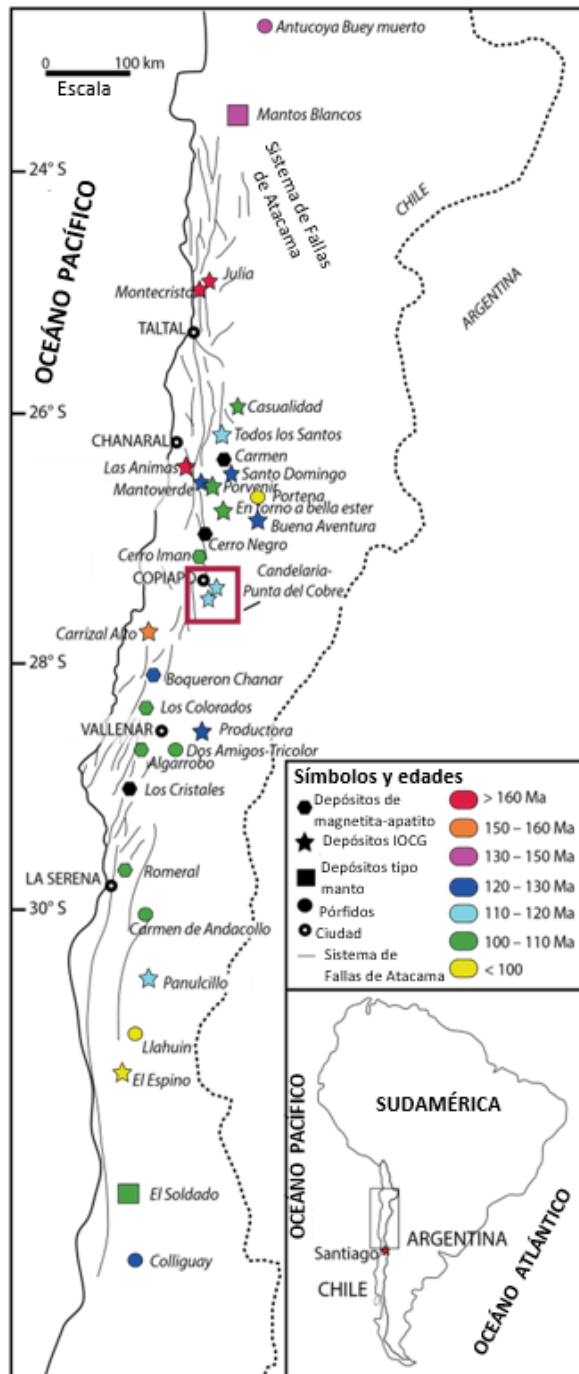


Figura 3. Ubicación de los depósitos IOCG-IOA, tipo manto y pórfidos formados durante el Jurásico superior- Cretácico inferior en el norte de Chile (modificado de Del Real *et al.*, 2018).

2.1.2. Antecedentes metalogénicos del Distrito Candelaria-Punta del Cobre

El Distrito Candelaria-Punta del Cobre es el distrito de óxidos de hierro-cobre-oro más grande de la franja de IOCG en Chile, con más de 13 Mt de contenido de cobre (Del Real *et al.*, 2018). Este se encuentra ubicado a 15 km al sur de Copiapó, al este del río Copiapó. En él se encuentran diversos depósitos explotados por la pequeña y mediana minera (Figura 4), tales como la Mina Carola, Resguardo, Santos, Socavón Rampa, Manto Verde y Trinidad (Williams, 2005).

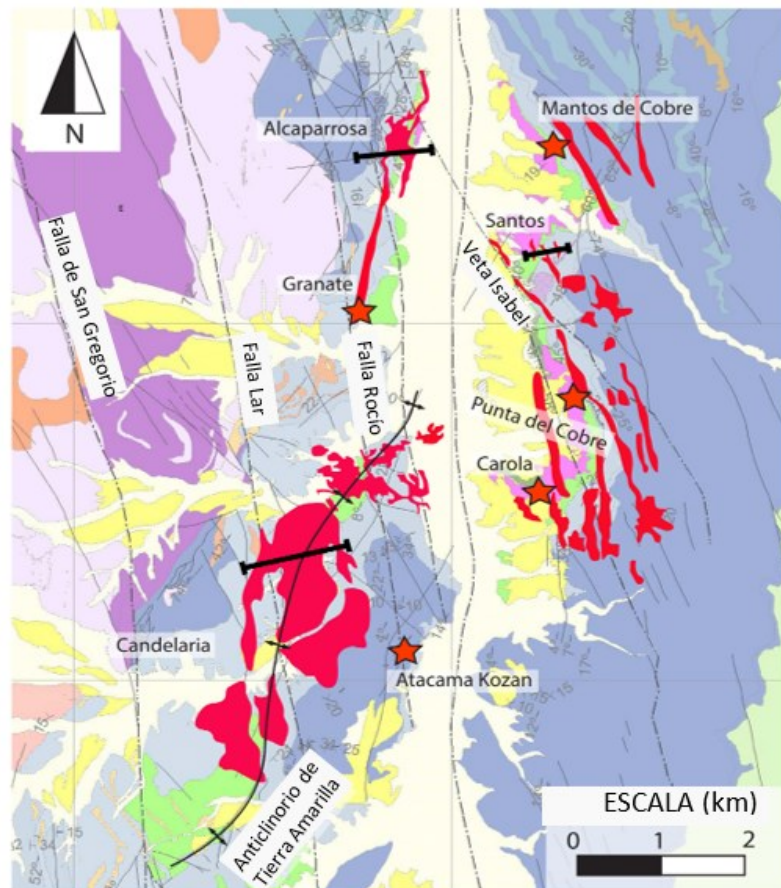


Figura 4. Principales cuerpos mineralizados, los cuales se encuentran proyectados hacia la superficie, utilizando los datos actualizados de minas en el Distrito Candelaria-Punta del Cobre (modificado de Del Real *et al.*, 2018).

El Distrito Candelaria-Punta del Cobre se caracteriza por una secuencia de arco volcánico-sedimentario del Cretácico inferior; Formación Punta Cobre, la cual tiene una edad de 135 a 132 Ma, y se encuentra sobreyacida por rocas sedimentarias de origen marino, formadas en una cuenca de trasarco extensional, las cuales pertenecen al Grupo Chañarcillo (Seegerstrom y Ruiz, 1962). Posteriormente sobreyace la Formación Cerrillos (Figura 5). El Batolito de Copiapó, el cual ocupa el lado occidental del distrito, fue emplazado hace 118-110 Ma durante el cambio de tectónica extensional a transpresional. En cuanto a la mineralización, esta se hospeda principalmente en la parte superior del miembro de Andesitas inferiores, en los miembros volcano-sedimentarios y dacitas suprayacentes pertenecientes a la Formación Punta del Cobre (Del Real *et al.*, 2018).

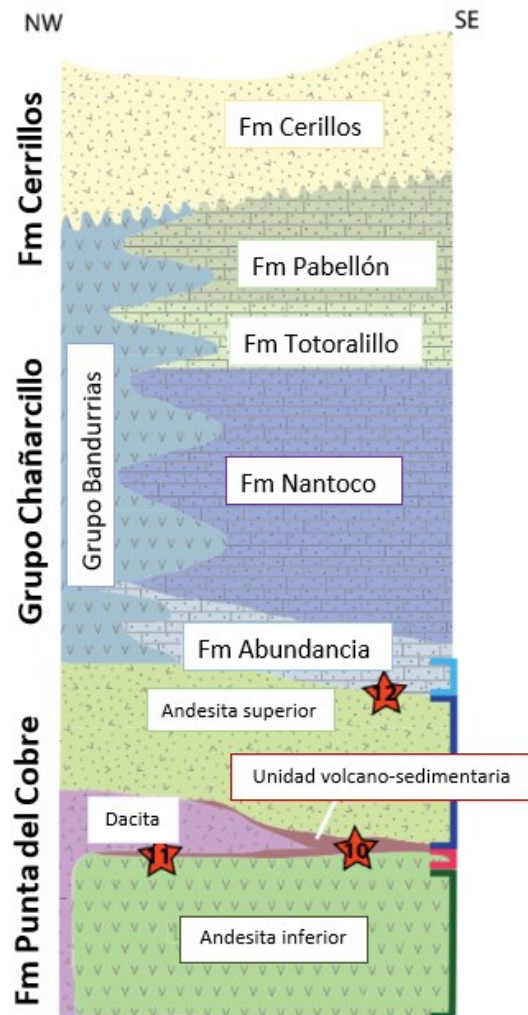


Figura 5. Columna estratigráfica de la geología en el Distrito Candelaria-Punta del Cobre (modificado de Del Real *et al* (2020).

La mineralización del distrito, tanto su distribución como ocurrencia mineral, está relacionada directamente al control estructural dado por eventos extensionales tempranos y por la formación de cuencas, seguido de un cambio deformacional transtensional y posterior inversión de la cuenca, con fallas y plegamientos asociados (Arévalo *et al.*, 2006). Los yacimientos como Manto Verde y otros yacimientos tipo IOA dentro del distrito, se encuentran hospedados por fallas pertenecientes al Sistema de Fallas de Atacama (Espinoza, 1990; Grocott *et al.*, 1994; Wilson y Grocott, 1999; Grocott y

Taylor, 2002). Sin embargo, en otras zonas, los yacimientos Candelaria, Carola y Teresita muestran una relación espacial y temporal con fallas de rumbo sinestrales (Arévalo *et al.*, 2006; Cembrano *et al.*, 2009). La relación entre la mineralización y estos acontecimientos estructurales y la posible influencia en el carácter y la distribución de la mineralización es importante en lo que respecta a los modelos para la reformación y exploración. De esta manera, en el distrito se describen cinco estilos de fallas; fallas normales tempranas, relacionadas con la extensión y la formación de la Cuenca Chañarcillo, fallas de rumbo-deslizante, las cuales coinciden con la deformación transpresional sinistral regional, zonas de cizallamiento de bajo ángulo, que ocurren en contactos litológicos, zona de cizallamiento de alto ángulo y fallas inversas relacionadas a la compresión y la inversión tectónica de la cuenca. Las fallas normales son localmente visibles y ampliamente interpretadas dentro de la Formación Punta del Cobre. La mayoría de estas fallas son difíciles de seguir debido al escaso afloramiento y a la compleja estratigrafía volcánica que incluye variaciones primarias en el espesor de las unidades y cambios de facies. De esta forma, el miembro sedimentario volcánico es la unidad litológica predominante para este estilo de deformación, particularmente los sedimentos de toba de grano fino, donde se desarrolla un tejido moderado en la matriz rica en biotita de grano fino mientras que los clastos volcánicos muestran una deformación mínima. En la parte oriental del distrito, la mineralización se produce en estructuras de vetas con longitudes a escala kilométrica. Estas estructuras registran predominantemente una cinemática sinistral de rumbo durante el relleno de la veta (Del Real *et al.*, 2018).

La mayoría de los depósitos en el Distrito Candelaria-Punta del Cobre tienen una etapa temprana de magnetita-actinolita, pobre en Cu. En todos los depósitos importantes, la etapa principal de la mineralización de sulfuro de Cu sob reimprime la alteración temprana de magnetita-actinolita y está asociada con calcopirita-pirita-magnetita-actinolita ± biotita ± K feldespato ± cuarzo ± pirrotita con albita-epidota ± envolturas de

clorita alrededor de las venas y fracturas. La etapa de sulfuro de cobre contiene cantidades significativas de óxidos de hierro, predominantemente magnetita con cantidades variables de hematita o mushketovita. La presencia de mushketovita implica una hematita temprana generalizada y, por lo tanto, sugiere que los fluidos hidrotermales evolucionaron de más oxidados a más reducidos, asimismo, la alteración profunda está dominada por biotita-actinolita- K feldespato mientras que la albita-epidota-clorita son más prevalentes en los niveles superiores. De esta manera, la variación espacial de la mineralogía de alteración no es solo lateral, sino también vertical. La mayoría de los depósitos en el distrito muestran zonificación vertical desde magnetita profunda con alteración de K-Ca-Fe \pm Na con fracturas y venas dominadas por cuarzo \pm anhidrita, feldespato, calcopirita, epidota y carbonato, hasta hematita especular poco profunda con alteración de Na-Ca más fuerte y venas ricas en calcita. La mushketovita es común en un rango de profundidades en muchos depósitos (Del Real *et al.*, 2018). A continuación, en la Tabla 1 se muestra el principal estilo de mineralización en conjunto con la roca hospedante para los principales depósitos mineros pertenecientes al Distrito minero Candelaria- Punta del Cobre.

Tabla 1. Estilos de mineralización y roca huésped de los depósitos más importantes en el Distrito minero Candelaria- Punta del Cobre (modificado de Del Real *et al.*, 2018).

Depósito	Configuración/ roca huésped	Estilo/ tiempo
Candelaria	Andesita Inferior y miembro volcano-sedimentario	Las zonas mineralizadas consisten en un reemplazo masivo de magnetita y calcopirita superpuesta en un horizonte estratigráfico continuo (manto) dentro y alrededor de la mineralización volcánica-sedimentaria, y de magnetita-calcopirita ampliamente diseminada extendiéndose desde ~500 m por debajo del manto en a Andesita Inferior.
Alcaparrosa	Parte superior de Andesita Inferior y en partes basales brechizadas de domo dacítico.	La principal zona mineralizada presenta fragmentos diseminados de magnetita-sulfuro y brecha en la parte basal del domo dacítico, con superposición de venas de calcopirita.
Santos	Parte superior de Andesita Inferior y zonas brechizadas alrededor y dentro del domo dacítico.	Las zonas mineralizadas incluyen estructuras mineralizadas con vetas ricas en calcopirita y diseminadas, brechas en la parte basal del domo dacítico rellenas con magnetita-sulfuros y un cuerpo irregular en forma de tubo (dique) que corta el centro del domo dacítico.
Carola	Contacto de Andesita Inferior con el miembro volcano-sedimentario	La principal zona de mineralización ocurre como diseminaciones de magnetita/hematita-calcopirita a lo largo de vetas en zonas de fallas y en la intersección de estas con el límite superior de la Andesita Inferior.
Punta del Cobre	Parte superior de Andesita Inferior y en domo dacítico brechizado.	La principal zona de mineralización ocurre como fragmentos, diseminaciones de magnetita/hematita-calcopirita y rellenos de brechas dentro de la base y parte superior del domo dacítico y venas transversales asociadas a sulfuro.
Mantos de Cobre	Contacto de Andesita Inferior con el miembro volcano-sedimentario y estructuras transversales.	La principal zona mineralizada se produce como fragmentación de magnetita/hematita-calcopirita y diseminaciones en fallas, concentradas en la parte superior de la Andesita Inferior.
Atacama Kozan	Parte superior de Andesita Inferior y el miembro volcano-sedimentario.	La zona mineralizada representa la continuación del manto horizontal estratigráfico por el este del depósito de Candelaria y es ampliamente similar.
Candelaria Norte	Parte superior de Andesita Inferior y el miembro volcano-sedimentario.	Continuación del horizonte del manto estratigráfico hacia el norte del depósito Candelaria.
Las Pintadas	Límite superior de los sedimentos de Andesita Superior.	La mineralización ocurre en varias zonas de diseminación de calcopirita-pirita, reemplazando niveles selectivos de estratos en la base de la cuenca Chañarcillo y en la parte superior de las rocas volcánicas subyacentes.
Manolete	Sedimentos calcáreos rojizos de la Formación Nantoco.	Reemplazo masivo de magnetita de los horizontes de sedimentos de la base de la cuenca de Chañarcillo.

CAPÍTULO 3. MARCO GEOLÓGICO

3.1. Marco geológico regional

La zona de estudio se ubica en la región de Atacama, en el límite entre la cordillera costera y la Precordillera de Copiapó. La sucesión estratigráfica de la zona se caracteriza por dos etapas de evolución andina desde el Cretácico inferior al Paleógeno inferior.

La formación más importante reconocida en la primera etapa es la Formación La Negra, en donde el arco volcánico homónimo migró progresivamente al este hasta el inicio de la segunda etapa.

La primera etapa con edad del Cretácico inferior, al norte de la región de Atacama, se destaca por la presencia de la Formación Sierra Fraga, Formación Pedernales y Formación Quebrada Monardes a la latitud de Chañaral, las cuales se interdigitan unas con otras (Charrier *et al.*, 2007). De la misma manera el Grupo Chañarcillo y Grupo Bandurrias a la latitud de Copiapó. Esta interdigitación se produjo por eventos de transgresión y regresión. Continuamente hacia el Cretácico superior está la Formación Cerrillos, la cual documentaría la acumulación en una cuenca continental extensional, cuenca de trasarco, la cual sobreyace en discordancia erosiva sobre las unidades anteriormente descritas, seguida de la Formación Hornitos del Cretácico superior. La Formación Hornitos es de carácter sedimentario y volcánico, ésta yace de manera discordante sobre la Formación Cerrillos y subyace con el mismo tipo de relación a las tobas paleocenas de las calderas Lomas Bayas y Cerro Blanco.

En la Precordillera Central se exponen rocas volcánicas, sedimentarias, metamórficas e intrusivas pertenecientes al Grupo Chañarcillo, el cual comprende las formaciones Abundancia, Nantoco, Totalillo y Pabellón (Biese, 1942). De esta manera, la unidad inferior de este grupo corresponde a la Formación Abundancia; alternancias de carbonatos y rocas volcanoclásticas, seguida de calizas de la Formación Nantoco. Esta se interdigita al oeste con los depósitos volcánicos y volcanoclásticos del Grupo

Bandurrias (Segerstrom, 1968; Arévalo 1995). Además, se exponen rocas volcánicas y sedimentarias continentales de la Formación Cerrillos del Cretácico superior (Segerstrom y Parker, 1959). Estas rocas están cortadas por cuerpos plutónicos del Cretácico, en las cercanías a los intrusivos, y es posible reconocer rocas con metamorfismo de contacto.

Los depósitos del arco La Negra hacia la segunda etapa a la latitud de Copiapó, corresponden a la Formación Punta del Cobre (Charrier *et al.*, 2007). Esta formación se compone principalmente por rocas volcánicas andesíticas y dacíticas y por una sucesión volcanoclástica correspondiente a conglomerados con clastos volcánicos gruesos, pobremente estratificados y brechas con clastos que varían su tamaño, además de sedimentos de grano fino como limolitas y areniscas, en algunas áreas, estos sedimentos contienen lentes de rocas volcánicas andesíticas a basálticas masivas y *pillow lava*, lo cual es un indicativo de una depositación submarina (Marschik y Fontboté, 2001). La edad asignada para la Formación Punta del Cobre es Valanginiano inferior, debido a la presencia de ammonites encontrados al suroeste de Nantoco (Corvalán, 1974).

Además, para la segunda etapa, las unidades se cubren discordantemente por un sistema de calderas del Paleoceno con rocas volcánicas de composición ácida a intermedia y gravas terciarias.

En el área de Copiapó, estructuralmente se caracteriza el dominio de la Cordillera de la Costa y la Precordillera por distintos estilos estructurales, de tal manera que se hace una separación para su descripción y caracterización (Arévalo, 2005). En el dominio de la Cordillera de la Costa, el rasgo estructural más importante es una banda milonítica (Milonitas de Quebrada El Encierro; Arévalo, 1995), las cuales constituyen la traza principal del Sistema de Falla de Atacama (SFA; Arabasz, 1971 y Brown *et al.*, 1993). El Sistema de Falla de Atacama es un sistema de deslizamiento de arco paralelo conectado por subducción, el cual ha estado activo desde el Jurásico (Marschik y Fontboté, 2001).

El dominio de la Precordillera, se caracteriza por fallas normales de bajo y alto ángulo en el valle del río Copiapó, al sur de Paipote. En ambos flancos del valle, una falla frágil de bajo ángulo despega parcialmente de la Formación Punta del Cobre de la suprayacente Formación Nantoco (Arévalo, 2005) y existen evidencias que indican que esta estructura actuó principalmente como falla extensional durante su movimiento. Además, la zona se caracteriza por un sistema estructural, la Faja Plegada y Corrida de Paipote, el cual desplazó y deformó las secuencias del Cretácico Inferior a lo largo de la Quebrada Paipote y del valle del río Copiapó generando el Anticlinorio de Tierra Amarilla (Seegerstrom, 1968).

3.2. Marco geológico local

3.2.1. Unidades litológicas del Yacimiento Carola

Las rocas existentes en la propiedad de SCM Carola son en su mayoría estratificadas, y pertenecen a las Formación Punta del Cobre y al Grupo Chañarcillo, principalmente a la Formación Abundancia y Nantoco. Estas unidades litológicas están determinadas por la Superintendencia de geología de SCM Carola a partir de informes geológicos y columnas estratigráficas locales.

3.2.1.1. Andesitas inferiores (Kpcli)

Esta unidad litológica corresponde a las lavas inferiores de la Formación Punta del Cobre, pertenecientes al Miembro Geraldo Negro. Esta unidad se emplazó bajo condiciones de un ambiente continental en el Cretácico inferior.

Las Andesitas inferiores, son rocas originalmente andesíticas alteradas y rocas volcánicas masivas ocasionalmente intercaladas con lentes menores de sedimentos clásticos (Marschik *et al.*, 2000). Generalmente son rocas compactas con textura porfídica de color verde grisáceo o negro, con fenocristales de feldespatos de 2 mm hasta 4 mm; en pocas muestras se observan minerales máficos. Además, existen variaciones del grado de cristalización de la masa fundamental. El espesor de las

Andesitas inferiores es de 300 m y están cubiertas por rocas macizas de composición dacítica, las cuales presentan una fuerte albitización y alteración potásica (Marschik y Fonboté, 1994; 1995; 1996).

3.2.1.2. Albitófiro (ALB)

En Quebrada Meléndez se encuentran estas rocas relativamente frescas, que corresponden a las Dacitas de Meléndez, pertenecientes a la parte superior del Miembro Geraldo Negro de la Formación Punta del Cobre. Ruiz (1942), las denominó como Albitófiro, debido al conjunto de minerales albita-cuarzo-clorita. La potencia estimada para esta unidad es mayor a los 200 m (Marshik y Fontboté, 2001), y ésta se superpone como una serie de domos lava sobre las Andesitas inferiores (Kpcli) (Marschik *et al.*, 1997). El Albitófiro es una roca volcánica o subvolcánica leucocrática de granulometría fina, la cual presenta una textura porfídica con fenocristales de plagioclasa (albita-oligoclasa) y en menor cantidad biotita (Del Real *et al.*, 2018). Camus (1980) indica que el aspecto más destacado de los análisis químicos del Albitófiro es su alto contenido en SiO₂, Na₂O, Fe total y K₂O; lo cual revela un típico proceso de alteración hidrotermal, además de un fuerte metasomatismo alcalino, que implica reemplazo del calcio original de las plagioclasas (albitización).

Esta unidad se encuentra sobreyacida concordantemente por un sedimento clástico de color rojizo, el cual forma parte del Miembro Algarrobo y, el contacto entre ambas unidades es erosivo (Hopf, 1990). En Mina Carola se exhibe dicho contacto, además de intercalaciones clásticas en el Albitófiro, los cuales, por lo general son clastos poco redondeados y de tamaño aproximado de 1 cm.

3.2.1.3. Brecha de techo

Esta unidad pertenece a la parte superior del Miembro Geraldo Negro de la Formación Punta del Cobre. La Brecha de techo superpone al Albitófiro (ALB) y Andesitas inferiores (Kpcli) y en esta zona el espesor de la unidad se reduce en comparación a la

zona occidental, alcanzando un espesor estimado de hasta 25 m. En algunos sectores, esta unidad alberga mineral estratiforme y marca el límite superior de la mineralización metálica económica en el distrito Punta del Cobre.

Las Brechas de techo corresponden a brechas volcanosedimentarias matriz soportadas a clasto soportadas. Su característica petrográfica principal es el dominio de clastos centimétricos alterados a feldespatos potásico y en menor grado albita, inmersos en una matriz tamaño arena a conglomerado fino. Puede tener diseminación de sulfuros en matriz y/o clastos de sulfuros masivos. En Mina Carola en algunos sectores se puede observar la transición estratigráfica gradual desde la Brecha de techo a los Sedimentos Rojos brechizados (SR).

3.2.1.4. Sedimentos Rojos brechizados (SR)

Estratigráficamente, esta unidad corresponde a la brecha basal del Miembro Algarrobo de la Formación Punta del Cobre de edad Cretácico inferior. Al este del río Copiapó, el Miembro Algarrobo es de composición más heterogénea e incluye rocas epiclásticas con clastos de origen marino y volcánico. Comienza la sucesión sedimentaria con estas brechas sedimentarias de color rojizo, las cuales se asocian a un ambiente depositacional fluvial (Hopf, 1990). La potencia estimada para esta unidad es hasta de 25 m (Marshik y Fontboté, 2001) y petrográficamente se trata de brechas volcanosedimentarias continentales de color rojo, polimícticas, con clastos mal seleccionados y matriz tamaño arena y lutita constituida por cristales de feldespatos reemplazados por adularia, cuarzo, anhidrita, carbonato y óxidos de hierro amorfo, los cuales le confieren el característico color rojizo. La matriz se expone un mayor contenido de óxidos de hierro, tales como especularita y/o hematita. En algunos sectores se puede observar la presencia de pirita y calcopirita, y esta mineralización puede exhibirse en forma diseminada o en cúmulos de tamaño fino. El cemento de la roca está representado por carbonato.

3.2.1.5. Tobas de Agustina (TA)

Esta unidad corresponde al Miembro Algarrobo, perteneciente a la Formación Punta del Cobre. La potencia estimada para esta unidad es hasta de 60 m (Marschik y Fontboté, 2001). Las Tobas de Agustina se tratan de brechas volcanosedimentarias polimícticas de color verde oscuro a verde claro con características texturales de toba con mala selección y matriz soportadas; con presencia de clastos angulares a subredondeados de origen volcánico y composición andesítica y también de origen sedimentario. Esta unidad litológica cuenta con una predominante alteración clorítica y los clastos pueden presentar mineralizaciones de hematita, pirita y calcopirita diseminada.

Además, dentro de esta unidad es posible encontrar lentes de rocas sedimentarias químicas y clásticas finas: lutitas, siltitas, calizas, calcilutitas y sedimentos de flujo; cuyas principales características petrográficas se detallan a continuación:

I) Lutitas y siltitas: Compuestas por fragmentos de feldespato (hasta 20%), cuarzo (hasta 5%) y fragmentos de rocas eruptivas (hasta 5%), con dimensiones entre 0.2 a 0.02 mm. En cantidades subordinadas están presentes cristales de epidota y zircón. Los fragmentos de cristales tienen formas angulares.

II) Calizas y calcilutitas: Son rocas gris verdosas, compactas, compuestas por calcita microcristalina pura. Puntualmente se desarrolla un nivel de pedernal (*chert*) de color blanquecino/verdoso claro con espesores de 4-5 m.

III) Sedimentos de flujo: Compuesto por micro niveles carbonáticos finamente laminados en alternancia con niveles de sílice limonitizada. El espesor varía entre 0.5 y 10.5 mm, con un promedio de 6 m.

3.2.1.6. Sedimentos de Flujo laminados (M)

Esta unidad constituye un nivel caracterizado por una fina estratificación y microplegamiento con tramos de brechas y aspectos tipo *boudinage*. La estratificación

muy estrecha resulta por la alternancia de microniveles de lutitas y siltitas; en sectores, se observan calizas y productos volcánicos. El color de los afloramientos puede ser gris, negruzco o rojo. Localmente se asocian microniveles, nidos o clastos de jaspe rojo. El espesor de este nivel varía de 0,5 a 10,5 m, con un promedio de 6 m. Siempre se dispone sobre la unidad Tobas de Agustina y puede intercalarse en las secuencias de brechas correspondientes a los Sedimentos Rojos brechizados (SR).

3.2.1.7. Brecha volcanosedimentaria (BrVs)

Corresponde a una intercalación de brechas polimícticas volcanosedimentarias de color verde con margas, areniscas de color gris, litoarenitas de color gris a verde y lutitas silíceas de color blanco a verde claro. También es posible encontrar en esta unidad algunos niveles de *chert*. La Brecha volcanosedimentaria (BrVs), se caracteriza por presentar una textura brechosa matriz-soportada con clastos mal seleccionados. Hacia el techo de la unidad, los clastos son principalmente sedimentarios y hacia la base predominan clastos de origen volcánicos. Es común que las rocas sedimentarias presenten estructuras de estratificación, de carga, *load structures* y laminación. Además, las rocas que constituyen esta unidad presentan silicificación, cloritización y carbonatación. En cuanto a la mineralización, esta es generalmente de pirita diseminada y vetillas de óxidos de hierro.

3.2.1.8. Calizas margosas (Cm)

Esta unidad se caracteriza por presentar una alternancia rítmica entre calizas margosas de color gris y lutitas de color pardo a verde. Generalmente estas rocas cuentan con estructuras de estratificación y laminación. Además, es común encontrar en algunas zonas cloritización y minerales como pirolusita y diseminación fina de pirita.

3.2.1.9. Diques Lamprofíricos

Se trata de cuerpos hipabisales con morfología tabular de espesor variable con una media de 1.5 m, los cuales cortan todas las unidades estratigráficas presentes en Mina

Carola. Estos diques se emplazan en planos de fallas preexistentes y coexisten con vetas de calcita. Petrográficamente, se definen como rocas mesocráticas de color gris-pardo con aspecto ‘manchado’ asociado a fenómenos de contacto térmico. Su composición mineralógica es de olivinos integralmente reemplazados por un material isótropo o criptocristalino de color verde, el cual conserva el cristal euhedral. También se compone de cristales de anfíbol reemplazados por uralita y augita. En cuanto a la masa fundamental es de textura microholocristalina orientada, formada principalmente por cristales alargados de plagioclasa con variados estados de alteración, ya sea argílica o sericítica, además de piroxeno y material de color verde isótropo. Las alteraciones más comunes en esta roca son la serpentización, alteración sericítica y alteración carbonática.

3.2.1.10. Diorita

Unidad intrusiva-hipabisal, la cual tiene un mayor desarrollo en el extremo suroriental de la Mina Carola, es decir, en el sector Teresita Sur. Esta unidad agrupa a gabros, dioritas y dioritas cuarcíferas, microdioritas y microdioritas cuarcíferas. El emplazamiento de esta unidad logra cortar toda la secuencia estratigráfica del área, sin embargo, las Microdioritas y Microdioritas cuarcíferas se emplazan como *sill* entre las Andesitas inferiores (Kpcli) y la Brecha de techo. Las Dioritas presentan específicamente piritita, por lo cual no se consideran como una unidad de interés económico en Mina Carola.

3.2.2. Geología estructural del Yacimiento Carola

El control estructural de la Mina Carola está dado por la tectónica general del Distrito Minero Punta del Cobre, la cual consiste principalmente en un sistema de fallas de orientación NNO-SSE y NNE-SSO que generan un descenso del bloque occidental, originando una tectónica de bloques en forma de *horst* y *graben*. Esto ayuda a la intrusión de los cuerpos, al control estructural de los fluidos hidrotermales y al emplazamiento de los depósitos minerales. En Bateas, zona perteneciente a la Mina

Carola, ex Mina Agustina, zona ubicada en la parte sur del Distrito Minero Punta Del Cobre a unos 15 km. Lino (1984) determinó tres grupos estructurales principales:

1. Fallas, vetas, vetillas y diaclasas. Estas se distribuyen ampliamente en la unidad volcánica y en menor proporción en la unidad volcano-sedimentaria. Las fallas se clasifican en pre y post mineralización
2. Imbricación, estratificaciones gradadas, marcas de fondo y *ripple-mark*. Estas son estructuras sedimentarias, las cuales se distribuyen en las rocas volcanosedimentarias.
3. Pliegues, estructuras debidas a flujo y brechas de deslizamiento gravitacional, las cuales se distribuyen en la parte basal de las rocas pertenecientes al Miembro Algarrobo de la Formación Punta del Cobre.

En consecuencia, en la Mina Carola se han definido estructuras mayores, las cuales son un factor determinante en la distribución de la mineralización, estas son:

Fallas N20-40W/65-90°SW: Dentro de este sistema se encuentran las fallas que controlan el emplazamiento del Cuerpo Principal; Falla Cuerpo Principal Norte, Falla Cuerpo Principal Sur y Falla Cuerpo Principal Satélite. Además de la Falla Pepito-Laboratorio, la cual controla al Cuerpo Pepito y finalmente la Falla Central y Falla Central Cola, las cuales dominan al Cuerpo 3.

Fallas N40-60W/30-50°SW: Este sistema de fallas se compone principalmente por la Falla Cobriza, Falla Cuerpo 8, Falla 919B y Falla Cuerpo 1, las cuales controlan el emplazamiento y distribución de la mineralización en el Cuerpo 8, Cuerpo 919B, y Cuerpo 1, respectivamente.

La relación temporal entre ambos sistemas de fallas mencionados anteriormente, aún no está definida. Sin embargo, la interacción entre estos sistemas genera cuencas caracterizadas por caídas de hasta 200 m en la vertical en el techo de la unidad de Andesitas inferiores (Kpcli). La formación de estas depresiones ayuda al desarrollo de la

unidad Brecha de techo y Sedimentos Rojos brechizados (SR), originando por consecuencia, mayor mineralización tipo manto (Pop N. *et al.*, 2008).

También existen otros sistemas de fallas, los cuales son posteriores a los sistemas de fallas anterior, sin embargo, su relación con los cuerpos mineralizados aún no está completamente definida, estos sistemas son:

Falla NS-N20W/subverticales: En este sistema se encuentra la Falla Diez, la cual se intercepta y corta a la Falla Cuerpo Principal, segmentando en Falla Cuerpo Principal Norte y Cuerpo Principal Sur.

Fallas N70E-EW/ subverticales: Se trata de fallas de corridas kilométricas, las cuales constan con Diques Lamprofiricos asociados. En este sistema se encuentra la Falla Dique NE Norte y Falla NE Central.

3.2.3. Mineralización del Yacimiento Carola

El marco geológico ubica al depósito en un ambiente de cuenca marina, que inicia su formación con el flujo de coladas andesíticas con claras evidencias de depositación subacuática. Según Lino (1984), entre los dos últimos eventos de flujo existen niveles de exhalitas que señalan la depositación de sedimentos químicos complejos debidos a emanaciones volcánicas. Este volcanismo inicial andesítico convertido deutericamente en espilitico grada en el tiempo a términos más ácidos. La resurgencia del volcanismo continúa con la inyección de filones lamprofiricos y depositación co-genética de tobas brechosas y lavas andesíticas y, finalmente ciclos de depositación de sedimentos carbonatados van cerrando el desarrollo de la cuenca. Así, la mineralización toma lugar luego de la depositación del flujo de lava que cierra el primer episodio volcánico. Además, las estructuras en extensión y los fenómenos de consolidación magmática por mezcla con agua de mar, provocan primero la formación de cuerpos de hierros macizos, luego el evento cuprífero que aloja calcopirita maciza en vetas complejas; brechas tabulares, vetas macizas, diseminaciones y *stockwork* en el sector oriente, parte profunda del *rift* y de mayor control estructural. Mientras que en el sector occidental forma brechas y mantos de sulfuros de hábito masivo. También con el volcanismo resurgente

se exhalan contenidos polimetálicos residuales, depositando disseminaciones en piroclastitas, esfalerita y pirita (Lino, 1984).

A continuación, se describen las cinco etapas de mineralización definidas por Lino (1984) para Mina Carola:

- 1. Espilitización:** Esta etapa se denomina de esta manera por la transformación de una probable Andesita original a Albitófiro, transformando una mineralogía primaria de plagioclasa cálcica, máficos y vidrio ferrífero en un agregado de clorita, epidota, albita y sílice residual y hematita. Es una etapa de preparación del flujo volcánico para recibir la mineralización, y cuando el flujo entra en contacto con el agua de mar en las etapas de enfriamiento induce al intercambio de Na por Ca en las plagioclasas. Los residuos de sílice, hierro oxidado y calcita que no alcanzan a formar minerales en la roca, son liberados al fondo marino y forman exhalitas con bandas de *chert*.
- 2. Etapa ferrífera:** Denominada así por la depositación esencial de hierro, corresponde a los primeros intentos de mineralización que muestra el flujo andesítico. Se forma magnetita, hematita acompañados de pequeñas cantidades de sílice y pirita por el aporte del hierro liberado en el primer evento y otro por los fluidos residuales del fundido. El ambiente se caracteriza por temperatura alta, fugacidad de O₂ y pH ácido, por el mar, ya que existe mayor contenido de NaCl.
- 3. Etapa Cuprífera:** En esta etapa, los últimos fluidos ricos en Cu, S y Ca (que no formó plagioclasa-Ca por las reacciones espiliticas), emergen por los canales estructurales preparados y se depositan formando diversos cuerpos mineralizados. Esta mineralización primaria está compuesta por minerales metálicos principales, tales como: calcopirita, pirita marcasita, hematita (especularita), magnetita (mushketovita) y arsenopirita, pirrotina, esfalerita y galena en cantidades menores. Estrechamente ligado a la pirita y calcopirita

aparece el oro nativo. Los minerales no metálicos asociados son el cuarzo, feldespato, actinolita, biotita, clorita, calcita y con menor frecuencia epidota, esfeno, turmalina y orthita.

4. **Evolución del vulcanismo a términos bimodales:** En esta etapa, el vulcanismo evolucionó y centros volcánicos alejados erupcionaron piroclastitas; la ceniza, en casos se desplazó al fondo marino mezclada con escombros andesíticos de falda o en forma de flujos de ceniza.
5. **Culminación del vulcanismo y depositación de sedimentitas:** Esta etapa selló la formación del yacimiento, y posteriormente la acción exógena expuso al depósito y lo alteró formando zona de oxidación y enriquecimiento secundario. Gran parte de esta zona fue eliminada por la incisión moderna del río Copiapó, sin embargo, el carácter macizo de la mineralización supo mantener el alto valor económico. De esta manera en sectores puntuales superficiales de Mina Carola, tales como Esmeralda, Manto Geraldo, Bateas, Unión y Bateas, se han generado zonas con minerales oxidados de cobre. Esto mediante procesos de oxidación y enriquecimiento supérgeno, generando malaquita, atacamita, azurita, crisocola, sulfatos de cobre, cuprita, cobre nativo y abundantes óxidos hidratados de hierro, y como ganga; cuarzo, clorita, calcita, yeso y baritina.

De esta manera, en la Mina Carola, la mineralización de importancia económica son los sulfuros de cobre, hierro y zinc, asociados a óxidos de hierro con altas concentraciones locales (Pop *et al.*, 2008). El mineral de interés económico principal es la calcopirita, sin embargo, también se encuentra pirita, marcasita y esfalerita (trazas), y contenido de oro y plata. Además, existe una gran mineralización de magnetita, mushketovita o especularita-hematita. En cuanto al oro este se concentra en granos de tamaño de pocos micrones en la estructura interna de la calcopirita y en menor medida en la pirita.

La calcopirita, se relaciona con casi todas las fases minerales presentes en Mina Carola presentándose con formas globulares y alargadas, además de forma maciza en textura de

intercrecimiento con esfalerita y pirita, reemplazando a esta última en sus bordes y fracturas. En el yacimiento, a medida que aumenta la profundidad, se hace presente la esfalerita, la cual presenta texturas de exsolución con la calcopirita e intercrecimiento y sustitución recíproca. También es común encontrar asociaciones de magnetita y hematita, en formas idiomorfas, en donde la calcopirita rellena espacios vacíos como cemento de los granos de magnetita, en cuanto al oro este se encuentra en la calcopirita como inclusión o relleno de pequeñas fracturas (Tarnovschi, 1999).

La segunda fase mineral más común en Mina Carola es la Pirita, ésta se encuentra asociada principalmente a calcopirita, esfalerita, y en menor proporción con la magnetita y hematita. Según Tarnovschi (1999) existen dos generaciones de pirita: la pirita I, la cual se relaciona a la magnetita y hematita y; la pirita II, asociada a la calcopirita, hematita y magnetita-mushketovita. Otro mineral asociado a la pirita es la pirrotina.

En el cuerpo central de Mina Carola se encuentra la fase mineral esfalerita, la cual se encuentra específicamente en los niveles inferiores de la mina y se asocia principalmente a la calcopirita, en menor cantidad al oro y plata y con menor frecuencia a la magnetita y pirita.

La magnetita, es muy frecuente a medida que aumenta la profundidad del yacimiento y esta se presenta en dos variedades: magnetita I, la cual ocurre generalmente como granos monominerales o mostrando contactos nítidos con calcopirita, pirita y en menor proporción con esfalerita, además de presentar texturas de reemplazo por hematita (martitización). La magnetita II mushketovita, es el reemplazo de hematita por magnetita.

La mushketovita, ocurre por efecto de un reemplazo hipógeno de los cristales de hematita por magnetita, con la particularidad de conservar los contornos del mineral primario. Este tipo de mineral se asocia con minerales ganga como actinolita, cuarzo y con masas de pirita.

En cuanto al control estructural, este se rige por fallas de pre mineralización, y se ve en las vetas y/o brechas. El control litológico está dado por la presencia del límite contacto

entre la unidad volcánica y unidad volcanosedimentaria, o más exactamente el nivel exhalítico, de tal forma que sobre este límite no existe mineralización. La mineralización primaria está mayormente hospedada en la unidad Andesitas inferiores (Kpcli) y Albitófiro (ALB), sin embargo, también existe mineralización en la unidad Brecha de Techo y Sedimentos Rojos brechizados (SR), teniendo este último un desarrollo mineralógico espacialmente menor. En general, la mineralización se profundiza en dirección sur, lo cual es consistente con el buzamiento de las Andesitas inferiores (Kpcli) y esta está dada por cuatro formas de ocurrencia principales: veta, *stockwork*, brecha, manto y diseminación.

Veta: Corresponde al tipo morfológico más común en el yacimiento, coinciden en general con fallas pre-minerales asociadas especialmente a mineralización de calcopirita, pirita, esfalerita y calcita. Su potencia varía entre 0.1 a 1 metro, existiendo vetas que pueden llegar hasta más de 5 m, estas vetas se disponen en dos sistemas principales: vetas de rumbo norte N25°W con inclinaciones variables entre 30° al W y 48° al E y vetas de rumbo N20° a 60°W con inclinaciones de 65° a 80° W. Las principales vetas se encuentran entre el Cuerpo Principal y Bateas en la unidad Andesitas inferiores (Kpcli), Albitófiro (ALB) y Brecha de techo (Sepúlveda, 2017).

Stockwork: Tipo de morfolología asociado o no con las vetas, la cual consiste en vetillas, fracturas polidireccionales e impregnaciones de minerales de cobre y ocasionalmente con minerales de hierro en las Andesitas inferiores (Kpcli), Albitófiro (ALB) o intrusiones. Puede alcanzar una extensión de 12 a 25 m, y aumenta la potencia de los cuerpos mineralizados, logrando en algunos sectores potencias mayor a 40 m (Tarnovschi, 1999).

Brecha: Estos cuerpos de brechas se forman en las cercanías de las estructuras mayores principales, debido al alto grado de fracturamiento característico en estas zonas. De esta forma se generan brechas mineralizadas en las zonas de contacto entre las rocas sedimentarias y las Andesitas inferiores (Kpcli) y/o Albitófiro (ALB). Dependiendo de la falla controladora, estos cuerpos pueden ser subverticales como en el Cuerpo Principal

o con inclinaciones de hasta 45° al W como en el Cuerpo 8. Los cuerpos subverticales alcanzan una altura de 70 a 80 m con diámetros de hasta 50 m, constan de una sección elíptica irregular y normalmente se componen de núcleos más brechosos que gradan hacia el exterior a *stockwork*, vetillas y disseminaciones (Lino, 1984). En los niveles inferiores de la columna mineralizada, son comunes los cuerpos de brecha predominantemente de magnetita, asociada a alteración feldespática y/o actinolítica. En cuanto a la composición, consiste en clastos angulares de tamaño variable de lavas andesíticas de la unidad Andesitas inferiores (Kpcli) y/o Albitófiro (ALB) y cemento de sulfuros; calcopirita más pirita y óxidos de hierro. Así, la mineralización ocurre como cemento y matriz, con minerales asociados como hematita, calcita y cuarzo.

Manto: Los mantos de sulfuros macizos, mantos o bandeados, se encuentran yaciendo sobre el contacto entre las rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Abundancia y unidad Andesitas inferiores (Kpcli) y/o Albitófiro (ALB), estos cuerpos mantiformes con de extensión de 200 m de largo y ancho y de 20 m en la vertical. La mineralización consta de calcopirita y pirita, comúnmente se trata de estructuras de depositación sedimentaria como laminación, estratificación cruzada, estratificación gradada, pliegues y brechas de deslizamiento gravitacional (Lino, 1984). Los minerales de ganga que acompañan la mineralización son calcita, actinolita, cuarzo, feldespatos, anhidrita y yeso.

Diseminación: Este tipo de ocurrencia mineral corresponde principalmente a calcopirita y pirita en la unidad de las Andesitas inferiores (Kpcli) y en la matriz de la Brecha de techo. Las disseminaciones finas pueden, ocasionalmente determinar cuerpos rentables y por lo general este tipo de mineralización se da de forma complementaria a otros tipos morfológicos de ocurrencia.

3.2.4. Alteración hidrotermal del Yacimiento Carola

Según Tarnovschi (1999), las alteraciones hidrotermales presente en el Yacimiento Carola de acuerdo a estudios microscópicos y mapeo interior mina son:

Actinolitización

Esta alteración es el fenómeno más antiguo en el desarrollo del proceso alteración-mineralización para el Distrito Minero Punta del Cobre. La actinolitización está asociada a la carbonatación, silicificación y cloritización. La actinolita está ligada a los óxidos de hierro, como magnetita, mushketovita, generalmente hacia la zona inferior del yacimiento, y se asocia con hematita-especularita en los niveles superiores. En los niveles inferiores del yacimiento existen grandes cantidades de óxidos de hierro y la actinolita generalmente es el único mineral de alteración presente. Esta se forma como cristales alargados, sin orientación preferencial y se presenta en relleno de vetillas o conformando *stockwork*, siempre relacionado a la mineralización de óxidos de hierro.

Alteración potásica

Se presenta principalmente en la unidad Andesitas inferiores (Kpcli) y en las rocas ígneas intrusivas presentes en Mina Carola. Se trata de la alteración más antigua y común en el área, la cual se presenta con distintas intensidades. Por lo general las rocas alteradas se encuentran compactas o parcial y completamente recristalizada. Sin embargo, en algunos casos la roca se brechiza, como es el caso de la unidad Brecha de techo, la cual se ubica en el contacto entre la unidad Andesitas inferiores (Kpcli) y Sedimentos Rojos brechizados (SR). Esta brecha se caracteriza por tener clastos inmersos en una matriz constituida por feldespato potásico, y se asocia a la zona de mineralización, constituida principalmente por pirita y calcopirita. De esta manera, este tipo de alteración se genera principalmente en las zonas de contacto entre las estructuras mineralizadas con la roca de caja, área en donde existió un mayor aporte de los fluidos hidrotermales a temperaturas más altas. La alteración feldespato-potásica está asociada con cloritización y biotización, con una asociación menor con sericitización y silicificación. Los minerales característicos son adularia y en menor grado la ortoclasa. La adularia se asocia con clorita laminar, turmalina, biotita y sericita, se presenta

reemplazando a la plagioclasa, como relleno de fisuras o formando vetillas posteriores, lo cual denota la presencia de otra etapa de alteración potásica.

Albitización

Esta alteración se debe al proceso de metasomatismo sódico y se presenta en menor grado que la alteración potásica. Ocurre en plagioclasa, la cual no fue afectada por la alteración potásica, y se encuentra principalmente en cristales pertenecientes a la masa fundamental de las Andesitas inferiores (Kpcli) y el Albitófiro (ALB). La albitización se asocia con la cloritización y la sericitización y en menor grado con la biotización.

Cloritización

Este tipo de alteración es la más común y afecta a las rocas de todas las unidades presentes en Mina Carola, siendo más frecuente en la unidad de Andesitas inferiores (Kpcli) y en las rocas intrusivas. Los minerales del grupo de las cloritas se presentan en las rocas producto de un metamorfismo regresivo o producto de una alteración hidrotermal. En ésta última, frecuentemente la clorita se asocia con cuarzo, feldespato potásico y calcita. Los minerales máficos son los más afectados, tales como, piroxenos, biotita y anfíboles, de esta manera, en las andesitas, la cloritización se presenta como láminas diseminadas en la masa fundamental y en el caso de las brechas se presenta en la matriz. El grupo de cloritas ferro-magnesianas (pennina) es más frecuente que el grupo de cloritas magnesio-férricas. La cloritización se encuentra asociada principalmente con la alteración potásica, carbonatación, silicificación, albitización y en menor grado con la sericitización.

Sericitización

Este tipo de alteración ocurre principalmente en la unidad Andesitas inferiores (Kpcli) y afecta a las plagioclasas, tanto a los fenocristales como a la masa fundamental, afectando a las rocas en diferentes intensidades. Por lo general la sericitización se presenta como

aleatoria en las plagioclasas, pero existen casos en que se forman sobre fisuras, clivajes u otros accidentes estructurales que presenta el cristal. La sericita se asocia con clorita, adularia, cuarzo, calcita, albita, esfeno y altera de modo parcial o total a las plagioclasas.

Biotización

Representa uno de los primeros procesos de alteración hidrotermal en la sucesión de procesos metasomáticos-hidrotermales en el yacimiento. Esta alteración se relaciona con la alteración potásica y en menor grado con la sericitización. Está caracterizada por la formación de biotita verde, la cual se presenta como agregados de láminas finas o aglomeraciones de cristales asociados a minerales máficos como el piroxeno, biotita y anfíbol. La biotita verde se asocia con adularia, turmalina, cuarzo, sericita y posteriormente pasa a clorita y ocasionalmente a leucóxeno.

Silicificación

La silicificación como alteración hidrotermal representa un proceso que se desarrolló con posterioridad, afectando tanto a la unidad Andesitas inferiores (Kpcli) como a las rocas intrusivas. Esta alteración se relaciona principalmente con la alteración potásica, la cloritización y la carbonatación. Se caracteriza por la formación de cuarzo, el cual rellena fisuras, formando nidos y a veces formando vetillas polidireccionales; *stockwork*. Las vetillas de cuarzo ocasionalmente presentan una relación directa con calcita formada en los bordes de estas. En cuanto a las zonas brechizadas ligadas a las estructuras mineralizadas, la silicificación actúa como cemento, y en la roca de caja conforma *stockwork* de cuarzo. Generalmente el cuarzo se relaciona con el feldespato potásico, adularia, clorita, calcita, zircón, turmalina y allanita.

Carbonatación

Este tipo de alteración ocurre antes y durante todo el proceso hidrotermal asociado a la mineralización de la Mina Carola. Se asocia principalmente a la silicificación, y también

en menor grado con la alteración potásica, la cloritización y la sericitización. Las soluciones carbonáticas presentan alta movilidad, por lo cual migran hacia la superficie y logran depositarse en fisuras y zonas estructuralmente débiles, logrando de esta forma, la principal ocurrencia como vetas. El mineral característico es la calcita, el cual se presenta como relleno de diaclasas y vetillas, conformando zonas de *stockwork*. La calcita se sobrepone a algunos minerales, invadiendo de forma parcial o total a algunos cristales de plagioclasas presentes en las rocas y se asocia generalmente con cuarzo, además de clorita, biotita y feldespatos; y en cuanto a minerales de mena, se asocia a calcopirita, esfalerita, pirita y tetraedrita. En superficie, las estructuras con calcita se asocian con arcillas, limonitas, sílice, óxidos de cobre y/o cobre nativo. De esta forma la calcita asociada a la unidad Andesitas inferiores (Kpcli), presenta un origen en profundidad, a diferencia de la calcita de origen marino, la cual se asocia a las rocas expuestas en Minera Carola pertenecientes a la Formación Abundancia.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Para la obtención de los resultados requeridos, se necesitó de cinco etapas; primero se hizo una revisión y compilación de trabajos anteriores a nivel local y regional, luego se realizó una caracterización litológica a partir de información obtenida del re-logueo de 21 sondajes ejecutados en el sector Adriana Norte entre los años 1990 a 2012. Posterior a la caracterización litológica, se creó una columna estratigráfica tipo para Adriana Norte. Luego se realizó la digitalización de los datos obtenidos a partir el logueo para la creación del modelo geológico de la zona mediante el software Leapfrog, el cual posteriormente fue validado y finalmente se realizó un análisis de la información obtenida.

4.1. Análisis bibliográfico.

En la primera etapa de este trabajo se desarrolló una investigación y revisión bibliográfica exhaustiva con el propósito de conocer los depósitos IOCG, la geología del Distrito Minero Punta del Cobre, además de la geología local y estructural de la Mina Carola. La recopilación de información se realizó a través de artículos científicos y cartas geológicas, además información local entregada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola. El análisis bibliográfico se realizó enfatizando en la litología y estratigrafía del distrito, para tener noción de cuáles unidades litológicas podrían formar parte de Adriana Norte.

4.2. Caracterización litológica.

En esta etapa, se realizó una caracterización litológica a partir de información recolectada mediante el logueo de testigos diamantinos. Primeramente, se hizo una selección de 21 sondajes, los cuales necesitaban volver a loguearse, para esto se realizaron tres secciones en la zona de estudio (Figura 6): Adriana 02, Adriana 05 y Adriana 07, también se seleccionaron sondajes puntuales de interior mina y sondajes de superficie. Cabe destacar que los sondajes fueron seleccionados por la Superintendencia

de geología de SCM Carola. El criterio de selección fue considerando errores en la caracterización litológica anteriormente realizada a partir del logueo de sondajes, los cuales generaban inconsistencias espaciales en el modelo existente de Adriana Norte, es decir, errores en la definición y potencia de litologías. La información recolectada en el mapeo anterior al realizado en este trabajo, se realizó de forma manual, sin contar con alguna pauta geológica para su realización, por esta razón, las descripciones y clasificaciones de rocas eran muy amplias, sin permitir la asignación de las litologías a alguna unidad litológica para efectos de construcción del modelo geológico. De esta forma, se seleccionaron todos los sondajes de superficie ya que estos cortaban la estratigrafía de manera perpendicular. Además, de sondajes puntuales elegidos estratégicamente para completar la información de los sondajes de superficie. Cabe destacar que también se consideró la disponibilidad de los sondajes para reloguear, es decir, que éstos se encontraran en las testigotecas de Tierra Amarilla para más fácil acceso.

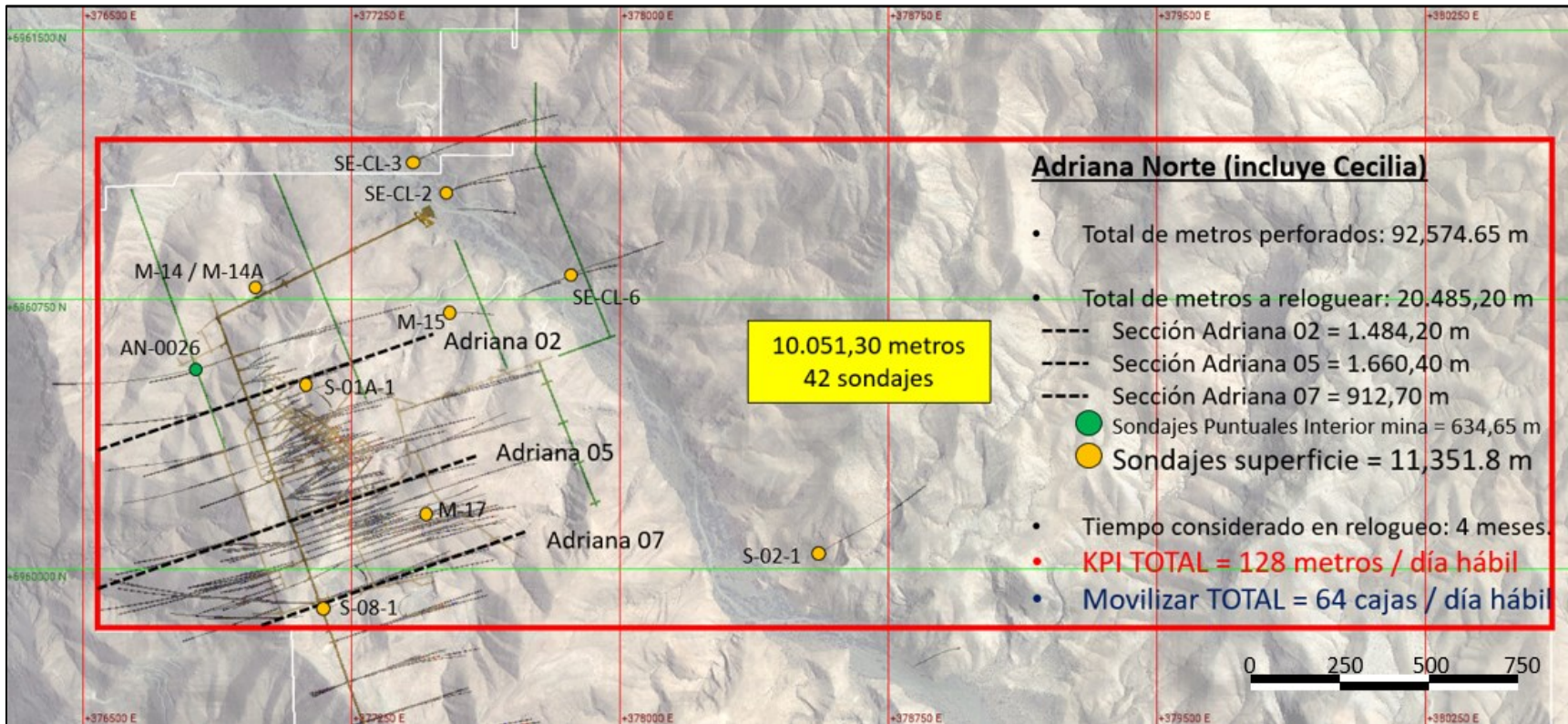


Figura 6. Selección de sondajes y planificación de logeo de sondajes para el sector Adriana Norte.

De esta manera, se hizo una selección de 7 sondajes superficiales y 14 sondajes en Rampa Meléndez. En la Tabla 2 se muestran las principales características de los sondajes seleccionados.

Tabla 2. Tabla 2. Sondajes utilizados para el logeo con sus respectivas características principales.

Sondaje	NORTE	ESTE	Collar	Azimut	Inclinación	Largo (m)	Sector	Nivel	Diametro	Año
M-14	6960775	376979	664.37	74.57	-79.2	332.5	Adriana Norte	Superficie	DTH-NQ	1997
M-14A	6960776	376980	664.16	64.88	-64.3	375.35	Adriana Norte	Superficie	HQ-NQ	1997
SE-CL-2	6961041	377501	597.05	65.42	-55.02	496.45	Quebrada Melendez	Superficie	HQ-NQ	2004
SE-CL-3	6961131	377420	591.22	65.25	-55.68	532.6	Quebrada Melendez	Superficie	HQ-NQ	2004
AN-0026	6960586	376907	525.56	251.1	-42.95	634.65	Adriana Norte	Rampa Melendez Est. 01W	NQ	2006
M-15	6960708	377522	692.36	76.19	-73.63	532.25	Adriana Norte	Superficie	HQ-NQ	1997
SE-CL-6	6960756	377716	624.62	65.27	-60.1	562.15	Quebrada Melendez	Superficie	HQ-NQ	2004
AN-0039	6960477	376967	511.09	249.6	-43.15	595.05	Adriana Norte	Rampa Melendez Est. 02W	NQ	2006
AN-0034	6960479	376973	511	67.11	-57.58	227.8	Adriana Norte	Rampa Melendez Est. 02E	NQ	2006
AN-0030	6960479	376973	511.64	69.19	-25.22	379.85	Adriana Norte	Rampa Melendez Est. 02E	NQ	2006
AN-0025	6960479	376973	512.31	70.12	-9.14	281.9	Adriana Norte	Rampa Melendez Est. 02E	NQ	2006
S-01A-1	6960514	377112	745.98	86	-80	516.55	Adriana Norte	Superficie	4 3/4 - NQ	1994
AN-0001	6960128	377059	469.58	250.3	7.88	308.65	Adriana Norte	Rampa Melendez Est. 05W	NQ	2005
AN-0003	6960126	377058	468.74	249.4	-18.97	514.25	Adriana Norte	Rampa Melendez Est. 05W	NQ	2006
AN-0015	6960141	377094	468.48	68.97	-47.33	311.45	Adriana Norte	Rampa Melendez Est. 05E	NQ	2006
AN-0008	6960141	377094	469.32	69.56	-4.37	526.05	Adriana Norte	Rampa Melendez Est. 05E	NQ	2006
M-17	6960165	377439	870.07	69.45	-71.67	608.95	Adriana Norte	Superficie	HQ-NQ	1997
AN-0353	6959964	377314	454.06	70.3	-8.5	359.1	Adriana Norte	Conexion 5-7 Est. 07E	NQ	2010
S-08-1	6959903	377216	896.87	69.49	-75.14	733.7	Adriana Norte	Superficie	HQ-NQ	1995
S-02-1	6960039	378550	679.81	59.08	-60.3	668.45	Quebrada Melendez	Superficie	5 1/8 - NQ - BQ	1994
AN-0029	6959905	377144	443.22	270.1	-12.75	553.6	Adriana Norte	Rampa Melendez Est. 07W	NQ	2006

Una vez realizada la selección de sondajes, estos fueron desplegados en testigoteca de Tierra Amarilla, SCM Carola, en donde se realizó un movimiento de cajas de 64 cajas por día hábil, y se cumplió un indicador clave de rendimiento (KPI) mínimo de logueo de 128 m por día hábil, con un total de 10.051,3 m logueados en 4 meses. El logueo se realizó de forma manual, sobre las hojas impresas del logueo digital original en GVMapper. Para esto se consideraron las litologías ya existentes en Mina Carola, sin embargo, en caso de no encontrar coincidencias se procedió a crear nuevas litologías.

Para la caracterización litológica, se hizo una descripción textural, mineralógica porcentual, de alteración en base al porcentaje de roca afectada; alteración leve (5-35%), alteración intermedia (35-65%) y alteración intensa (65-100%) y la existencia de estructuras. En cuanto a las rocas ígneas, se realizó la clasificación mediante el uso del diagrama de Streckeisen (Streckeisen, 1976) y para las rocas sedimentarias detríticas se hizo uso de la clasificación de Pettijohn (1987) describiendo el tamaño de grano y composición del sedimento, redondez de grano mediante la escala de comparación visual de Powers (1953) y selección de los granos, para indicar el grado de similitud de los tamaños de los clastos dentro del conjunto de la muestra. Para las rocas carbonáticas, se utilizó la clasificación de Dunham (1962). Además, a cada roca se le asignó un color de acuerdo a las descripciones preexistentes utilizadas por la Superintendencia de Geología de SCM Carola, se especificó la ocurrencia de los minerales de mena y se determinó la existencia de estructuras; principalmente fallas y diques.

Finalmente se realizó la digitalización de la información obtenida a partir del logueo en archivo Excel para crear una base de datos en GVMapper, la cual posteriormente se ingresó al software Leapfrog para la creación del modelo geológico.

4.3. Creación de columnas estratigráficas para Adriana Norte.

Para la creación de las columnas estratigráficas se utilizó el software SedLog 3.1. Las columnas se generaron de acuerdo a las unidades litológicas definidas para Adriana Norte, enfatizando en las características principales de cada una (Figura 7), tales como: tipo de litología predominante, espesor de los estratos, contactos entre cada unidad y formación litológica a la cual pertenecen.

The image shows the 'Properties' window of the SedLog 3.1 software, specifically the 'Other' tab. The window is divided into several sections for configuring stratigraphic columns:

- General:** Includes fields for 'Thickness (cm): 100', 'Facies: 0', 'Base Boundary: <none>', 'Notes' (a text area), and 'Palaeocurrent Values'.
- Lithology 1, 2, and 3:** Each section has dropdowns for 'Group' and 'Type' (all set to '<none>'), a 'Percentage %' field (set to 100 for Lithology 1 and 0 for 2 and 3), and a square symbol icon with an 'X'.
- Grain Size:** Contains dropdowns for 'Mud/Sand/Gravel' (Base and Top) and 'Limestones' (Base and Top), all set to '<none>'.
- Symbols in Bed:** Features dropdowns for 'Group' and 'Type' (both '<none>'), a 'Use Lithology 1' checkbox (unchecked), and a 'Tiled' checkbox (checked).
- Structures/Fossils:** Includes a 'Symbols' dropdown (set to '<none>') and 'Add...' and 'Delete' buttons.
- Bioturbation:** Has a 'Type' dropdown (set to '<none>') and an 'Intensity' field (set to 0).
- Age:** Includes a 'Text' field and a 'Boundary' dropdown (set to '<none>').
- Formation:** Includes a 'Text' field and a 'Boundary' dropdown (set to '<none>').

Figura 7. Planilla de software SedLog 3.1 para la construcción de estratos para la generación de columnas estratigráficas.

De esta manera, realizaron tres secciones con dirección E-W (Figura 8) en la zona norte, centro y sur de Adriana Norte. De tal manera que cada sección contara con una distribución significativa de sondajes para la caracterización estratigráfica de las unidades litológicas respectivas, además de las leyes porcentuales de cobre y los minerales principales de alteración. De esta forma, se determinaron los espesores de las unidades litológicas a partir de la revisión de la información digitalizada obtenida en la segunda etapa metodológica y las edades de cada unidad se determinaron en base a las definidas por Del Real (2018) para las unidades pertenecientes al Miembro Geraldo Negro de la Formación Punta del Cobre.

La columna estratigráfica de la Sección Norte con coordenada UTM 6.960.684N, se realizó a partir de las descripciones de los sondajes: AN-0030, AN-0026, M-14, SE-CL-6, M-15 y M-14A.

La columna estratigráfica de la Sección Centro con coordenada UTM 6.960.342N, se realizó a partir de las descripciones de los sondajes: M-17, S-01A-1, AN-0034 y AN-0039.

La columna estratigráfica de la Sección Sur con coordenada UTM 6.960.038N, se realizó a partir de las descripciones de los sondajes: S-08-1, AN-353, AN-0015, AN-0029, AN-0001 y AN-0003.

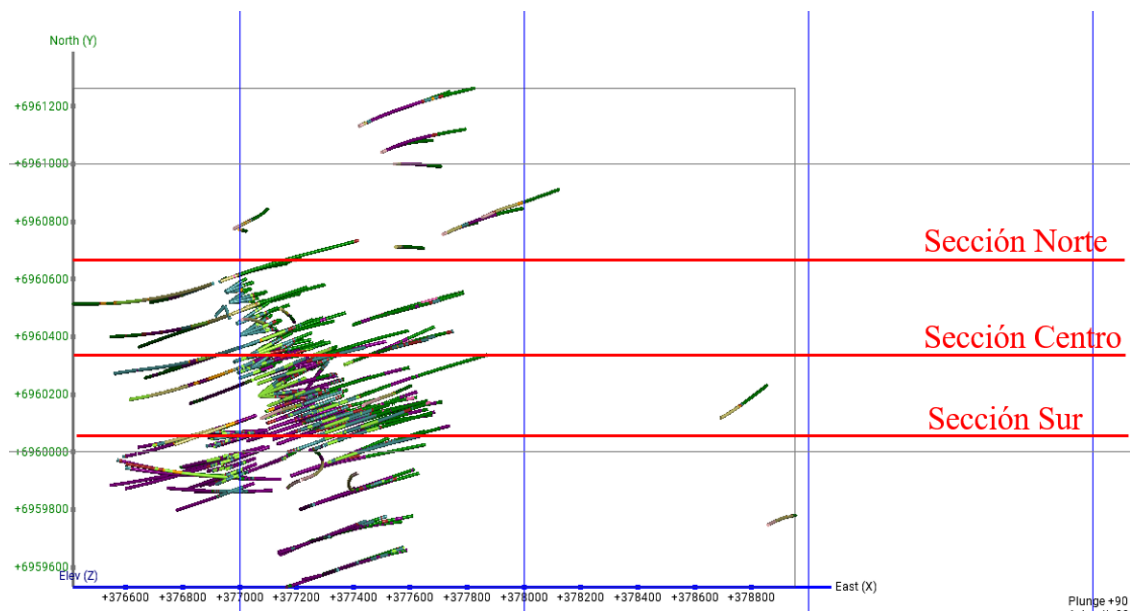


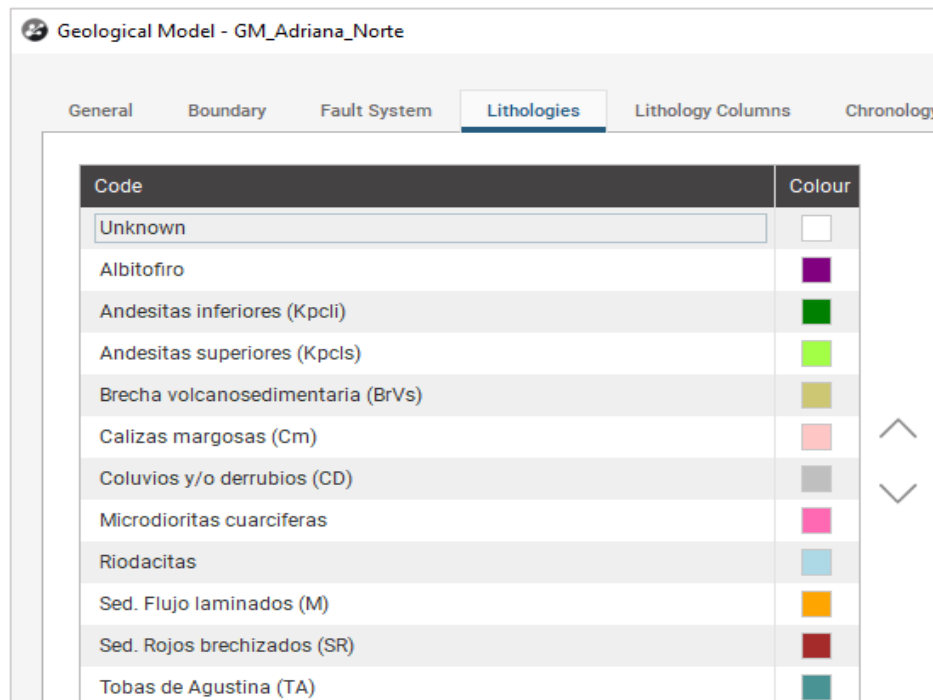
Figura 8. Secciones realizadas en Adriana Norte para la construcción de 3 columnas estratigráficas.

Para la creación de la columna tipo para Adriana Norte, se consideró la edad de las unidades litológicas. A modo de notas, se identificó el nombre de cada unidad litológica. Además, se determinó la escala, en función de los espesores máximos de cada unidad. Posteriormente se realizó una modificación en Adobe Illustrator, para términos estéticos, en donde se modificaron los colores de cada unidad estratigráfica de acuerdo a la litología predominante en conjunto con el cambio de los bordes de cada unidad generada.

4.4. Creación del modelo geológico en software Leapfrog 2023.1.

Para la creación del modelo geológico, se utilizó la información obtenida a partir de 42 sondajes, de los cuales 21 fueron re-loqueados en este trabajo. De esta forma, La caracterización litológica realizada en la segunda etapa fue digitalizada en archivo Excel con la estructura requerida por el software GVMapper. De esta forma, el formato de lectura del archivo, entregaba el nombre del sondaje, el desde y hasta de la perforación en m, el grupo litológico: sedimentario, volcanosedimentario, extrusivo, hipabisal o plutónico, la geometría del cuerpo, el tipo de litología en base a las unidades definidas para Mina Carola y finalmente los comentarios u observaciones.

Antes de cargar el archivo con los datos litológicos al software, se debió determinar los límites del modelo, es decir las coordenadas este y norte máximas y mínimas, además de la cota máxima y mínima. Además, cabe mencionar, que se trabajó con los códigos litológicos y leyendas utilizados para el modelo de Carola Central (Figura 9).



The screenshot shows the 'Lithologies' tab in the Leapfrog software interface. The window title is 'Geological Model - GM_Adriana_Norte'. The interface includes tabs for 'General', 'Boundary', 'Fault System', 'Lithologies', 'Lithology Columns', and 'Chronology'. The 'Lithologies' tab is active, displaying a table with two columns: 'Code' and 'Colour'. The table lists various geological units with their corresponding colors.

Code	Colour
Unknown	White
Albitofiro	Purple
Andesitas inferiores (Kpcli)	Green
Andesitas superiores (Kpcls)	Light Green
Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	Olive Green
Calizas margosas (Cm)	Pink
Coluvios y/o derrubios (CD)	Grey
Microdioritas cuarcíferas	Magenta
Riodacitas	Light Blue
Sed. Flujo laminados (M)	Orange
Sed. Rojos brechizados (SR)	Red
Tobas de Agustina (TA)	Teal

Figura 9. Unidades litológicas utilizadas para la creación del modelo geológico para Adriana Norte.

Posteriormente se cargó el archivo Excel con los nuevos datos al software Leapfrog, generando una nueva base de datos actualizada, la cual fue cargada desde Leapfrog empleando una conexión abierta de base de datos (ODBC).

Luego se procedió a la creación de las capas de contacto entre unidades, agregando la cronología de estas, los tipos de contactos, además de la orientación de cada capa.

Finalmente se crearon los volúmenes sólidos para cada unidad litológica y se realizó una validación del modelo geológico generado. Dicha validación, fue creada en base a datos estadísticos generados en el software Leapfrog y de esta manera, se pudo establecer cuánto porcentaje de la información de los sondajes coincide con los sólidos de cada unidad litológica del modelo.

4.5. Análisis e interpretación de resultados.

Esta etapa metodológica consistió en examinar e interpretar la información obtenida en las etapas previamente realizadas. Primeramente, se contextualizaron las caracterizaciones litológicas con la literatura existente, se realizaron discusiones para determinar la relevancia de este trabajo y el aporte de definir las unidades litológicas para Adriana Norte. Para esto se construyó una correlación litoestratigráfica entre las 3 columnas realizadas en la tercera etapa.

Posteriormente se hicieron comparaciones entre trabajos locales anteriormente realizados en área, enfocándose en las unidades litológicas, alteraciones principales y modelos geológicos generados previamente. Finalmente se recomendaron sondajes exploratorios para la zona, con el fin de delimitar de mejor manera las unidades litológicas del modelo geológico, además de precisar los cuerpos mineralizados presentes en el yacimiento.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. Unidades litológicas de Adriana Norte

Las unidades litológicas definidas para Adriana Norte corresponden principalmente a rocas volcánicas, volcanosedimentarias y sedimentarias. Estas unidades llevan el nombre de la litología predominante, no obstante, existen distintos tipos de litologías dentro de la misma unidad.

Las rocas se definieron de acuerdo a las litologías y unidades litológicas previamente definidas en Carola Central, conservando su nomenclatura local. A continuación, se realiza una descripción de cada unidad litológica:

5.1.1. Unidad Andesitas inferiores (Kpcli)

Dentro de la unidad Andesitas inferiores (Kpcli), se encuentran dos tipos de litologías: las Andesitas inferiores y la Brecha de techo, no se conoce el contacto de la base de esta unidad, sin embargo, se calcula un espesor estimado mayor a los 400 m. La litología Andesitas inferiores corresponden a rocas volcánicas de color gris oscuro verdoso, de textura porfídica (Figura 10A) y en algunos casos afanítica. La matriz está constituida de una masa fundamental afanítica de color oscuro y los fenocristales son de plagioclasas euhedrales y subhedrales visiblemente notorias, con un porcentaje variable de 50 a 75% de la roca. Por lo general, la matriz se encuentra cloritizada y los fenocristales presentan alteración potásica leve a intermedia (Figura 10B). Es común también la silicificación, la magnetización, la cual aumenta gradualmente con la profundidad y en menor proporción la epidotización. En ocasiones, existen andesitas arcillosas, las cuales se relacionan estrechamente a zonas de fallas. En cuanto a la mineralogía, esta unidad es la principal hospedante del mineral de interés económico, presentando comúnmente calcopirita en vetillas (Figura 10D), disseminaciones, cúmulos y masivos. Como minerales accesorios o ganga, las Andesitas presentan vetillas y *stockwork* de óxidos de hierro como hematita, especularita, magnetita, mushketovita, además de calcita, actinolita y cuarzo.

Usualmente esta unidad presenta altos contenidos de pirita en cúmulos (Figura 10C), disseminaciones y vetillas.

La litología denominada Brecha de techo (Figura 10E), corresponde a una brecha volcanosedimentaria formada por el contacto entre la litología de Andesitas inferiores, y la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR) o la unidad Toba de Agustina (TA), de esta manera, se encuentra en la parte superior o techo de las Andesitas inferiores y por lo general cuenta con un espesor variable de 3 a 20 m. Esta roca consta de una matriz andesítica fuertemente cloritizada con presencia de alteración potásica intermedia a fuerte y con clastos de origen sedimentario, regularmente pertenecientes la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR). La Brecha de techo también hospeda calcopirita, con ocurrencia mineral disseminada, vetillas o cúmulos y presenta por lo general vetillas de calcita, cuarzo y cúmulos y disseminación de pirita.

Dentro de la unidad Andesitas inferiores (Kpcli) también se considera la Brecha hidrotermal, la cual consiste en una brecha monomítica clastosoportada de matriz andesítica con clastos de la misma composición que la matriz, los cuales presentan alteración potásica intermedia a intensa (Figura 10F). Por lo general el cemento consiste en minerales hidrotermales, como magnetita- mushketovita o incluso minerales de mena como la calcopirita. La calcopirita también se da en cúmulos, disseminación y vetillas, generalmente con asociación de pirita.

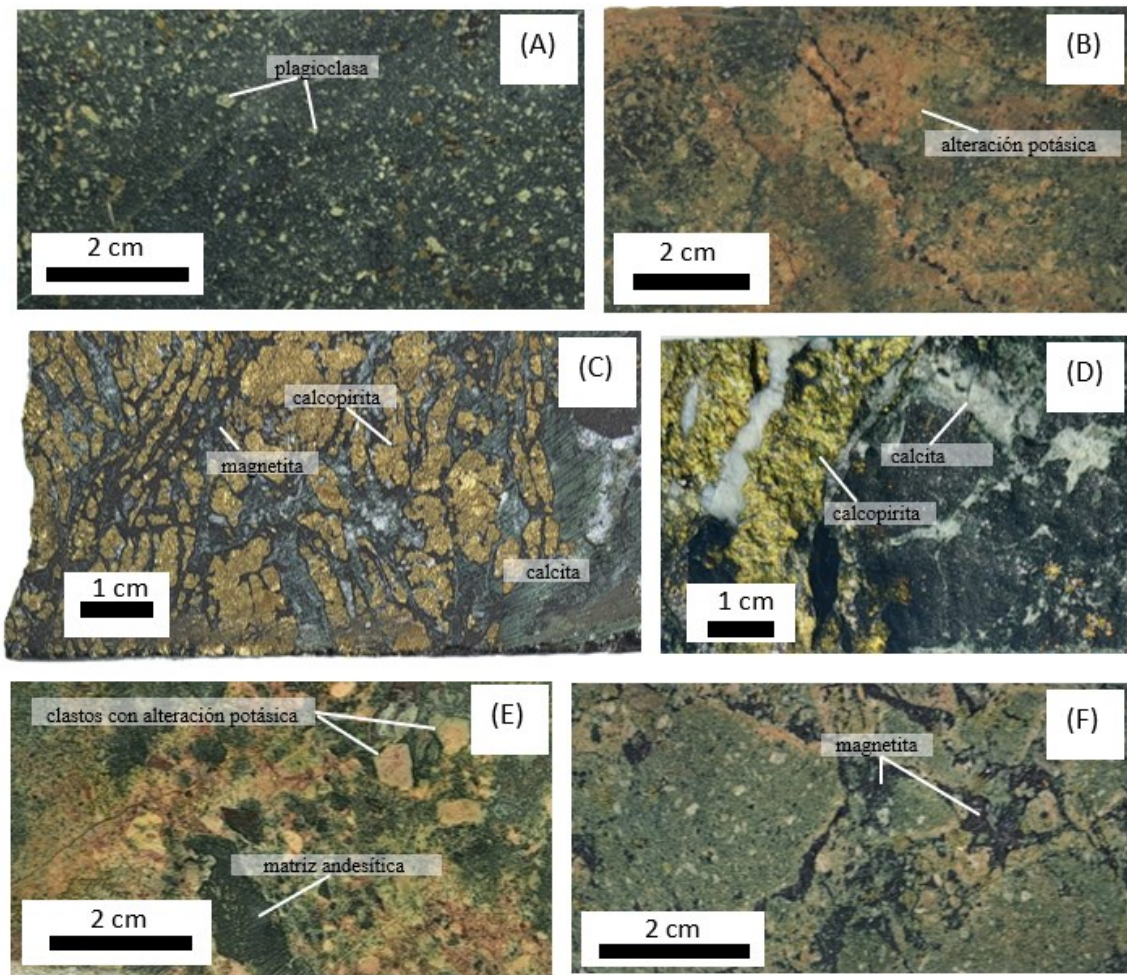


Figura 10. Fotografías representativas de las rocas que forman parte de la unidad de Andesitas inferiores (Kpcli): (A) Andesita inferior cloritizada con textura porfídica extraída del sondaje SE-CL-6. (B) Andesita inferior porfídica con alteración potásica extraída del sondaje S-08-1. (C) Brecha hidrotermal de andesita con pirita, magnetita y calcita extraída de sondaje S-08-1. (D) Andesita inferior mineralizada con vetilla de calcopirita y calcita extraída de sondaje AN-0353. (E) Brecha de techo con clastos alterados potásicamente extraída de sondaje M-14A. (F) Brecha hidrotermal con cemento de magnetita extraída de sondaje M-15.

5.1.2. Unidad Albitófiro (ALB)

Esta unidad engloba a las litologías denominadas como Albitófiro y Autobrecha, el espesor estimado para esta unidad es de aproximadamente 350 m. Existen varias definiciones de Albitófiro, sin embargo, para Adriana Norte, se consideró el Albitófiro

definido por Camus (1980), el cual considera que las características petrográficas y estructurales de esta roca sugieren un origen efusivo, igualmente que Lino (1984), que lo define como una roca andesítica, la cual sufrió un reemplazo de mineralogía primaria de plagioclasa cálcica, máficos y vidrio rico en hierro a un agregado de clorita, epidota, albita, sílice residual y hematita, proceso conocido como espilitización, en donde existe un cambio geoquímico, pero no cambian las relaciones texturales y la mineralogía básica. Además, se consideró en este trabajo el Albitófiro definido por Marshik y Fontboté (2001), el cual se denominó con el nombre de Dacitas de Meléndez por la composición original de la roca. Estas cuentan con una fuerte albitización y alteración potásica.

El Albitófiro generalmente se intercala con las Andesitas inferiores (Kpcli) o se encuentra en contacto erosivo con la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR). Es una roca ígnea volcánica de composición andesítica y de textura porfídica, la cual se constituye de un 50 a 75% de fenocristales subhedrales y/o anhedrales de plagioclasas poco visibles, inmersos en una masa fundamental de color gris verdoso claro a oscuro, además los minerales ferromagnesianos presentes como anfíboles y biotita se encuentran altamente cloritizados constituyendo el 30 a 45% de la roca. También la matriz cuenta generalmente con alteración potásica con intensidad intermedia a intensa, la cual en ocasiones muestra el patrón de flujo hidrotermal (Figura 11A y B). En cuanto a la mineralización, el Albitófiro (ALB) es la unidad más importante en conjunto con las Andesitas inferiores (Kpcli) ya que hospeda gran parte del mineral de mena, de esta manera, la ocurrencia principal son vetillas, disseminaciones y cúmulos de calcopirita además de minerales ganga como vetillas de calcita, hematita y specularita.

El Albitófiro descrito para Adriana Norte consiste en una roca volcánica de composición dacítica, la cual presenta una textura porfídica con una masa fundamental afanítica de color gris verdoso claro y con un 50 a 70% de fenocristales de plagioclasas más finos inmersos en la matriz, visiblemente difusos, es decir, fenocristales más transparentes,

que carecen de claridad, poco notorios dentro de la masa fundamental (Figura 11C). Los minerales ferromagnesianos se encuentran cloritizados y en ocasiones presenta alteración potásica en la matriz. Este Albitófiro presenta mineralización de calcopirita en vetillas, cúmulos y diseminación además de diseminación de pirita en la matriz.

Además, la unidad Albitófiro (ALB), se constituye en las porciones superiores e inferiores de la litología denominada Autobrecha, la cual corresponde a una brecha monomíctica volcánica clastosoportada con clastos sub angulosos a muy angulosos y mal seleccionados de Albitófiro (Figura 11 D y E). La matriz es de color más oscuro que los clastos y esta presenta por lo general diseminación fina de pirita (<50%).

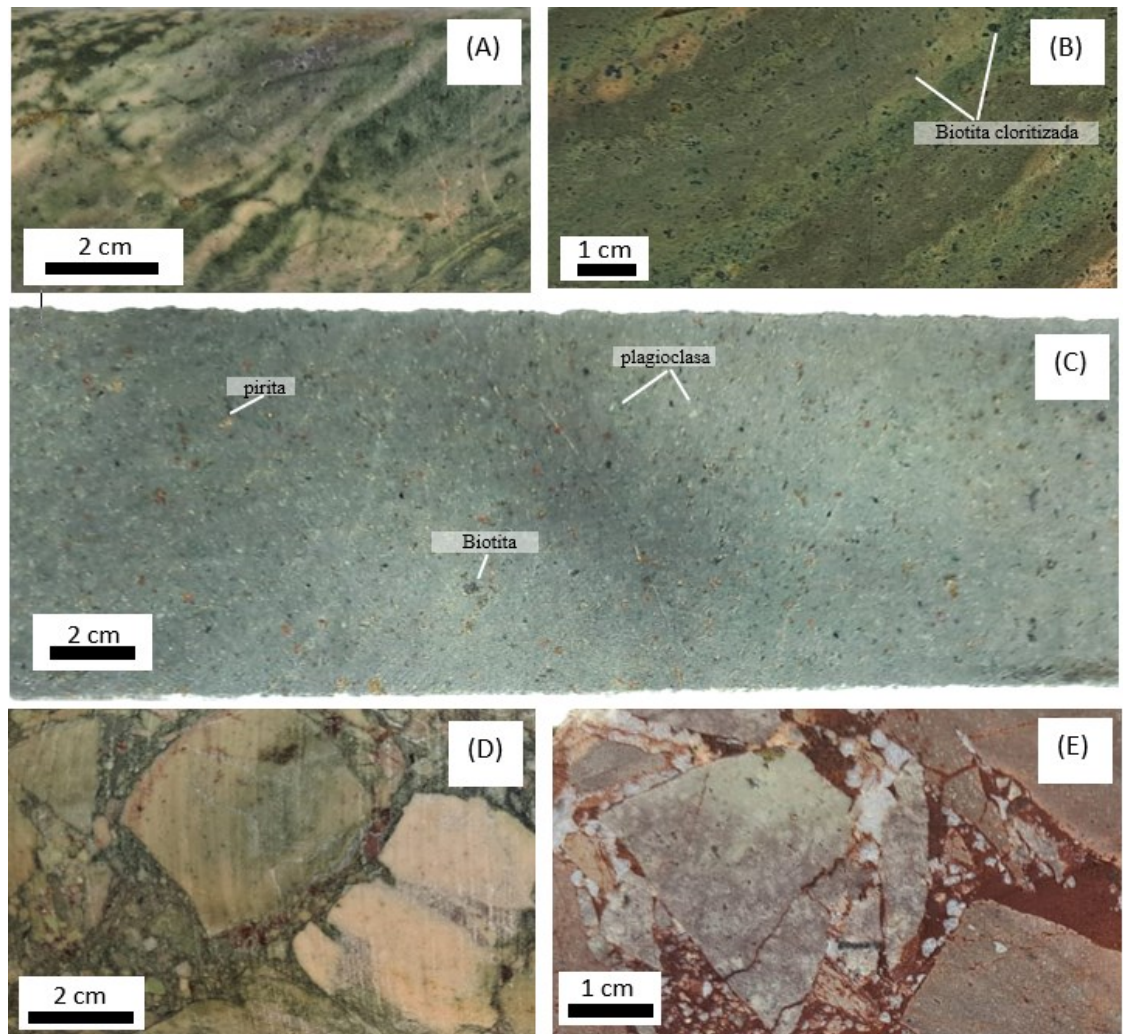


Figura 11. Fotografías representativas de las litologías correspondientes a la unidad Albitófiro (ALB): (A) Albitófiro extraído de sondaje SE-CL-3. (B) Albitófiro con patrón de flujo del fluido hidrotermal, cloritización y albitización extraído de sondaje SE-CL-2. (C) Albitófiro definido como Dacitas de Meléndez con textura porfídica extraído de sondaje AN-0003. (D) Autobrecha de Albitófiro extraída de sondaje SE-CL-3. (E) Autobrecha alterada extraída de sondaje AN-003.

5.1.3. Unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR)

La unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR) se encuentra sobre o en intercalaciones con la unidad de Andesitas inferiores (Kpcli) y Albitófiro (ALB) y, cuenta con un espesor máximo de 35 m. Dentro de esta unidad se encuentran las litologías

denominadas Sedimentos Rojos brechizados, Sedimentos Rojos laminados y Brecha de contacto. El tipo de litología correspondiente a Sedimentos Rojos brechizados, consiste de una brecha volcanosedimentaria polimíctica de matriz tamaño arena (Figura 12B) o lutita (Figura 12A) con un color rojizo característico. En cuanto a los clastos, estos tienen mala a muy mala selección y varían desde angulosos a subredondeados, además presentan alteración potásica y cloritización en caso de ser volcánicos (Figura 12C). La unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR) es el horizonte estratigráfico en donde usualmente termina la mineralización de menas, sin embargo, en ocasiones, presenta calcopirita diseminada intersticialmente en la matriz con asociaciones de pirita, además de vetillas de calcita.

La litología denominada Sedimentos Rojos laminados corresponden a rocas compactas de color rojizo con estructura laminar, las cuales se encuentran afectadas por microfallas (Figura 12D). Por lo general esta litología no presenta mineralización de calcopirita y solamente cuenta con diseminación de pirita (10-35%).

La litología Brecha de contacto corresponde a una brecha volcanosedimentaria generada por el contacto entre la unidad Albitófiro (ALB) y la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR). Este tipo de litología no existe para el modelo de Carola Central, de tal manera, que se creó exclusivamente para la realización del modelo de Adriana Norte. La brecha consta de matriz tamaño arena de color rojizo con clastos volcánicos, principalmente de Albitófiro y Andesitas inferiores. La matriz generalmente presenta mineralización diseminada o cúmulos de calcopirita, además de diseminación de pirita, vetillas de calcita, mushketovita y magnetita. En cuanto a los clastos, estos varían de angulosos a subredondeados y en ocasiones se presenta como una brecha clastosoportada (Figura 12E). También es común que los clastos volcánicos presenten alteración potásica y cloritización con intensidad leve a intermedia. Dentro de esta litología también se consideran las brechas volcanosedimentarias de matriz volcánica andesítica con clastos de Albitófiro y de arena rojiza perteneciente a la unidad

Sedimentos Rojos brechizados (SR) (Figura 12F). Estas brechas hospedan altos contenidos de calcopirita en cúmulos y diseminación (Figura 12G), además de cúmulos y diseminaciones de pirita y vetillas de calcita.

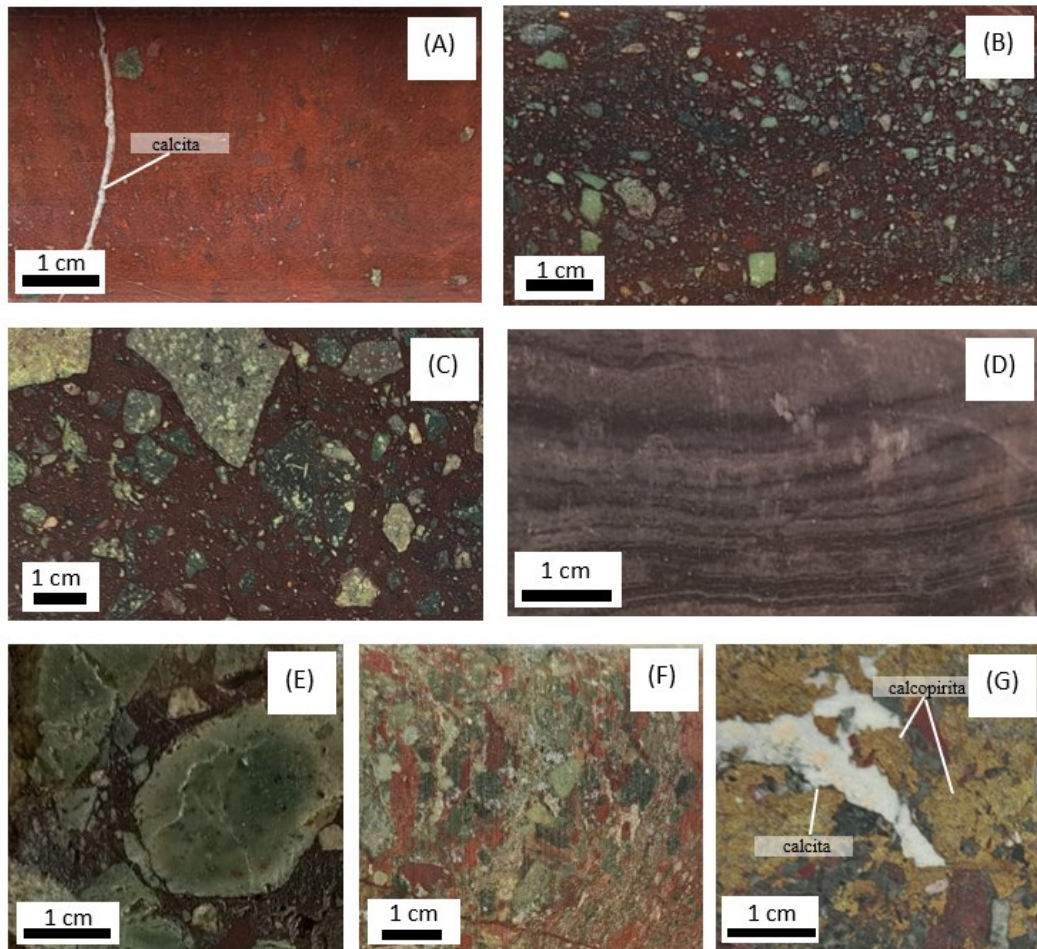


Figura 12. Fotografías representativas de las litologías que forman parte de la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR): (A) Sedimentos Rojos brechizados matriz-soportado con matriz lutítica y clastos < 20% extraído de sondaje S-02.1. (B) Sedimentos Rojos brechizados polimícticos de matriz arenosa con clastos moderadamente seleccionados extraído de sondaje SE-CL-3. (C) Sedimentos Rojos brechizados de matriz arenosa con clastos de Albitófiro muy mal seleccionados extraído de sondaje M-14. (D) Sedimentos Rojos laminados extraído de sondaje AN-0353. (E) Brecha de contacto clastosoportada con clastos muy mal seleccionados de Albitófiro extraído de sondaje S-1A-1. (F) Brecha de contacto extraída de sondaje SE-CL-2. (G) Brecha de contacto mineralizada con calcopirita extraída de sondaje AN-0030.

5.1.4. Unidad Tobas de Agustina (TA)

La unidad denominada Tobas de Agustina (TA) se encuentra en contacto directo sobre la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR) y su techo está en contacto por lo general con la unidad Sedimentos de Flujo laminados (M), en cuanto al espesor de esta unidad, es aproximadamente de 55 m. Esta unidad incluye cuatro tipos de litologías; la Toba de Agustina, la Toba de Agustina y Sedimentos Rojos, las Lutitas margosas y la Brecha de contacto. La litología denominada Tobas de Agustina, corresponde a una roca volcánica explosiva de textura brechosa y con matriz de aspecto poroso de color verde claro (Figura 13A), generalmente carbonatada. Consiste en una toba lítica, donde los piroclastos son polimícticos de hasta 4 cm, de origen volcánico y sedimentario, angulosos a subredondeados y mal seleccionados. Comúnmente, presenta vesículas y amígdalas de calcita y especularita (Figura 13B), vetillas de calcita y magnetita más diseminación fina de pirita y magnetita. También se consideran dentro de la litología Toba de Agustina a rocas brechosas de composición volcanosedimentaria, polimícticas mal seleccionadas y de matriz soportada con clastos subredondeados a angulosos andesíticos, de arena rojiza perteneciente a la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR), lutitas verdes y calizas inmersos en una matriz arenosa o lutítica de color verde (Figura 13C).

La litología Lutitas margosas (Figura 13F) son rocas clásticas de tamaño de grano muy fino y de color verde claro, la principal característica de esta litología es la presencia de carbonatación. Puede tener en ocasiones vetillas de calcita.

La litología denominada Toba de Agustina y Sedimentos Rojos, corresponde a brechas, volcanosedimentarias de matriz tamaño arena rojiza (Figura 13D), con clastos angulosos a subangulosos, mal seleccionados y en ocasiones clastosoportados de Lutitas margosas pertenecientes a la unidad Tobas de Agustina (TA). Por lo general presenta vetillas de calcita, hematita y especularita, además de diseminación fina de pirita.

La litología Brecha de contacto, se genera por el contacto entre la unidad Tobas de Agustina (TA) y el Albitófiro (ALB). Normalmente, también existe interdigitación con Sedimentos Rojos brechizados (SR). Esta brecha es volcanosedimentaria matriz de color verde correspondiente a la unidad Tobas de Agustina (TA), principalmente de lutita (Figura 13E) o toba y consta de clastos mal seleccionados, subangulosos a subredondeados de Albitófiro cloritizado y/o arena rojiza de la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR). Generalmente esta Brecha de contacto presenta diseminación de pirita tanto en la matriz como en los clastos.

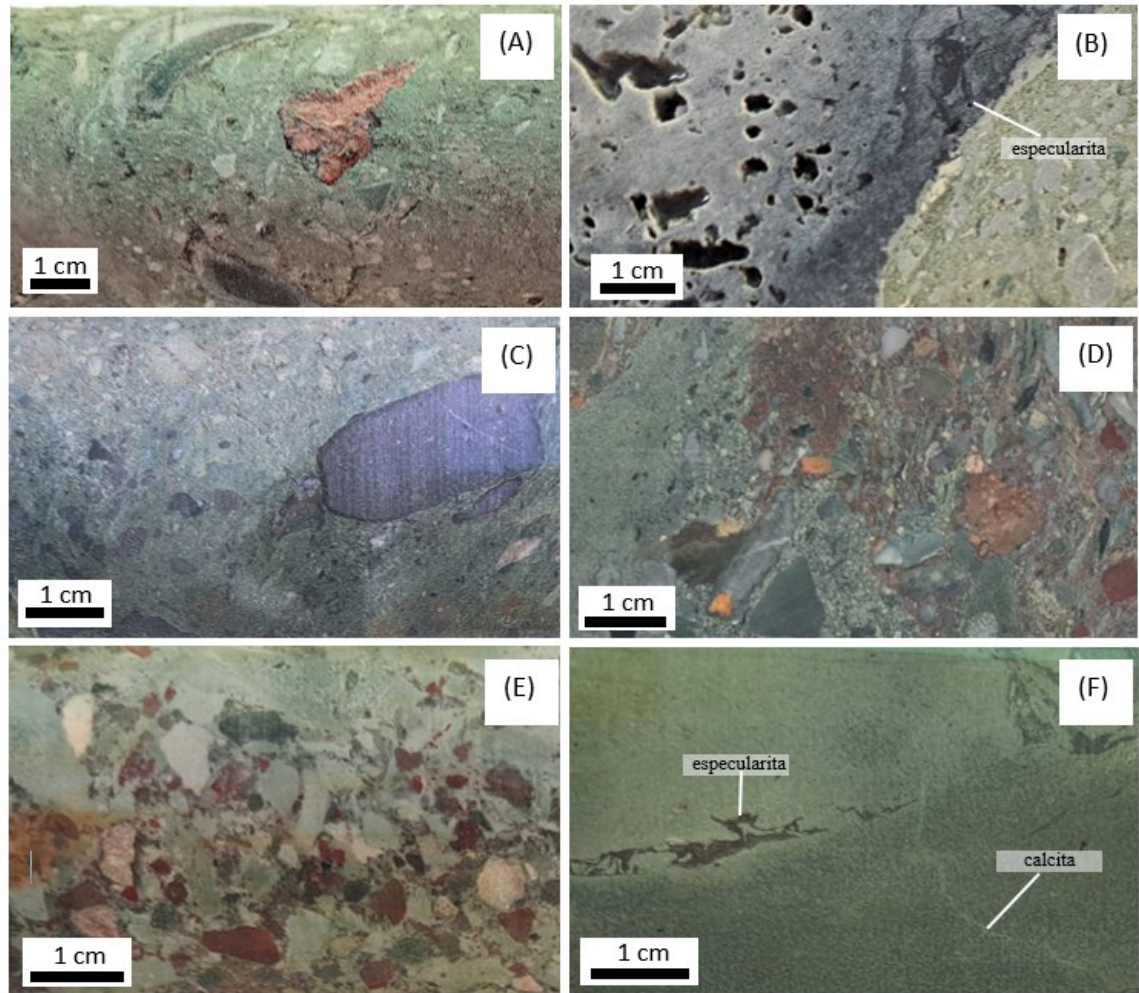


Figura 13. Fotografías representativas de las litologías que forman parte de la unidad Tobas de Agustina (TA): (A) Toba lítica-lapilli de color verde claro con aspecto poroso muy mal seleccionada, extraída de sondaje AN-0039. (B) Toba lítica-lapilli vesicular con veta de especularita extraída de sondaje AN-0003. (C) Brecha volcanosedimentaria polimíctica de matriz color verde claro con clastos muy mal seleccionados, extraída de sondaje AN-0034. (D) Toba de Agustina y Sedimentos Rojos brechizados, interdigitación entre ambas litologías extraída de sondaje M-15. (E) Brecha de contacto, brecha volcanosedimentaria de matriz lutítica verde y clastos de Sedimentos Rojos y Albitófiro extraída de sondaje AN-0008. (F) Lutita margosa de color verde con vetillas de especularita extraída de sondaje AN-0008.

5.1.5. Unidad Sedimentos de Flujo laminados (M)

Esta unidad se encuentra comúnmente sobre la unidad de Tobas de Agustina (TA) o en intercalaciones con la unidad de Andesitas superiores (Kpcls) y tiene un espesor máximo de 50 m. La unidad Sedimentos de Flujo laminados (M) consta con dos tipos de litologías diferentes; los Sedimentos de Flujo laminados y la Brecha de contacto, la cual corresponde a una nueva litología creada exclusivamente para Adriana Norte. Los Sedimentos de Flujo laminados son rocas sedimentarias de color gris claro a oscuro con estructuras de laminación (Figura 14B) y en ocasiones *slumping* (Figura 14A). Las laminaciones principalmente consisten de calizas, lutitas y areniscas. Generalmente presenta silicificación, además de bandas de hematita, jaspe y cuarzo (Figura 14D). En cuanto a interés económico, esta unidad no cuenta con mineralización de calcopirita, sin embargo, presenta diseminación fina de pirita.

La Brecha de contacto, corresponde a brechas volcanosedimentarias de matriz color gris oscuro-negro de composición andesítica-basáltica con clastos subredondeados a subangulosos, mal seleccionados, con tamaño de hasta 6 cm (Figura 14E y F). Los clastos corresponden a rocas sedimentarias carbonáticas, como calizas o margas, los cuales usualmente presentan laminaciones (Figura 14C). Esta litología tiene ocurrencia de diseminados de pirita en la matriz más vetillas de calcita, hematita y *stockwork* de calcita.

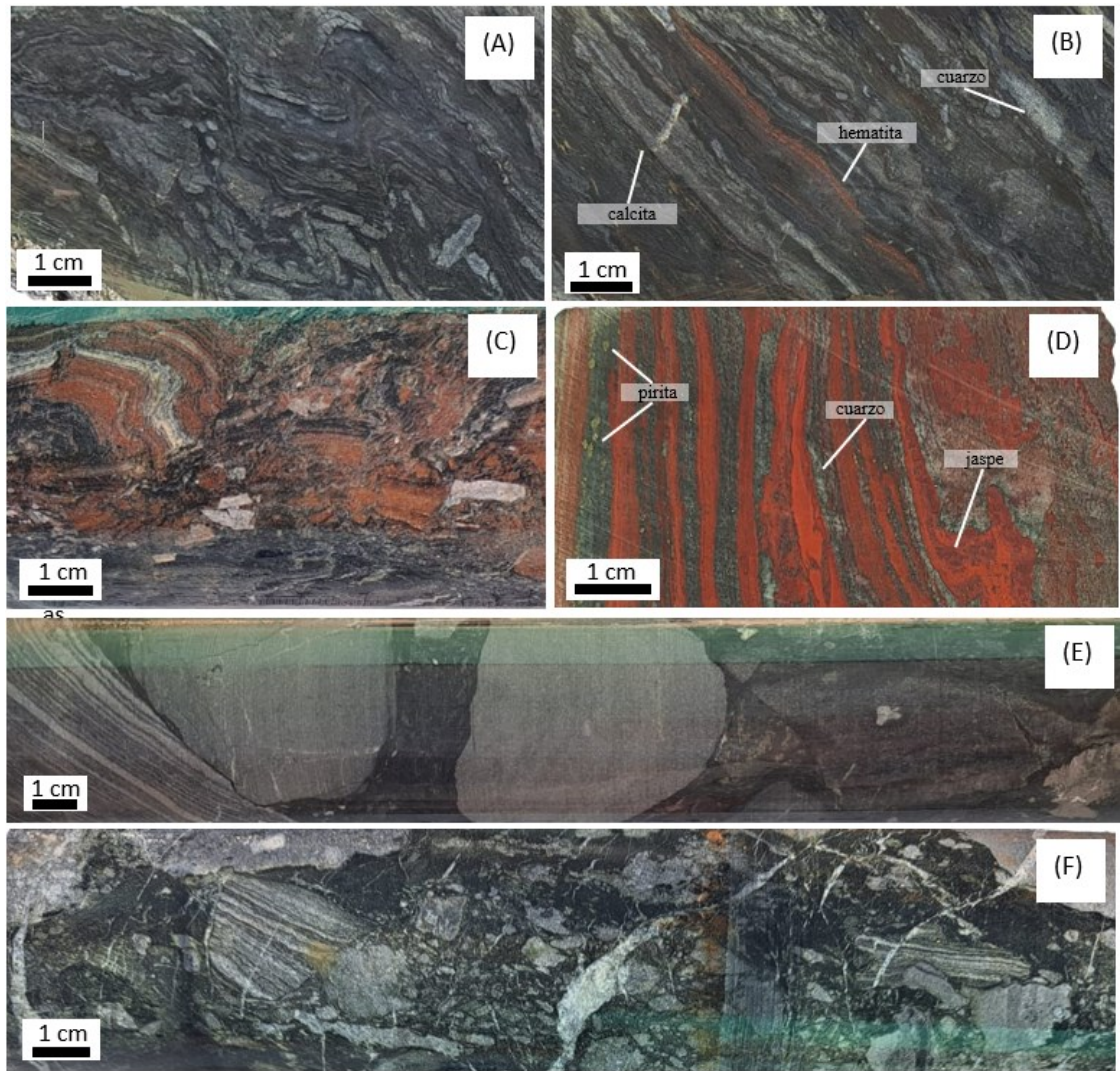


Figura 14. Fotografías representativas de las litologías que forman parte de la unidad Sedimentos de Flujo laminados (M): (A) Roca sedimentaria con laminación y brechización correspondiente a la litología de Sedimentos de Flujo laminados, la cual muestra deformación con estructuras de *slumping* extraída de sondaje S-08-1. (B) Roca sedimentaria con laminación y deformación dúctil, correspondiente a litología de Sedimentos de Flujo laminados extraída de sondaje S-08-1. (C) Brecha de contacto deformada con clastos con laminación de calizas, hematita y jaspe extraída de sondaje AN-0039. (D) Roca sedimentaria con laminaciones de hematita y diseminación de pirita en la matriz extraída de sondaje M-14. (E) Brecha de contacto, volcanosedimentaria con clastos carbonáticos de hasta 5 cm extraída de sondaje AN-0353. (F) Brecha de contacto, volcanosedimentaria con clastos polimícticos volcánicos y sedimentarios laminados con presencia de vetillas de calcita extraída de sondaje AN-0008.

5.1.6. Unidad Andesitas superiores (Kpcls)

Esta unidad cuenta con un espesor máximo de 50 m con un solo tipo de litología. Consiste en rocas ígneas volcánicas andesíticas- basálticas de color verde oscuro a gris oscuro o negro de textura tanto afanítica como porfídica (Figura 15B), comúnmente presenta vesículas o amígdalas de calcita. La textura porfídica se identifica por la presencia de fenocristales de plagioclasa visiblemente notorios (40-75%) en una masa fundamental mesocrática. En ocasiones los cristales de plagioclasa son reemplazados por calcita. Esta unidad no presenta mineralización de mena y se encuentra intercalada con rocas sedimentarias y volcanosedimentarias pertenecientes a la unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs) y la unidad Sedimentos de Flujo laminados (M). Generalmente presenta cloritización intensa, silicificación intermedia a intensa, diseminación de pirita, vetillas de cuarzo y calcita y *stockwork* de calcita (Figura 15A).

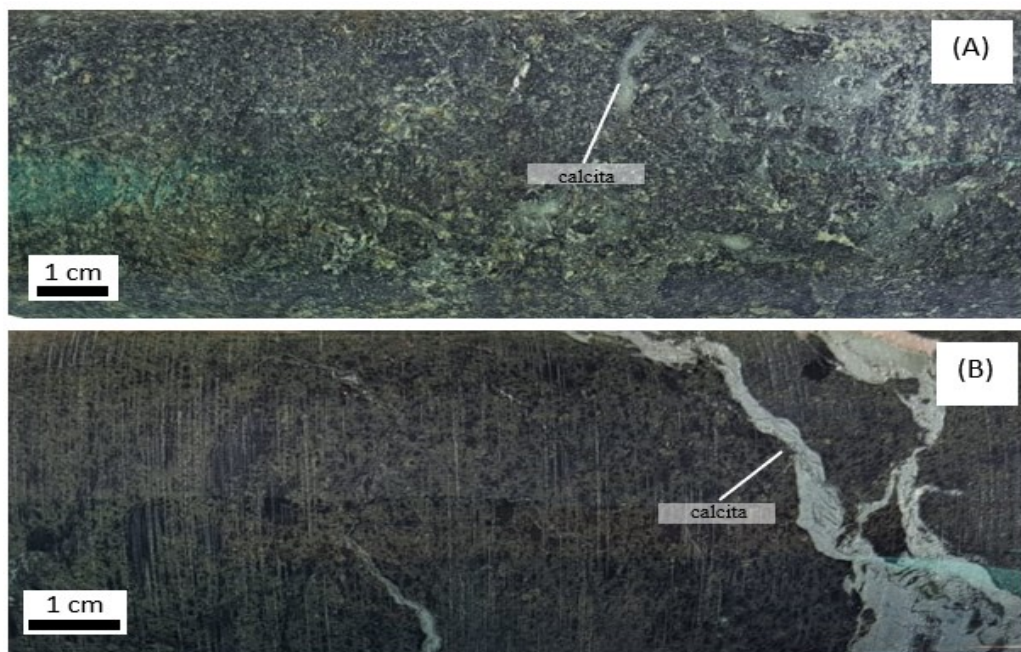


Figura 15. (A) Roca ígnea extrusiva porfídica de color gris verdoso oscuro, presenta fenocristales de plagioclasa y alto contenido de minerales máficos, roca cloritizada y epidotizada, vetillas de calcita y cuarzo extraída de sondaje AN-0039. (B) Andesita superior con carbonatación y vetillas de calcita extraída de sondaje AN-0034.

5.1.7. Unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs)

Dentro de esta unidad se encuentran las brechas volcanosedimentarias y rocas sedimentarias como calizas, lutitas y areniscas. Las características de las rocas sedimentarias son diferentes, logrando de esta manera distintos tipos de litologías dentro de la unidad, tales como; Lutitas silíceas, Chert, Lutitas margosas, Litoarenitas, Areniscas margosas y Calizas margosas. Cabe destacar que las litologías sedimentarias de esta unidad por lo general se interdigitan, además de formar estructuras de laminación.

La litología correspondiente a Brecha volcanosedimentaria (Figura 16A) consiste en una brecha polimíctica matriz-soportada de matriz sedimentaria de color verde oscuro a café, por lo general se trata de una matriz arenosa de tamaño de grano medio. Los clastos corresponden a rocas volcánicas andesíticas y a rocas sedimentarias detríticas, usualmente areniscas y lutitas. Estos varían su redondez de subredondeados a muy angulosos y constan de muy mala selección, los cuales van de tamaños de 2 mm a 5 cm. La Brecha volcanosedimentaria presentan comúnmente silicificación y en menor proporción oxidación, además constan de disseminación intersticial de pirita en la matriz, disseminación de magnetita y vetillas de calcita, yeso y hematita.

La litología denominada Lutitas silíceas, corresponden a las rocas clásticas de color verde claro con tamaño de grano muy fino, estas rocas presentan silicificación con intensidad moderada a fuerte. Además, constan de vetillas y *stockwork* de calcita (Figura 16B) y óxidos de hierro como hematita-especularita, y en algunas ocasiones pueden presentar disseminación de magnetita. Similar a las lutitas silíceas, se encuentra la litología denominada *Chert*, esta corresponde a las rocas compactas silificadas pero de color más blanco a rojizo, por la presencia de jaspe (Figura 16E).

La litología denominada Lutitas margosas (Figura 16C) corresponden a un nuevo tipo de litología, el cual fue creado debido a que las rocas correspondientes no pudieron asignarse a ninguna unidad litológica preexistente de acuerdo a su descripción. Las

Lutitas margosas corresponden a rocas clásticas de color verde claro a oscuro con tamaño de grano muy fino, las cuales se caracterizan por la presencia de carbonatos. En ocasiones, también presentan silicificación y por lo general cuentan con vetillas de calcita y hematita.

El tipo de litología denominado Litoarenitas, corresponde a areniscas de color gris verdoso oscuro ricas en fragmentos líticos (Dott, 1964), en cuanto al tamaño de grano, este puede ser fino, medio (Figura 16D) o grueso. Comúnmente presentan silicificación y oxidación, además de disponerse en alternancias con calizas y Calizas margosas. Las Litoarenitas, generalmente constan de diseminación fina de pirita y ocasionalmente de magnetita más vetillas de calcita y de cuarzo en menor proporción.

La litología de Areniscas margosas corresponde a areniscas de color verde claro a oscuro de tamaño de grano fino a medio. Estas se caracterizan principalmente por presentar carbonatación y ocasionalmente silicificación. Por lo general se encuentran intercaladas o interdigitadas con calizas y Calizas margosas, y presentan laminaciones además de vetillas de calcita.

Las Calizas margosas pertenecientes a la unidad de Brecha volcanosedimentaria (BrVs), se caracterizan por ser mudstone (Dunham, 1962), compactas de color gris. Generalmente estas rocas presentan meteorización y/u oxidación, además de silicificación y vetillas de calcita. Un rasgo importante en estas calizas es la interdigitación con Litoarenitas (Figura 16F), Lutitas silíceas o Lutitas margosas y Areniscas margosas. Otra característica es la presencia de estructuras como laminaciones o patrones de flujo. Cabe destacar que esta litología fue creada exclusivamente para el sector Adriana Norte, ya que en términos estratigráficos no se comportaba como una unidad espacialmente continua. De esta manera, fue necesario definir esta litología dentro de la unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs) para además optimizar la creación del modelo geológico.

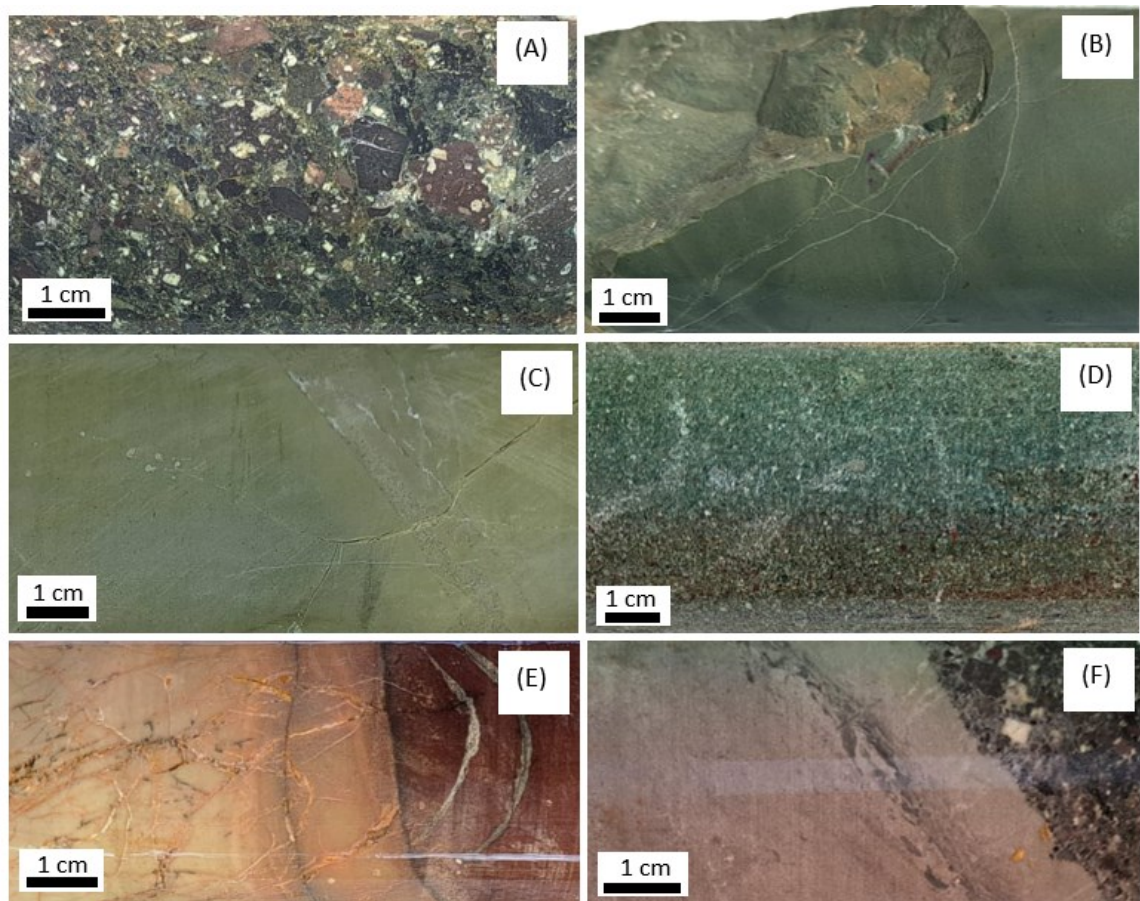


Figura 16. Fotografías representativas de las litologías pertenecientes a la unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs): (A) Brecha volcanosedimentaria polimíctica mal seleccionada extraída de sondaje AN-0034, los clastos son subredondeados a angulosos, de composición andesítica y sedimentaria: lutitas y calizas. (B) Lutita silícea con vetillas de calcita extraída de sondaje AN-0030. (C) Lutita margosa extraída de sondaje S-02-1. (D) Litoarenitas de color gris verdoso oscuro con disseminación de pirita y vetillas de calcita extraída de sondaje M-17. (E) Lutitas de color blanco silicificadas con presencia de pirolusita, correspondiente a la litología de Chert extraída de sondaje M-17. (F) Calizas margosas en contacto con areniscas de grano grueso, vetillas de calcita y disseminación de magnetita. extraída de sondaje SE-CL-6.

5.1.8. Unidad Calizas margosas (Cm)

Esta es la unidad sedimentaria superior descrita en Adriana Norte y consta con un espesor aproximado de 200 m. Consiste en dos litologías principales: las Calizas margosas, las cuales predominan en la unidad y las Litoarenitas, las cuales se

interdigitan con la litología predominante. La litología denominada Calizas margosas corresponden a mudstone de color gris claro a oscuro (Figura 17A), y presentan características similares en relación a las Calizas margosas de la unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs), tales como; presencia de meteorización y/u oxidación, además de silicificación en algunos casos. También presentan laminaciones y/o patrones de flujos, estratificación flaser o lenticular (Figura 17B), sin embargo, las Calizas margosas de esta unidad, constan ocasionalmente con pirolusita (Figura 17C), pirita intersticial fina, vetillas de calcita, yeso, arcillas y cuarzo y por lo general, existe una intercalación entre esta litología y lutitas o areniscas, pero siempre con predominancia de Calizas margosas.

La litología denominada Litoarenitas, corresponde a rocas detríticas de color verde claro con tamaño de grano arena media a gruesa, por lo general estas rocas se encuentran alternadas con lutitas y Calizas margosas (Cm), además presentan disseminaciones intersticiales finas de pirita, vetillas de calcita y oxidación.

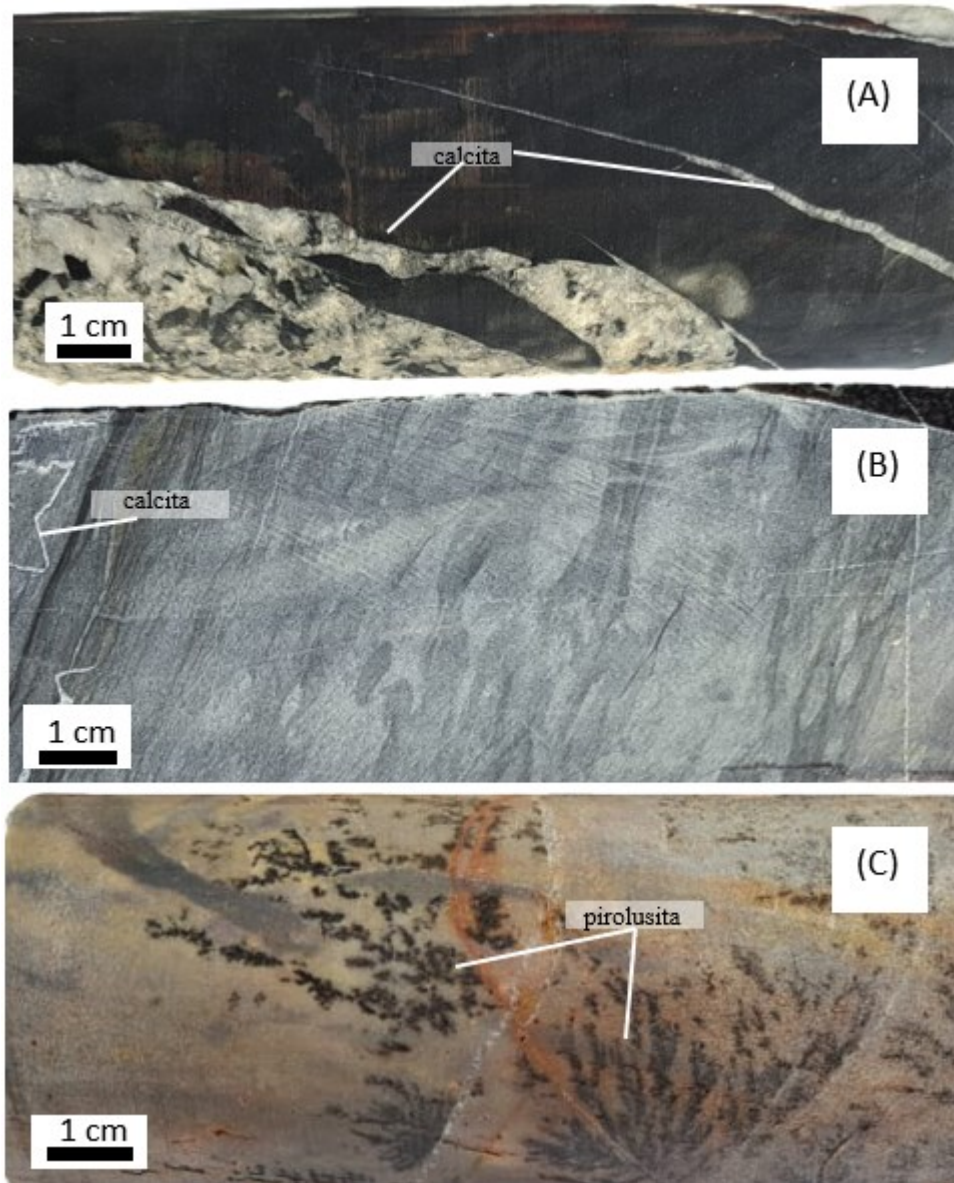


Figura 17. Fotografías representativas de las litologías pertenecientes a la unidad de Calizas margosas (Cm): (A) Caliza margosa de color gris oscuro con presencia de vetillas de calcita, oxidación y silicificación extraída de sondaje AN-0026. (B) Caliza margosa color gris claro silicificada con presencia de patrón de flujo y vetillas de calcita. extraída de sondaje S-08-1. (C) Calizas margosa de color gris blanquecino con presencia de oxidación y pirolusita dispuesta de manera dendrítica (dendritas de manganeso), extraída de sondaje AN-0026.

5.1.9. Dique Lamprofírico

Corresponde a diques mesocráticos de textura porfídica, en los cuales destacan los fenocristales de minerales máficos (20-50%) como anfíboles, piroxenos y biotitas. Cabe destacar que el término lamprofírico se basa específicamente en la textura de la roca, no así en la composición. En cuanto a la matriz esta es de color verdosos claro (Figura 18A) a oscuro rica en plagioclasa y con contenido de calcita (Figura 18B). El espesor de estos diques alcanza hasta 4 m y cortan tanto las unidades volcánicas como volcanosedimentarias de la Formación Punta de Cobre. Esta unidad no cuenta con mineralización de menas, por lo cual, se asume un emplazamiento posterior a la mineralización. Generalmente cuenta con carbonatación, vetillas y *stockwork* de calcita.

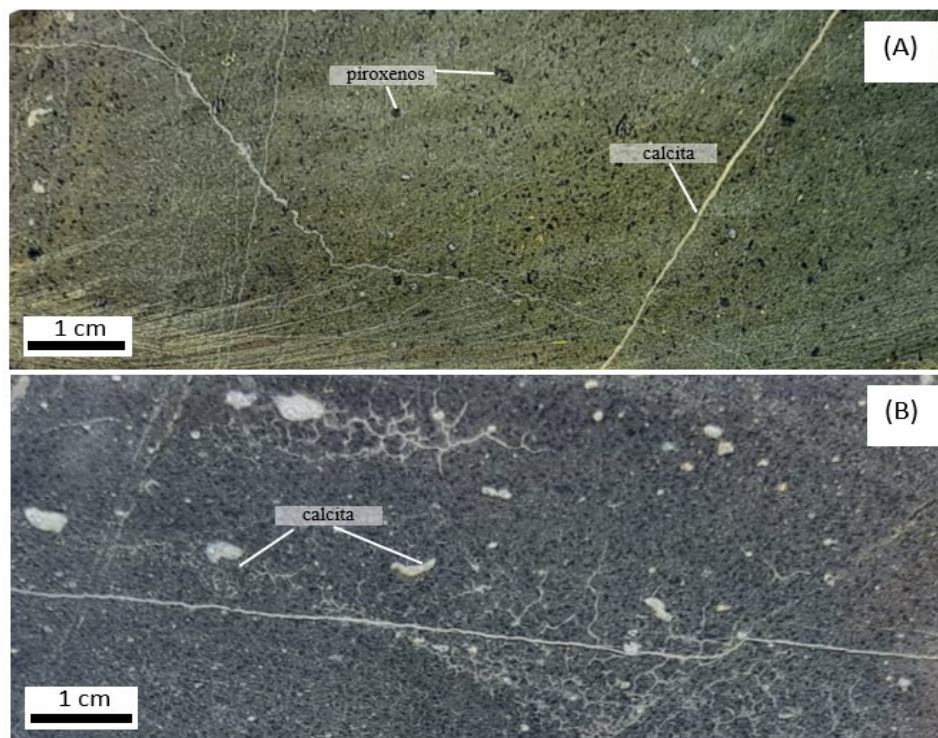


Figura 18. (A) Dique Lamprofírico de color verde claro con textura porfídica, fenocristales máficos y vetillas de calcita extraído de sondaje S-02-1. (B) Dique Lamprofírico de composición microdiorítica con vetillas y diseminación de calcita extraído de sondaje M-17.

5.2. Estratigrafía de Adriana Norte

Las columnas estratigráficas se elaboraron a partir de tres secciones realizadas en dirección E-W en Adriana Norte, las cuales se denominaron Sección Norte, Sección Centro y Sección Sur. Con el fin de identificar los posibles controles estratigráficos existentes sobre la mineralización y alteración, cada columna estratigráfica fue correlacionada con los valores de ley de cobre. De igual forma, las columnas fueron correlacionadas con los respectivos minerales de alteración identificados para cada caso.

La primera columna estratigráfica, se elaboró en base la información recolectada a partir del logueo de los sondajes AN-0030, AN-0026, M-14, SE-CL-6, M-15 y M-14, los cuales se encuentran en la Sección Norte (Figura 19) de coordenada UTM 6.960.684N.

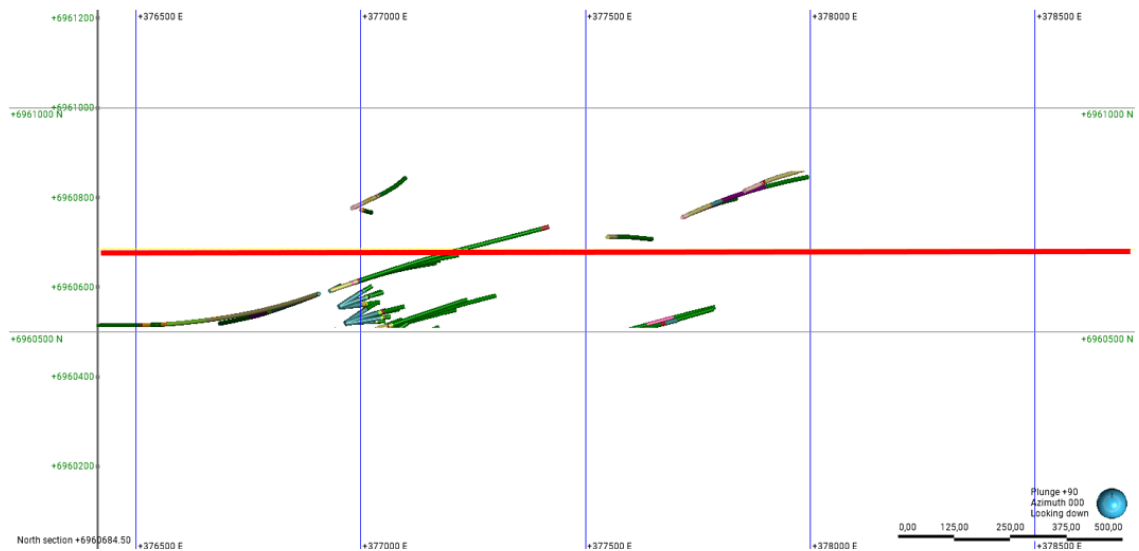


Figura 19. Sección Norte con coordenada UTM 6.960.684N realizada en el Sector Adriana Norte, la cual incluye los sondajes AN-0030, AN-0026, M-14, SE-CL-6, M-15 y M-14A.

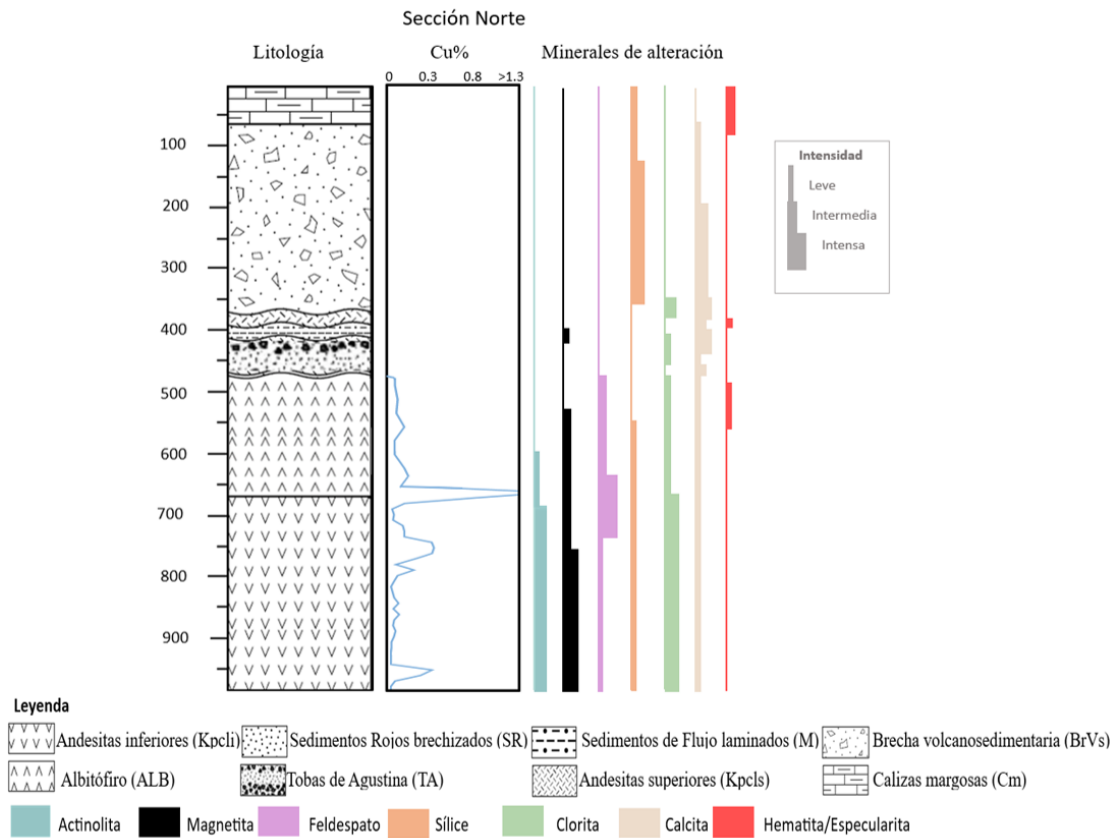


Figura 20. Columna estratigráfica de la Sección Norte, la cual incluye el porcentaje de Cobre y los principales minerales de alteración en cada unidad estratigráfica.

La columna estratigráfica de la Sección Norte (Figura 20), muestra un espesor total aproximado de 992 m, de tal manera que de base a techo se encuentran las siguientes unidades litológicas: las Andesitas inferiores (Kpcli) de un espesor aproximado de 330 m, se encuentran sobreyacidas concordantemente por el Albitófiro (ALB), el cual cuenta con un espesor aproximado de 200 m. Posteriormente se encuentra la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR), el cual sobreyace en discordancia erosiva a las unidades volcánicas y consta con un espesor de 5 m. Esta unidad se encuentra sobreyacida en discordancia erosiva por las Tobas de Agustina (TA), las cuales tienen un espesor de 55 m. La unidad Sedimentos de Flujo laminados (M) con un espesor de 22 m, sobreyace en discordancia erosiva a las Tobas de Agustina (TA) y subyace de la misma manera a las

Andesitas superiores (Kpcls) de espesor de 20 m. Finalmente se encuentra la unidad de Brecha volcanosedimentaria (BrVs) con un espesor máximo de 300 m, la cual subyace en concordancia a las Calizas margosas (Cm), que cuentan con un espesor aproximado de 60 m.

En cuanto a la concentración de las leyes de cobre, estas se hospedan principalmente en el contacto entre las unidades Albitófiro (ALB) y las Andesitas inferiores (Kpcli), alcanzando valores porcentuales de cobre mayor a 1.3%. Los minerales principales de alteración se distribuyen en todas las unidades litológicas, predominando la actinolita, magnetita, feldespatos y clorita en las zonas de mineralización de mena y en menor proporción la sílice y calcita.

La segunda columna estratigráfica, se elaboró en base a la información recolectada a partir del logeo de los sondajes M-17, S-01A-1, AN-0034 y AN-0039, los cuales se distribuyen dentro de la Sección Centro (Figura 21). Esta sección tiene coordenada UTM 6.960.342N.

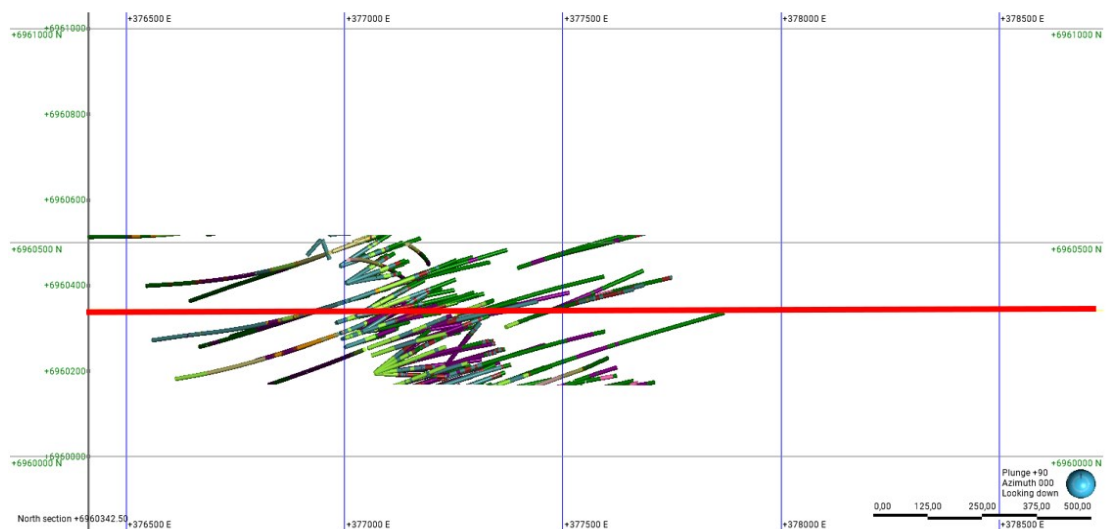


Figura 21. Sección Centro con coordenada UTM 6.960.342N realizada en el Sector Adriana Norte, la cual incluye los sondajes M-17, S-01A-1, AN-0034 y AN-0039.

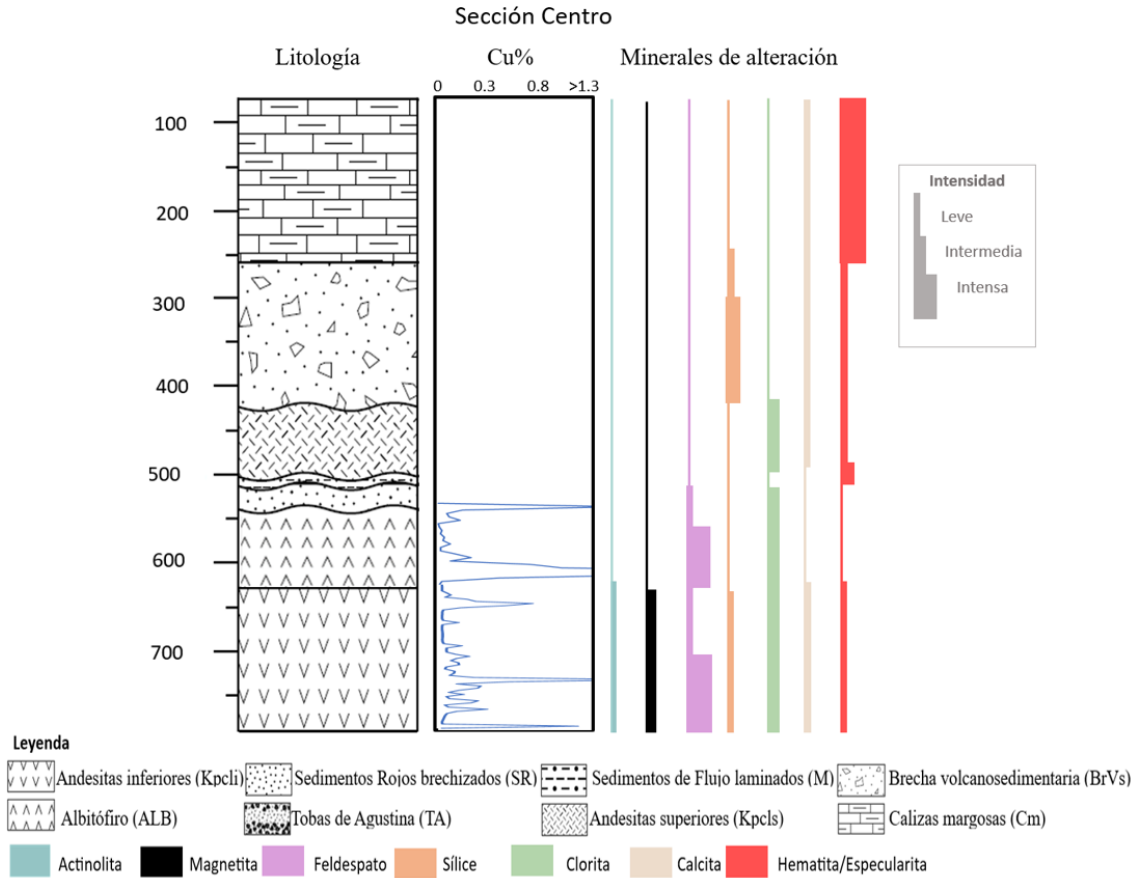


Figura 22. Columna estratigráfica de la Sección Centro, la cual incluye el porcentaje de Cobre y los principales minerales de alteración en cada unidad estratigráfica.

La columna estratigráfica de la Sección Centro (Figura 22), muestra un espesor total de 772 m y se conforma de base de techo de la siguiente manera: primero se encuentran las Andesitas inferiores (Kpcli), las cuales presentan un espesor aproximado de 170 m y subyacen concordantemente al Albitófiro (ALB), el cual cuenta con un espesor de 95 m. El Albitófiro (ALB) se encuentra sobreyacido en discordancia erosiva por la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR) de espesor aproximado de 25 m, el cual a la vez subyace en discordancia erosiva a la unidad Tobas de Agustina (TA), la cual tiene un espesor de 2 m, que no es visible en la columna. Posteriormente, se encuentran los Sedimentos de Flujo laminados (M), con un espesor de 20 m, los cuales sobreyacen en

discordancia erosiva a las Tobas de Agustina (TA) y a la vez, subyacen en discordancia erosiva a las Andesitas superiores (Kpcls) de espesor de 80 m. Hacia la parte superior, se encuentran las Brecha volcanosedimentaria (BrVs) con un espesor de 160 m, sobreyacidas concordantemente por la unidad de Calizas margosas (Cm) de espesor de 185 m.

El contenido de cobre porcentual, alcanza los valores más altos en los contactos. Principalmente entre la parte superior e inferior de la unidad Albitófiro (ALB) y, además, se alcanzan valores de leyes sobre el 1.3% en la parte inferior de las Andesitas inferiores (Kpcli). Los minerales de alteración se presentan principalmente en las unidades hospedadoras de cobre, destacando los feldespatos y en menor intensidad la magnetita y clorita. En las unidades litológicas superiores de la columna, predomina la hematita, calcita y sílice.

Para la elaboración de la tercera columna estratigráfica, se realizó la Sección Sur (Figura 23) con coordenada UTM 6.960.038. Esta sección corta los sondajes S-08-1, AN-353, AN-0015, AN-0029, AN-0001 y AN-0003.

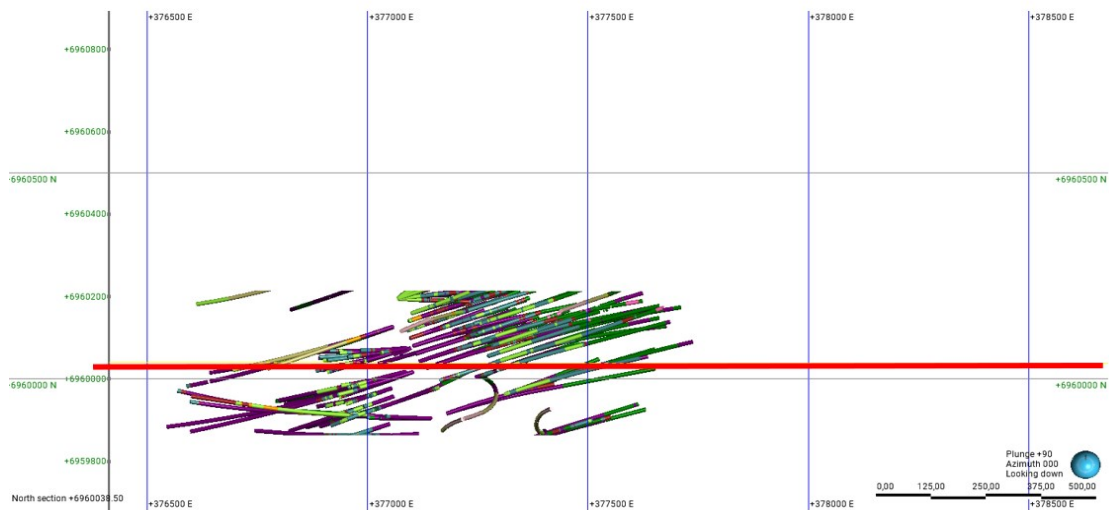


Figura 23. Sección Sur con coordenada UTM 6.960.038N realizada en el Sector Adriana Norte, la cual incluye los sondajes S-08-1, AN-353, AN-0015, AN-0029, AN-0001 y AN-0003.

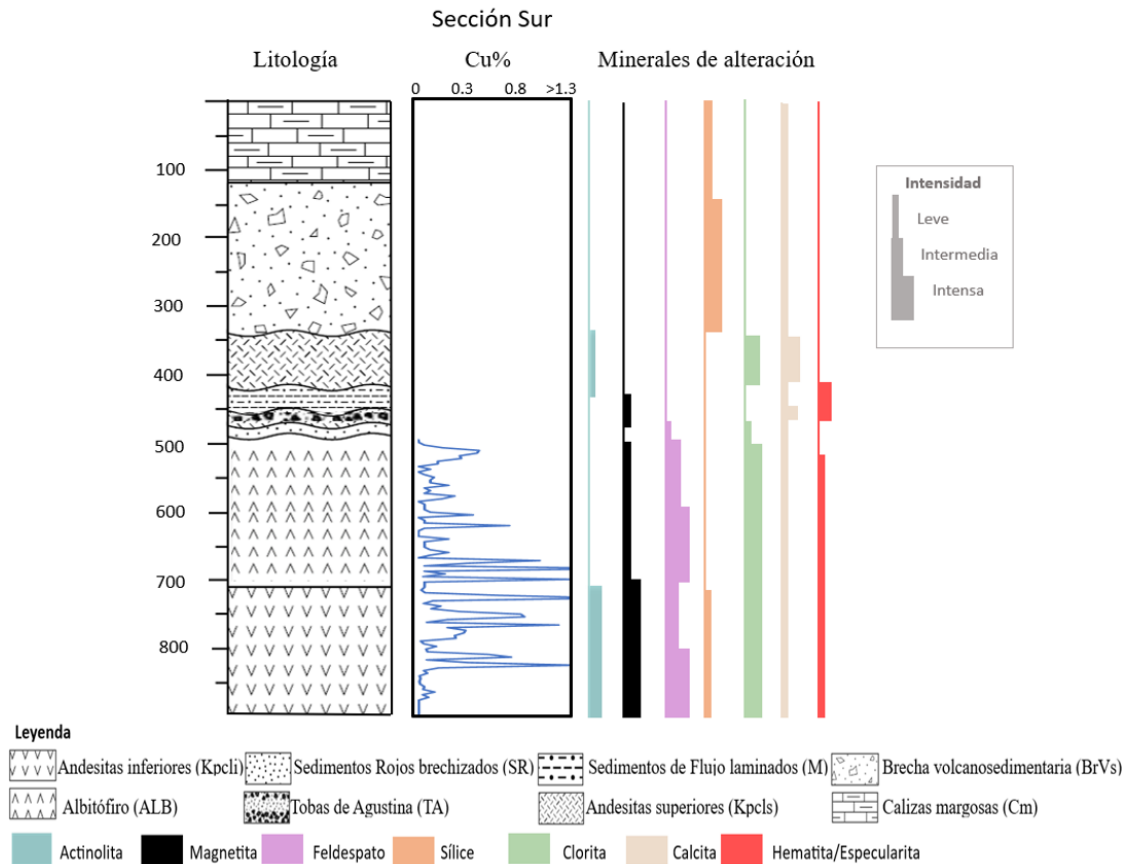


Figura 24. Columna estratigráfica de la Sección Sur, la cual incluye el porcentaje de Cobre y los principales minerales de alteración en cada unidad estratigráfica.

La columna estratigráfica de la Sección Sur (Figura 24), tiene un espesor total de 896 m, de manera que de base a techo se encuentran las Andesitas inferiores (Kpcli), las cuales cuentan con un espesor de 190 m y subyacen concordantemente al Albitófiro (ALB), el cual consta con un espesor de 225 m. Sobre el Albitófiro, se encuentra la unidad de Sedimentos Rojos brechizados (SR) con un espesor máximo de 16 m, subyaciendo en discordancia erosiva a la unidad Tobas de Agustina (TA), la cual tiene espesor de 18 m. Los Sedimentos de Flujo laminados (M) con un espesor de 35 m, sobreyacen en discordancia erosiva a las Tobas de Agustina (TA) y subyacen de la misma manera a las Andesitas superiores (Kpcls) de espesor de 80 m. Posteriormente la unidad de Brecha

volcanosedimentaria (BrVs), con un espesor aproximado de 213 m, sobreyace en discordancia erosiva a las Andesitas superiores (Kpcls) y subyace concordantemente a las Calizas margosas (Cm), las cuales tienen un espesor de 119 m.

Además, se puede observar que los contenidos porcentuales de cobre, varían desde valores igual a 0% hasta valores mayor a 1.3%. De esta manera, los porcentajes mayores de cobre se encuentran desde el contacto inferior del Albitófiro (ALB) y se distribuye por toda la unidad de Andesitas inferiores (Kpcli), alcanzando valores mayores a medida que aumenta la profundidad. En cuanto a los minerales de alteración, en las zonas más profundas, encuentra magnetita, fesdespato, actinolita y clorita, principalmente en las unidades Tobas Agustina (TA), Sedimentos Rojos brechizados (SR), Albitófiro (ALB) y Andesitas inferiores (Kpcli). La sílice alcanza mayor intensidad en la Brecha volcanosedimentaria y la hematita en los Sedimentos de Flujo laminados (M).

5.3. Modelo Geológico actualizado de Adriana Norte

El modelo geológico actualizado de Adriana Norte (Figura 25) tiene una extensión delimitada por las coordenadas UTM máximas 6.961.599N; 379.100E; y coordenadas mínimas 6.959.500N; 376.300E con una elevación mínima de 250 m bajo el nivel del mar y una elevación máxima de 1.100 m. Además, Los límites de la superficie del modelo se ajustaron con la topografía.

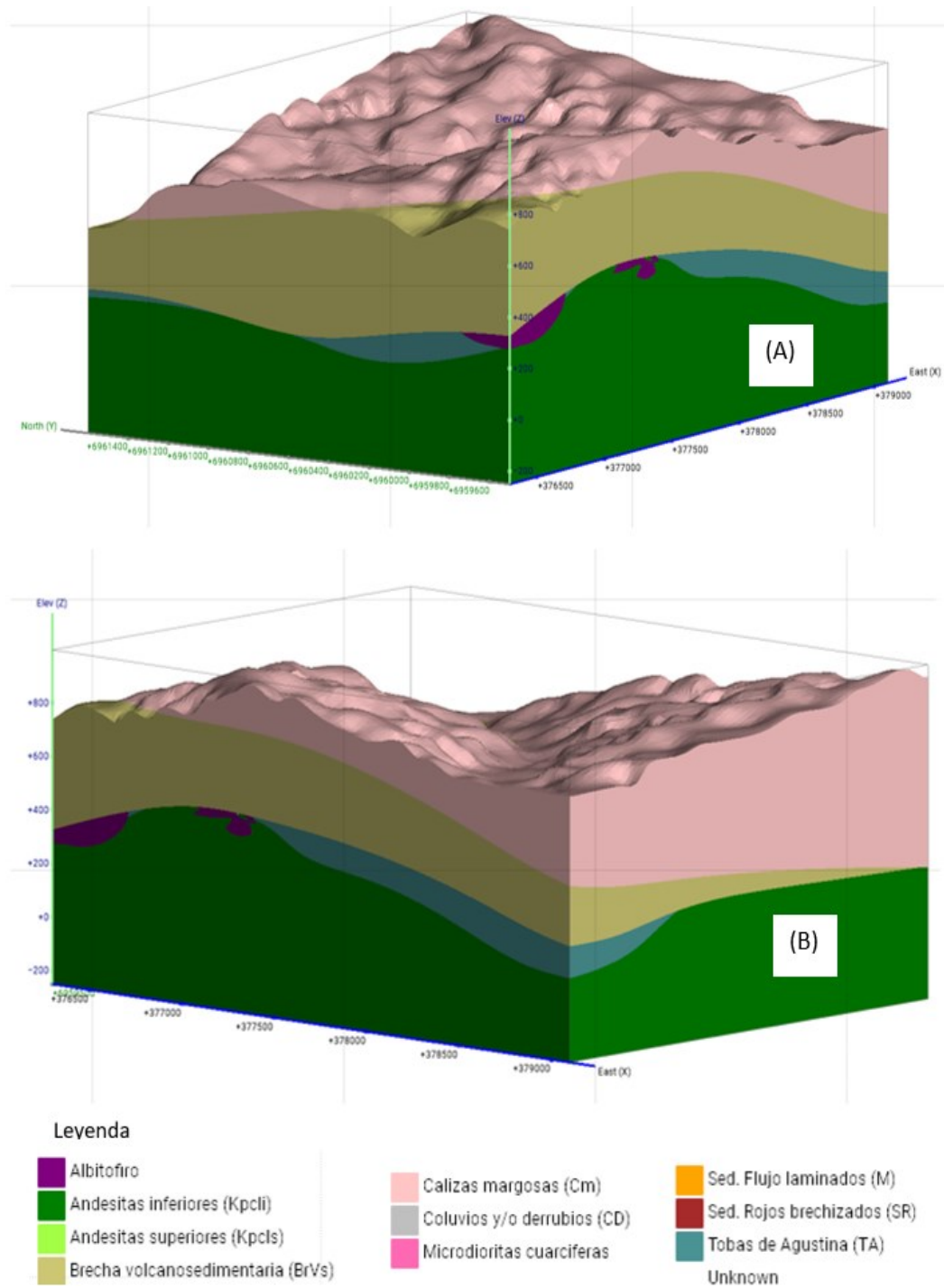


Figura 25. Modelo geológico para Adriana Norte con su correspondiente leyenda: (A) Vista S-W. (B) Vista S-E.

Los volúmenes del modelo se distribuyen de la siguiente manera: la unidad Andesitas inferiores (Kpcli) cuenta con un volumen total de 3.440.600.000 m³, el Albitófiro (ALB) consta de un volumen total de 160.950.000 m³, los Sedimentos Rojos brechizados (SR) un volumen de 3.335.500 m³, las Tobas de Agustina (TA) constan con un volumen total de 300.530.000 m³, los Sedimentos de Flujo laminados (M) con un volumen de 3.158.300 m³, las Andesitas superiores (Kpcls) con un volumen de 12.989.000 m³, la Brecha volcanosedimentaria (BrVs) con un volumen de 943.820.000 m³ y las Calizas margosas (Cm) cuentan con un volumen de 1.125.400.000 m³.

En el siguiente gráfico circular correspondiente a la Figura 26, se puede observar la distribución porcentual de los volúmenes totales de cada unidad litológica modelada, de tal manera que, las Andesitas inferiores (Kpcli) constituyen la mayor parte del modelo geológico actualizado de Adriana Norte, con un valor porcentual de 57% del volumen del total del modelo. La unidad de Calizas margosas (Cm) constituyen el 19% del volumen total, la Brecha volcanosedimentaria (BrVs) el 16%, las Tobas de Agustina (TA) el 5%, El Albitófiro el 3% y las unidades de Sedimentos Rojos brechizados (SR), Sedimentos de Flujos laminados (M), Andesitas superiores (Kpcls) y Microdioritas cuarcíferas constituyen un porcentaje cercano al 0% en relación al volumen total del modelo geológico.

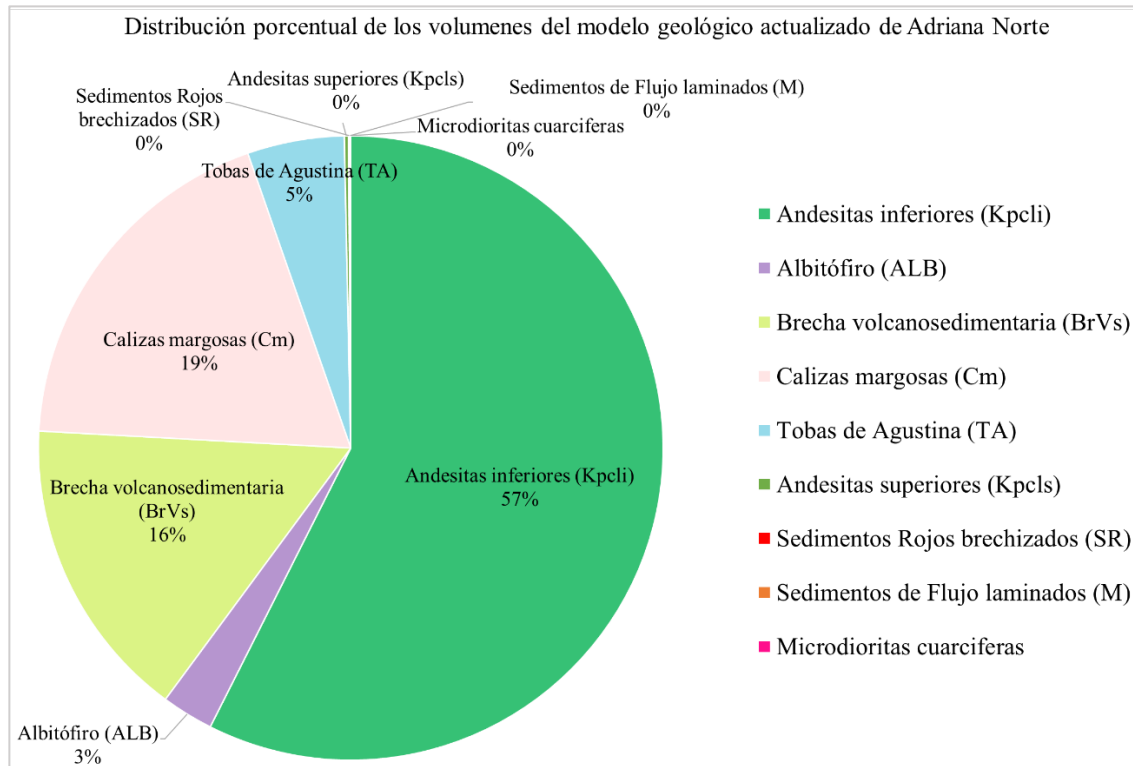


Figura 26. Gráfico circular, el cual muestra la distribución de los volúmenes de cada unidad litológica modelada.

Además, en el gráfico circular de la Figura 27, se muestra la distribución de la base de datos utilizada para la creación del modelo, esto significa, que la mayor información extraída del logueo de sondajes corresponde a la unidad Albitófiro (ALB), siendo el 42% de la información total, en conjunto con las Andesitas inferiores (Kpcli), las cuales constituyen el 28% del total de la información de la base de datos. La unidad Tobas de Agustina constituye el 14%, Las Andesitas superiores (Kpcls) el 7%, la Brecha volcanosedimentaria (BrVs) el 4%, al igual que Sedimentos Rojos brechizados (SR) y las unidades restantes corresponden a porcentajes cercanos al 0% de la información total.

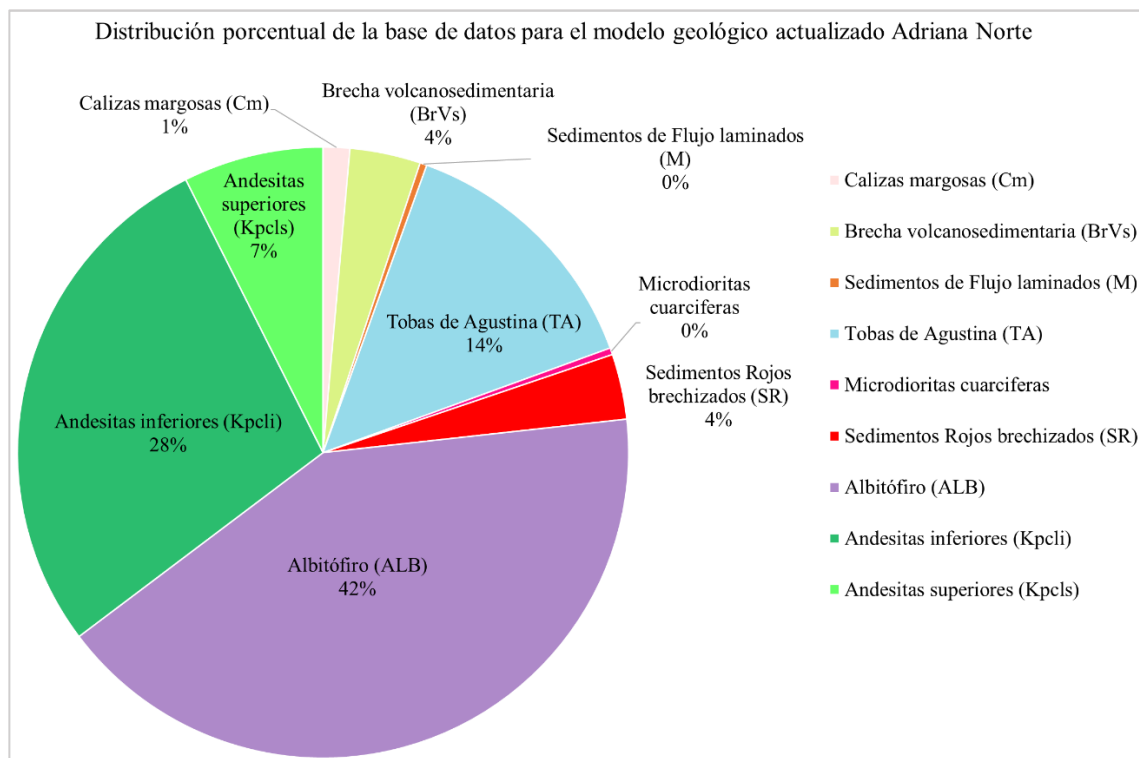


Figura 27. Gráfico circular, el cual muestra la distribución de las unidades litológicas de la base de datos a partir de los sondajes.

Las unidades litológicas utilizadas para la creación del modelo geológico, corresponden a las definidas para Carola Central, sin embargo, en algunas ocasiones fue necesario crear nuevas litologías para la optimización del modelo. Se debe destacar que el modelo se realizó con todos los sondajes realizados en la zona, sin embargo, se consideraron 42 sondajes guía, los cuales fueron re-logueados para la actualización de la información litológica. Es decir, a partir del logueo de los 42 sondajes principales, se modificaron las inconsistencias litológicas en el modelo previo. Los casos particulares incluyen el cambio de la unidad de Tobas de Agustina (TA) en el modelo anterior por Brecha volcanosedimentaria (BrVs) en el modelo actual, además de modificar la unidad anteriormente definida como Dioritas a Andesitas superiores (Kpcls).

En cuanto a la cronología de superficies de contacto, esta se determinó de más antiguo a más nuevo de la siguiente manera: Andesitas inferiores (Kpcli) con un contacto inferior desconocido, Sedimentos Rojos brechizados (SR), Sedimentos de Flujo laminados (M), Albitófiro (ALB), Tobas de Agustina (TA) en contacto erosivo con Brecha volcanosedimentaria (BrVs), Andesitas superiores (Kpcls), Microdioritas cuarcíferas y Brecha volcanosedimentaria (BrVs) en contacto erosivo con Calizas margosas (Cm). La disposición de las unidades litológicas en relación a la cronología anteriormente descrita, se puede visualizar en la Figura 28, la cual muestra el modelo geológico de Adriana Norte en un corte transversal en dirección NE-SW.

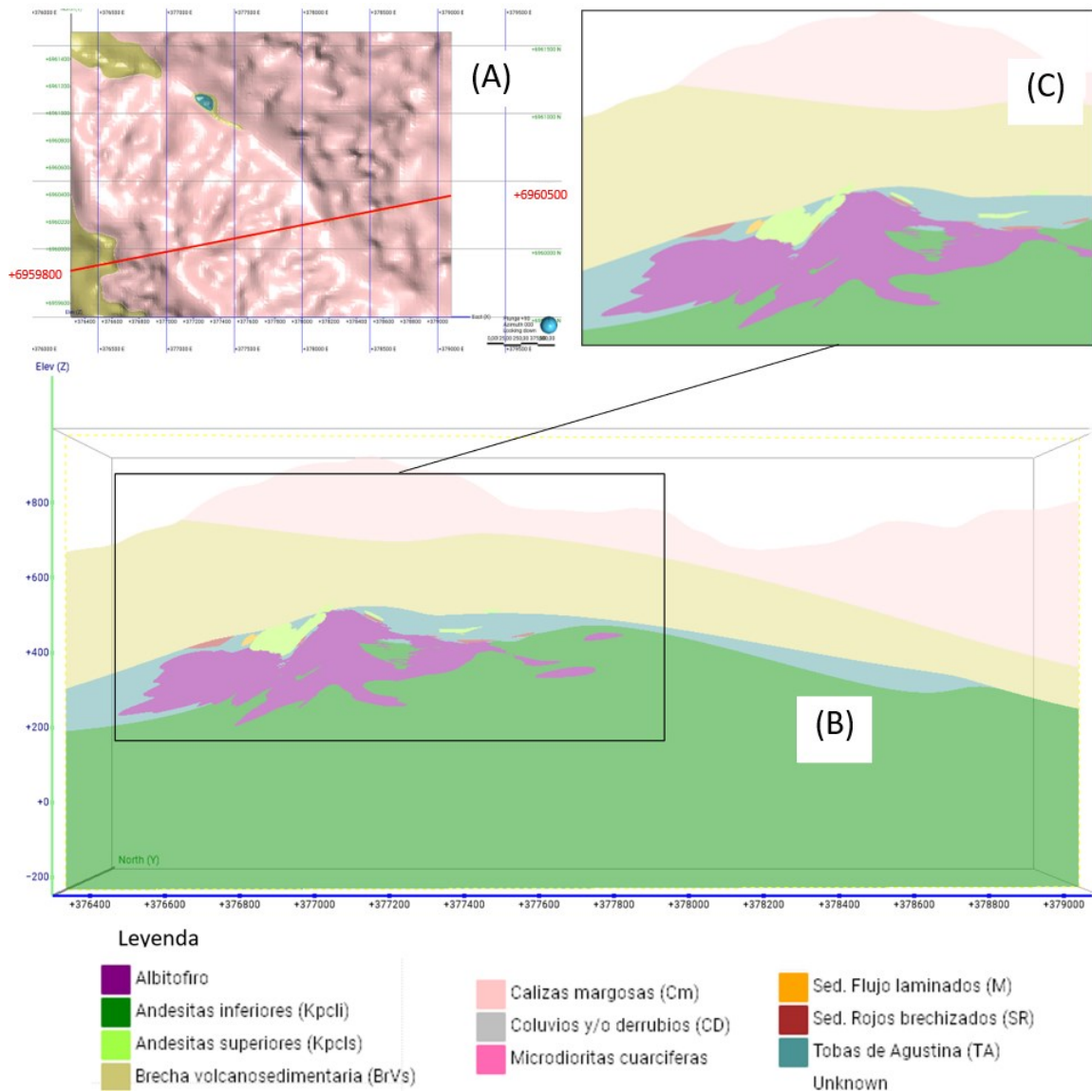


Figura 28. (A) Vista en planta de sección transversal NE-SW en el modelo geológico actualizado de Adriana Norte. (B) Vista Sur de corte transversal NE-SW representativo del modelo geológico, en el cual se muestra disposición de las unidades litológicas definidas para Adriana Norte con su respectiva leyenda. (C) Imagen ampliada para una mejor visualización del corte transversal.

De manera complementaria, se realizaron dos secciones transversales en función de las principales estructuras en Adriana Norte: sección en base a la Falla Cuerpo 1 (Figura

29), la cual tiene una inclinación de 47° con dirección SE y azimut 240° y otra sección en base a la Falla Estocada Reconocimiento 5 (Figura 30), la cual tiene una inclinación de 61° en dirección SE y azimut 266° .

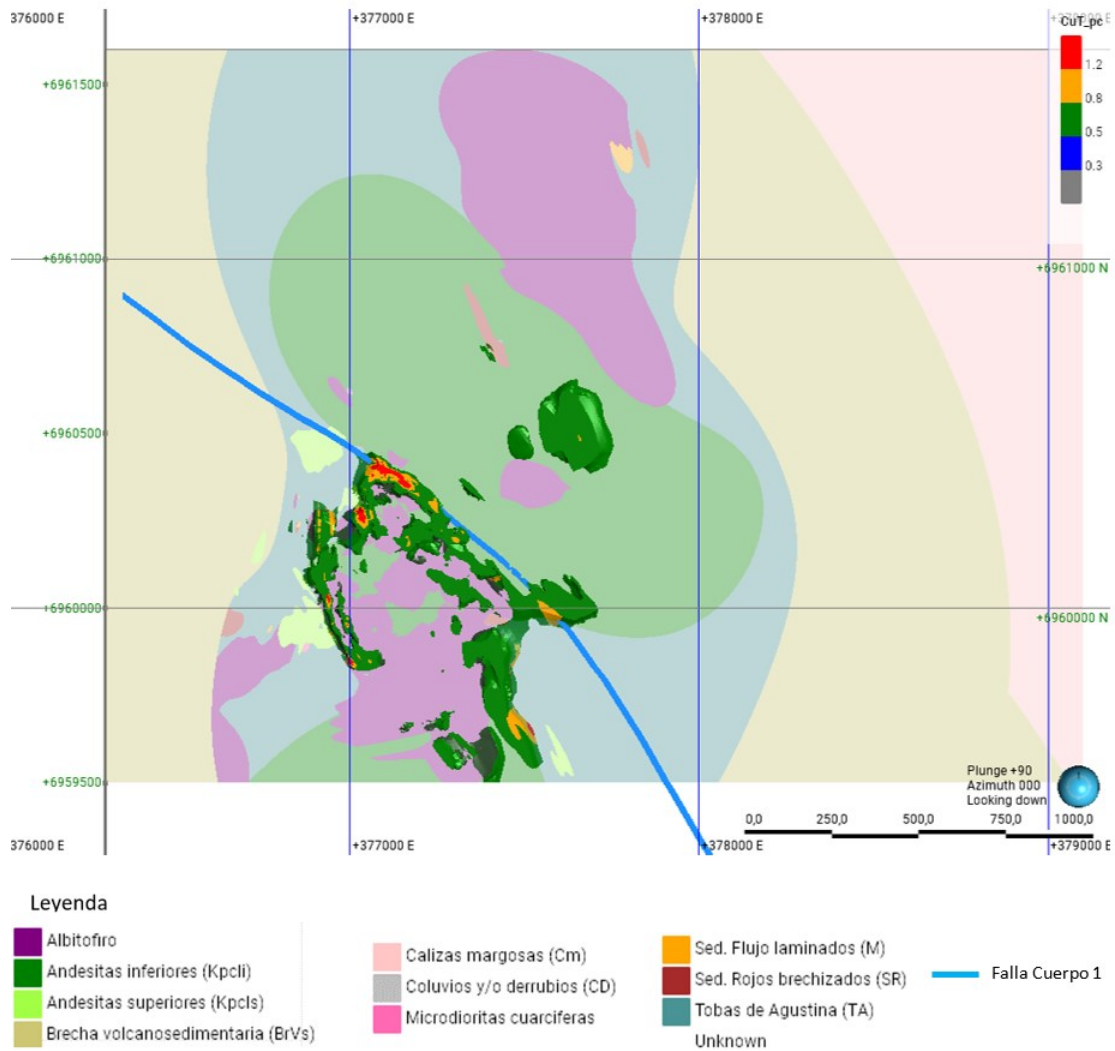


Figura 29. Ubicación de la sección realizada a partir de la Falla Cuerpo 1 en el modelo geológico de Adriana Norte.

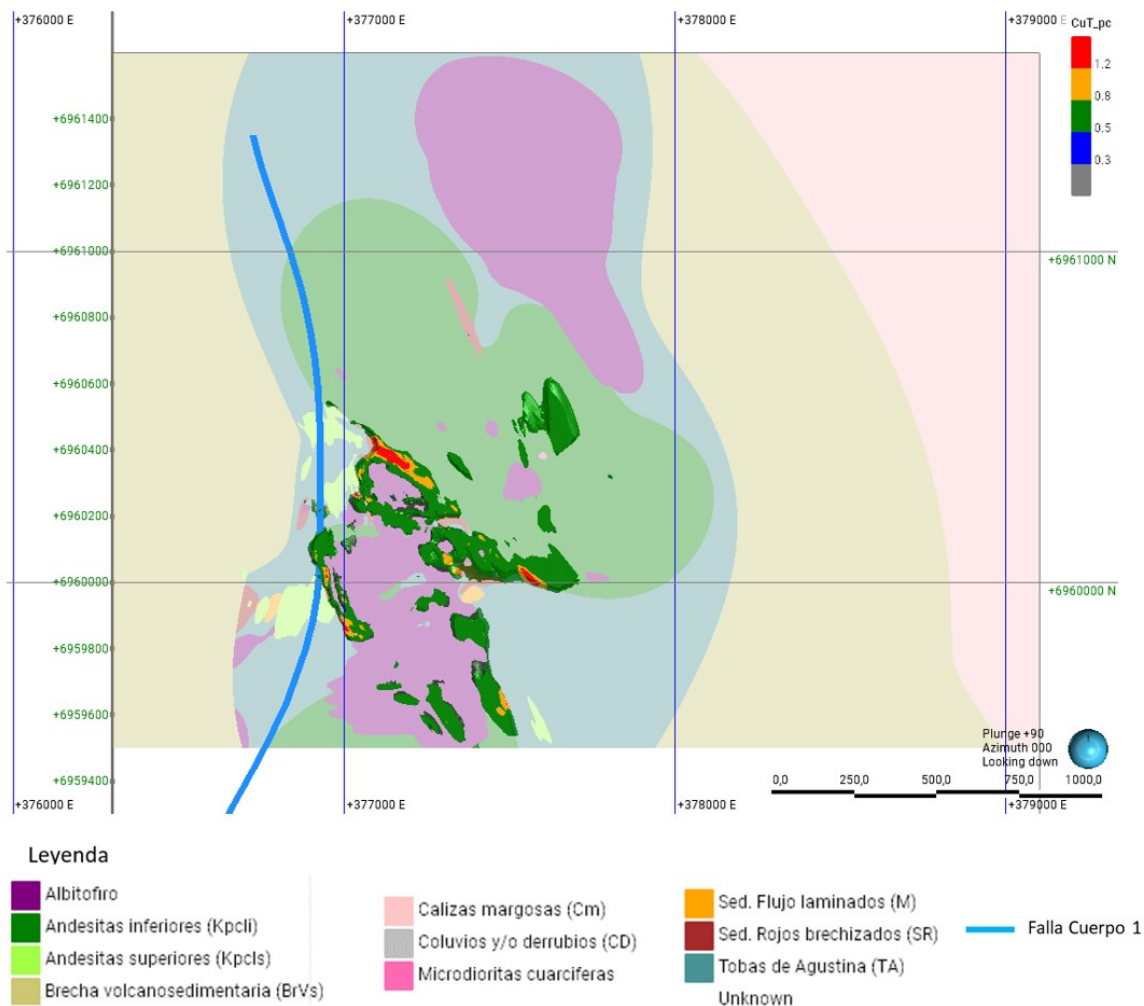
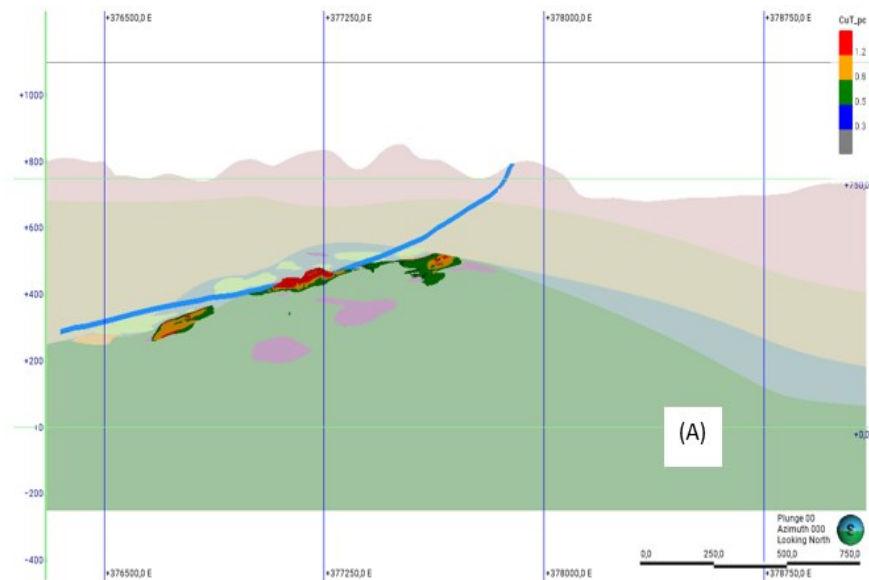


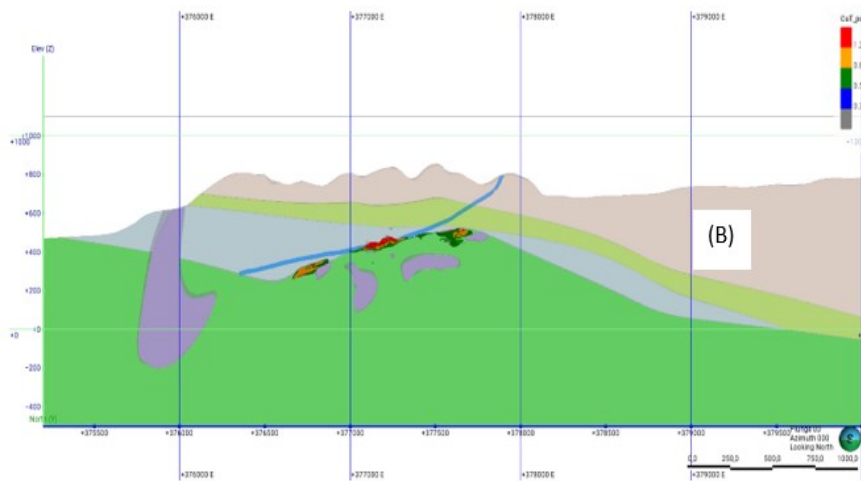
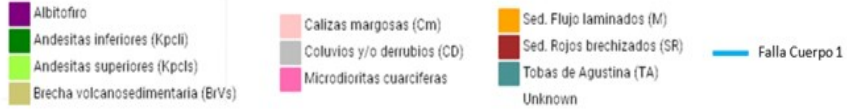
Figura 30. Ubicación de la sección realizada a partir de la Falla Estocada Reconocimiento 5 en el modelo geológico de Adriana Norte.

En ambas secciones se puede ver la mineralización de mena asociada a estas estructuras, además de reconocer la roca hospedante de dicha mineralización. En ambos casos la mineralización se hospeda principalmente en el contacto entre las unidades Andesitas inferiores (Kpcli) y Albitófiro (ALB) o en el límite superior o techo de las Andesitas inferiores (Kpcli).

De esta forma, se puede ver un control estructural en la mineralización, principalmente por fallas. Como se puede ver en la Figura 31 y Figura 32, la mineralización sigue el plano de las fallas Cuerpo 1 y Falla Estocada Reconocimiento 5, respectivamente, y se hospeda en el contacto de las unidades Andesitas inferiores (Kpcli) y Albitófiro (ALB), el cual, en el modelo actualizado tiene una mejor delimitación.



Leyenda



Leyenda



Figura 31. Corte transversal en el modelo geológico de Adriana Norte, en base a la Falla Cuerpo 1. (A) Sección en el modelo actualizado de Adriana Norte. (B) Sección en el modelo anterior de Adriana Norte.

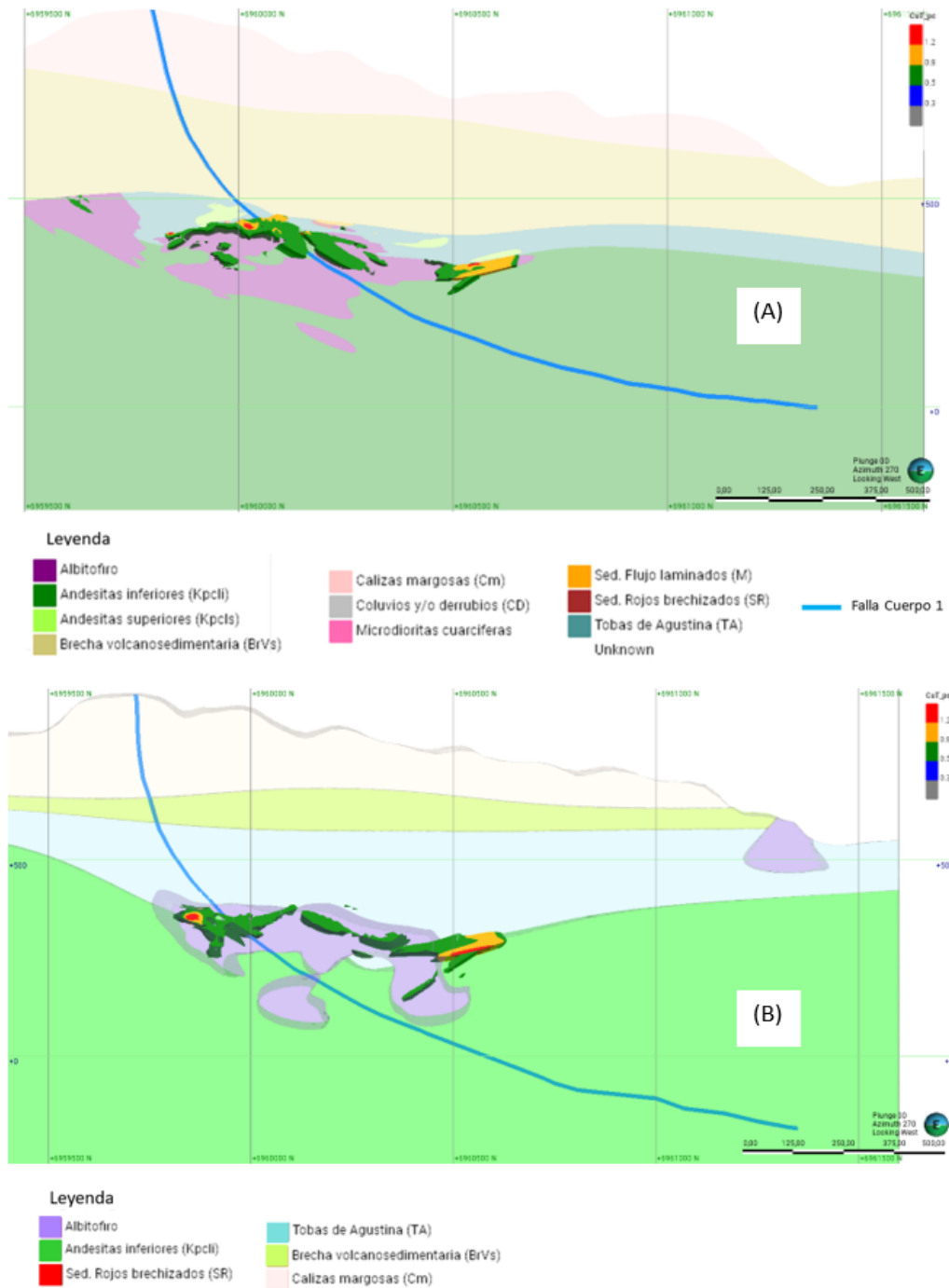


Figura 32. Corte transversal en el modelo geológico de Adriana Norte, en base a la Falla Estocada Reconocimiento 5. (A) Sección en el modelo actualizado de Adriana Norte. (B) Sección en el modelo anterior de Adriana Norte.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

6.1. Estratigrafía de Adriana Norte

Las unidades definidas para Adriana Norte corresponden a Andesitas inferiores (Kpcli), Albitófiro (ALB), Sedimentos Rojos brechizados (SR), Tobas de Agustina (TA), Sedimentos de Flujo laminados (M), Andesitas superiores (Kpcls), Brecha volcanosedimentaria (BrVs) y Calizas margosas (Cm). Estas unidades fueron descritas en las tres columnas estratigráficas levantadas, vale decir, las secciones Norte, Centro y Sur. En este contexto, las características petrográficas y relaciones de contacto descritas a partir de los sondajes diamantinos, sugieren la existencia de una buena correlación lateral entre dichas unidades, cuya interpretación se muestra en la correlación litoestratigráfica de la Figura 33, la cual se creó en base a las tres columnas correspondientes a la Sección Norte, Sección Centro y Sección Sur.

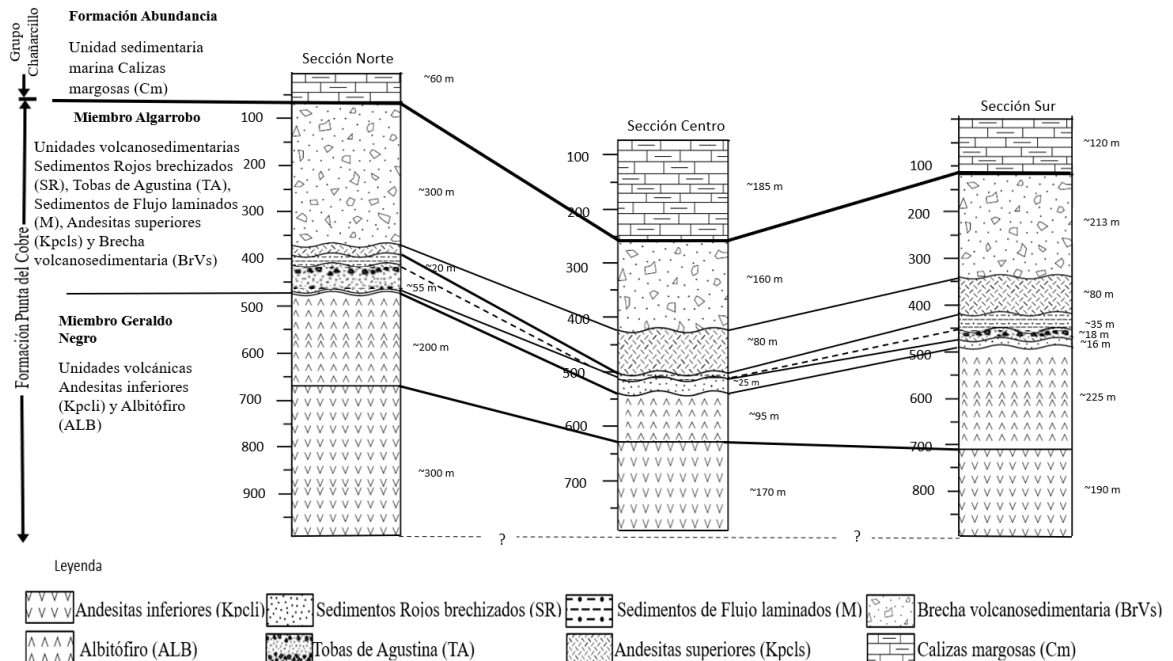


Figura 33. Correlación litoestratigráfica para columnas creadas a partir de la Sección Norte, Sección Centro y Sección Sur en el modelo geológico de Adriana Norte (elaboración propia).

A partir de la correlación litoestratigráfica (Figura 33) y la caracterización litológica realizada en este trabajo, se puede observar que la base del Miembro Geraldo Negro de la Formación Punta del Cobre son las unidades volcánicas correspondientes a Andesitas inferiores (Kpcli), seguida por el Albitófiro (ALB). El Albitófiro se encuentra limitado por las Autobrechas, tanto en el límite superior como inferior. En cuanto a las Andesitas inferiores (Kpcli), no se conoce el límite inferior. Sin embargo, fue posible determinar el contacto superior, el cual corresponde a la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR) que forma parte de la base del Miembro Algarrobo. La unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR) sobreyace en discordancia erosiva sobre las unidades volcánicas y tiene una morfología lentiforme a lo largo de todo el contacto. Sobre la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR) sobreyace en discordancia erosiva la unidad Tobas de Agustina (TA), la cual a la vez se encuentra en contacto erosivo con las unidades volcánicas Andesitas inferiores (Kpcli) y Albitófiro (ALB), ya que en ocasiones los Sedimentos Rojos brechizados (SR) se pierden entre ambas unidades o se interdigita con la unidad Tobas de Agustina (TA). Además, la unidad Tobas de Agustina (TA) se acuña hacia la parte central del área entre la unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs) y las Andesitas inferiores (Kpcli), alcanzando su mayor espesor hacia el N-W. La unidad de Brecha volcanosedimentaria (BrVs) sobreyace en discordancia erosiva sobre la unidad Tobas de Agustina (TA), y de la misma manera sobre la unidad Sedimentos de Flujo laminados (M), el cual se comportan estratigráficamente de forma similar al Sedimentos Rojos brechizados (SR). La unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs) consta de intercalaciones lateralmente adyacentes de litoarenitas, calizas, lutitas y brechas volcanosedimentarias las cuales tienen un espesor no tan variable de norte a sur, que disminuye hacia el este. En el techo del Miembro Algarrobo se encuentran las Andesitas superiores (Kpcls), las cuales se encuentran interestratificadas con la Brecha volcanosedimentaria (BrVs) y Tobas de Agustina (TA), razón por la cual también se asocian con la unidad Sedimentos de Flujo laminados (M). Además, esta unidad se encuentra sobreyacida concordantemente por niveles rítmicos de calizas y litoarenitas de

la unidad Calizas margosas (Cm) correspondiente al miembro basal de la Formación Abundancia. Estas calizas presentan estructuras laminares y tienen mayor espesor hacia el N-E, disminuyendo significativamente hacia el Sur. Cabe destacar que todas las unidades litológicas descritas mantean hacia el Este.

A partir de esta correlación se elaboró una columna tipo para Adriana Norte (Figura 34). Esta sirve para contrastar las unidades litológicas definidas en este trabajo en relación a las unidades litológicas existentes en el área de explotación actual, Minera Carola (Figura 35).

La columna tipo planteada para Adriana Norte (Figura 34), es consistente con lo descrito por Del Real *et al.* (2018) para las unidades pertenecientes al miembro inferior de la Formación Punta del Cobre. Esto permite asignar edades aproximadas a los niveles estratigráficos definidos para el sector Adriana Norte, además de establecer los espesores máximos de cada unidad, de acuerdo a los datos obtenidos de la caracterización litológica realizada a partir del logueo de sondajes. De esta forma, las Andesitas inferiores (Kpcli) constan con edad de 135.3 ± 1.0 Ma y un espesor de mínimo de 400 m y el Albitófiro con edad 132.0 ± 1.3 Ma y espesor ~ 350 m. Todas las unidades pertenecientes al miembro superior de la Formación Punta del Cobre tienen edad del Valangianiano superior. De esta forma, se definió al Sedimentos Rojos brechizados (SR) con un espesor de ~ 35 m, la unidad Tobas de Agustina (TA) con un espesor de ~ 55 m, los Sedimentos de Flujo laminados (M) con espesor máximo de 50 m, la Brecha Volcanosedimentaria (BrVs) con espesor ~ 300 m y las Andesitas superiores (Kpcls) con edad $132,4 \pm 2.9$ Ma y espesor máximo de 50 m. Cabe destacar que la Formación Punta del Cobre subyace a los sedimentos marinos del Valanginiano superior-Hauteriviano inferior (Biese-Nickel *In Hoffstetter et al.*, 1957) del Grupo Chañarcillo, estos corresponden a la unidad de Calizas margosas (Cm), la cual consta con un espesor mayor a los 200 m. El espesor total estimado es de 1490 m.

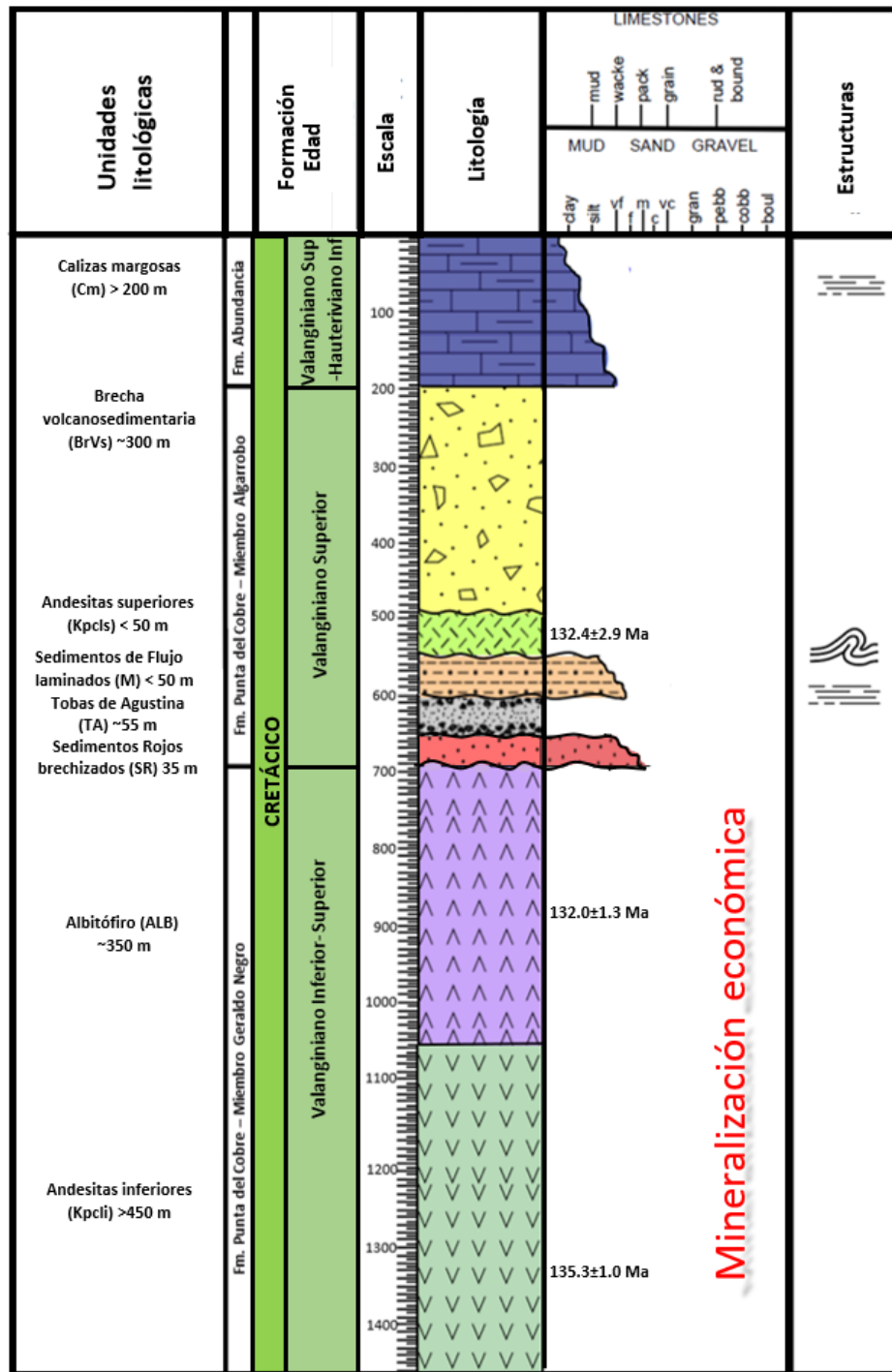


Figura 34. Columna estratigráfica tipo de Adriana Norte con las unidades litológicas presentes en el sector (elaboración propia).

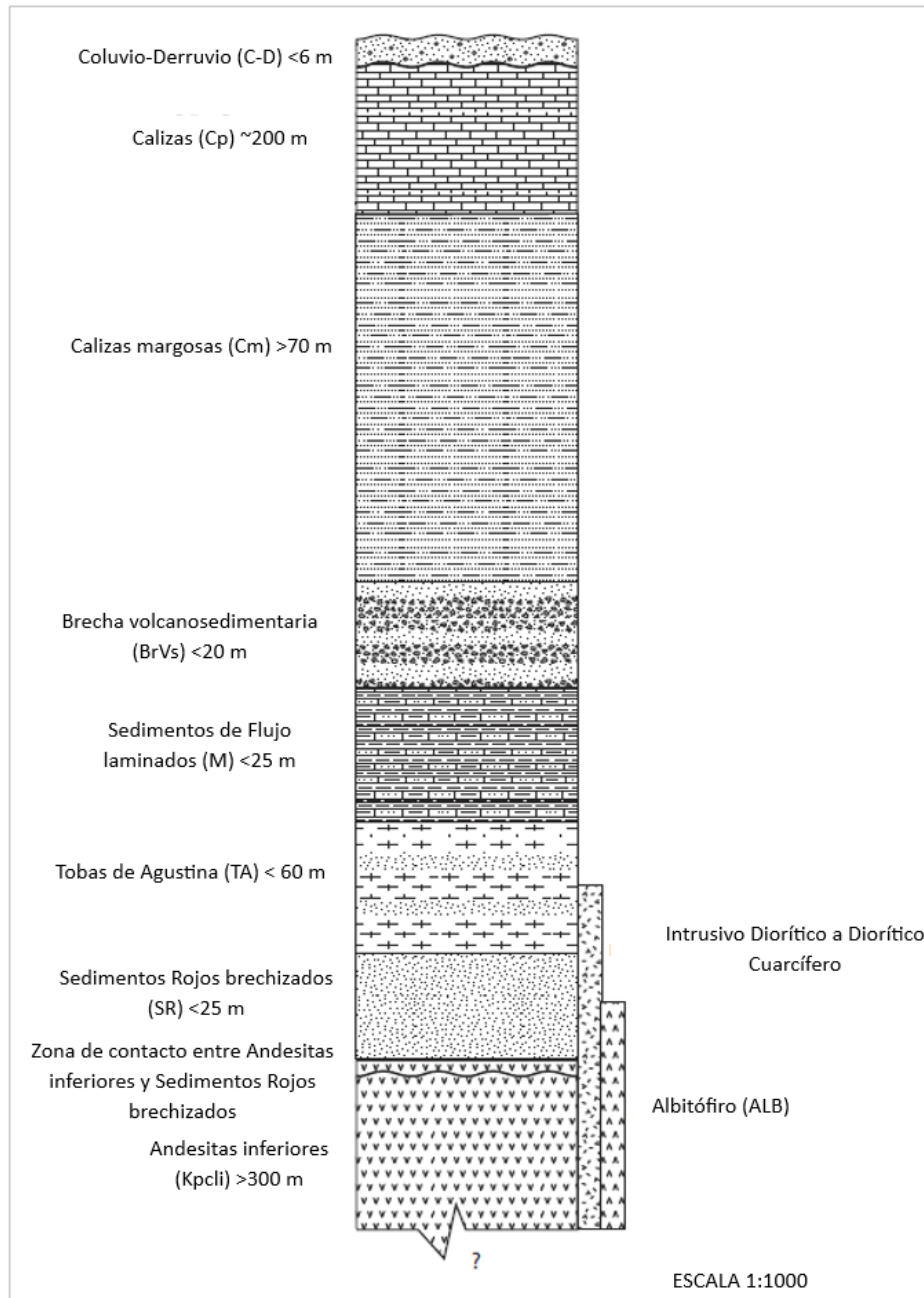


Figura 35. Columna estratigráfica de Mina Carola, extraída de informe geológico y mineralógico de la propiedad (extraído de informe local de Superintendencia de Geología de SCM Carola, 2019).

Por otro lado, con las columnas estratigráficas y las caracterizaciones litológicas realizadas en este trabajo, es posible determinar que las unidades volcánicas descritas por la Superintendencia de Geología en Mina Carola, guardan las mismas características que las descritas en Adriana Norte, especialmente la unidad Andesitas inferiores (Kpcli). En cuanto a la unidad Albitófiro (ALB), en Mina Carola, este se considera como una roca tanto dacítica como granodiorítica (Pop *et al.*, 2008), otorgándole un carácter volcánico y plutónico. En cambio, en Adriana Norte, se identificó el Albitófiro como un complejo volcánico, ya que no se trata de un solo tipo de roca, no obstante, el origen es extrusivo de composición andesítica-dacítica y se asocia generalmente a cloritización, albitización y alteración potásica.

Además, se puede observar que, los espesores de las unidades volcánicas varían en pocos m, sin embargo, es en la parte superior de la Formación Punta del Cobre en donde existen cambios significativos. En Adriana Norte, el miembro superior de la Formación Punta del Cobre; Miembro Algarrobo, se divide en cinco unidades litológicas principales: Sedimentos Rojos brechizados (SR), Toba de Agustina (TA), Sedimentos de Flujo laminados (M), Andesitas superiores (Kpcls) y Brecha volcanosedimentaria (BrVs); las cuales, en conjunto, cuentan con un espesor considerable, alcanzando hasta 490 m. En Mina Carola no es común separar las unidades volcanoclásticas del Miembro Algarrobo, ya que la importancia se centra en las unidades volcánicas, tanto en las Andesitas inferiores (Kpcli), como el Albitófiro (ALB), ya que estas son las que hospedan la mineralización de calcopirita. Así, en Mina Carola no se encuentra definida la unidad de Andesitas superiores (Kpcls).

En cuanto a las unidades litológicas del Miembro Algarrobo en Mina Carola, los Sedimentos Rojos brechizados (SR) y Tobas de Agustina (TA) descritos por Hopf (1990) y Pop *et al.* (2008) respectivamente, cuentan con las mismas características litológicas que en Adriana Norte, sin embargo, en este último sector, los espesores son mayores. De igual manera ocurre con la unidad Sedimentos de Flujo laminados (M), la

cual en Mina Carola consta de un espesor total de máximo 10 m y en Adriana Norte puede alcanzar un espesor de hasta 50 m. La Brecha volcanosedimentaria (BrVs), de igual forma, alcanzan un considerable espesor en Adriana de hasta 300 m a diferencia de Mina Carola, en donde esta unidad solo cuenta con un espesor máximo de 20 m. Los Diques Lamprofiricos, también tienen mayor espesor en Adriana Norte, alcanzando hasta 4 m y en Mina Carola sólo varían hasta 1,5 m de espesor.

Respecto a la alteración hidrotermal, de acuerdo de la Figura 20,22 y 24, cabe destacar que en Adriana Norte los principales minerales de alteración son la magnetita, la cual afecta a las rocas que se encuentran más en profundidad como las Andesitas inferiores (Kpcli) y con menor intensidad al Albitófiro (ALB); esto se relacionaría a una alteración con condiciones de pH neutro a ligeramente ácido y a temperaturas en un rango típico de alrededor de 100 °C a 300 °C. Además de la actinolita y clorita, las cuales también se encuentran en las unidades volcánicas, incluyendo a las Andesitas superiores (Kpcls). Para estas alteraciones se asocia a un ambiente hidrotermal con fluidos ricos en hierro y magnesio, los cuales presentan condiciones de pH neutro a temperaturas de 100 a 300°C, sin embargo, la actinolita en profundidad se formaría a temperaturas más altas, a partir de los 300°C.

El feldespato potásico se encuentra con mayor intensidad en el contacto entre las Andesitas inferiores (Kpcli) y el Albitófiro (ALB) (Figura 20), y también aumenta su intensidad, conforme aumento la profundidad del yacimiento (Figura 24). Este mineral de alteración se asocia a la actinolita-clorita-magnetita, razón por la cual se le atribuye una condición de pH neutro a alcalino a temperaturas entre 450°C en zonas más cercanas a superficie alcanzando hasta 600°C en profundidad.

En Mina Carola, según Tarnovschi (1999) y la información recolectada de logueos actuales, la clorita afecta a todas las rocas ígneas volcánicas, ígneas plutónicas y volcanoclásticas del yacimiento, sin embargo, al igual que en Adriana Norte, es más común en las Andesitas inferiores (Kpcli). La actinolita tanto en Adriana Norte como en

Mina Carola está ligada a la generación de los óxidos de hierro, como la magnetita y mushketovita en los niveles más profundos, y a la hematita y especularita en los niveles superiores. Comúnmente, en ambas zonas, el feldespato potásico brechiza a las Andesitas inferiores (Kpcli), principalmente a la litología denominada Brecha de techo. En cuanto a la silicificación, en Mina Carola esta se describe como un proceso posterior, el cual afecta principalmente a las Andesitas inferiores (Kpcli), rellenando fisuras de la roca, formando *stockwork* y vetillas. En Adriana Norte, la silificación es más intensa en la unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs), sin embargo, igual alcanza niveles más profundos, pero con menor intensidad. La calcita en Adriana Norte, se encuentra en todas las unidades litológicas, pero, alcanza mayor intensidad desde la unidad Tobas de Agustina (TA) hacia los niveles superiores, principalmente en las Andesitas superiores (Kpcls), en donde ocurre un reemplazo de plagioclasas a calcita, además de rellenos de vesículas, formando amígdalas de calcita. En cambio, en Mina Carola, la calcita se deposita en zonas más débiles estructuralmente, en donde la principal ocurrencia son las vetillas y *stockwork*. No obstante, tanto en Mina Carola como en Adriana Norte, este mineral de alteración se encuentra desde niveles más profundos hacia niveles más superficiales.

A modo general, y en relación a lo descrito por del Real *et al.* (2018), para el depósito Candelaria (Figura 36), existen similitudes entre las alteraciones hidrotermales de Adriana Norte y Candelaria, principalmente en las unidades volcánicas, en donde existe una sustitución pervasiva y destructiva desde el punto de vista textural de las Andesitas inferiores (Kpcli) por albita-epidota que hacen transición a una alteración de magnetita-actinolita-biotita-K feldespato \pm cuarzo de grano fino. Sin embargo, en Adriana Norte, no es tan común la formación intensa de biotita como en Candelaria. Además, en el Distrito Candelaria-Punta del Cobre, se ha interpretado la existencia de un control estratigráfico en la mineralización. En este contexto, la sucesión estratigráfica, con las respectivas alteraciones y mineralización de cobre asociada, se detallan en la Figura 36.

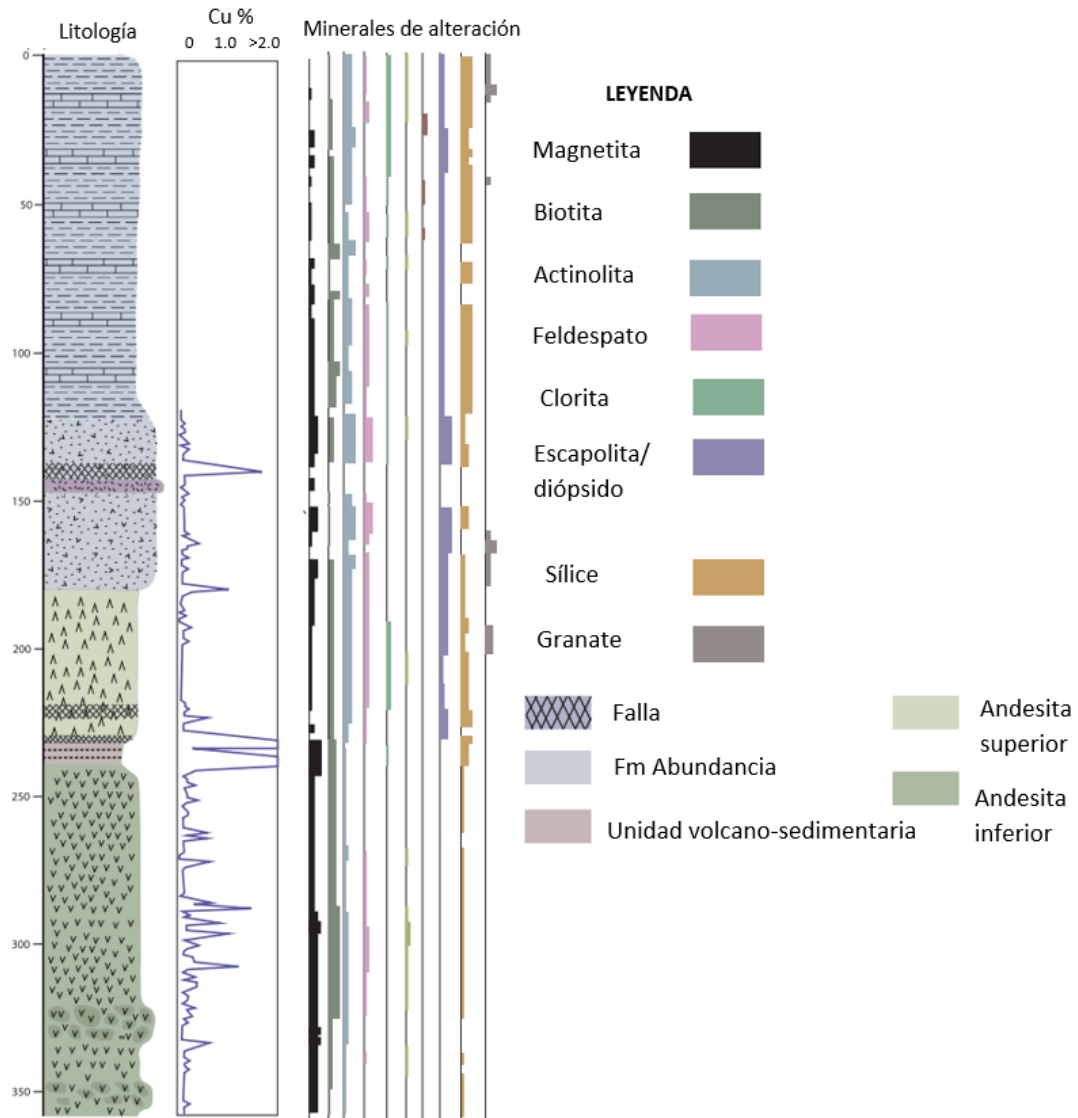


Figura 36. Registros representativos de testigos de perforación del depósito de Candelaria, los cuales muestran la distribución de los principales minerales de alteración integrados con las leyes de cobre, la litología y las fallas. El mapeo de la alteración de feldespato incluye tanto la albita rosa como el K-feldespato, que no fueron diferenciados durante la descripción del testigo (modificado de Del Real et al. (2018).

A continuación, se puede ver en la Figura 37A, una comparación entre un modelo geológico actualizado para Adriana Norte (Figura 37B) y el modelo geológico previamente existente en Adriana Norte (Figura 37C).

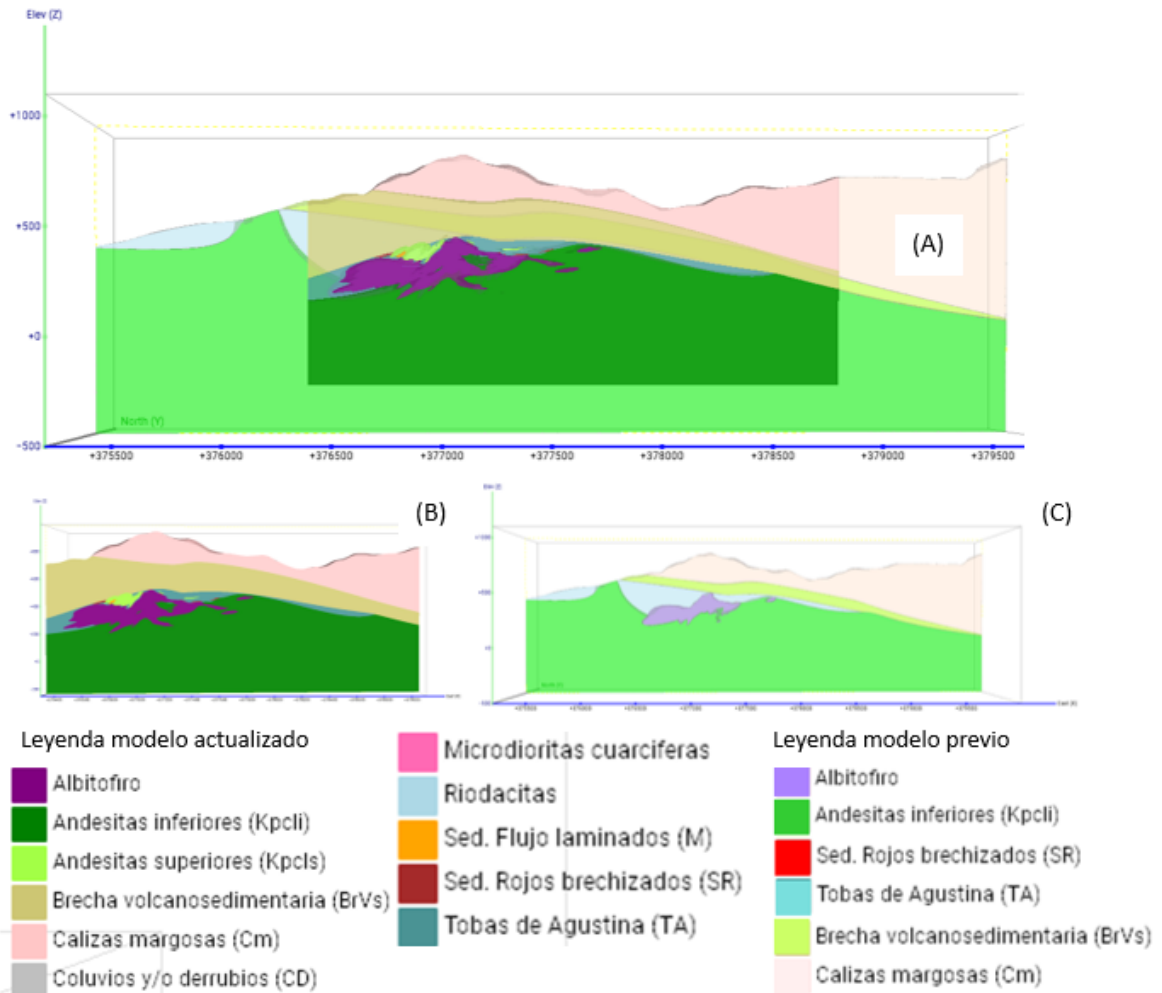


Figura 37. Vista norte de corte transversal representativo del modelo geológico previo y el actual con sus respectivas leyendas. (A) Superposición de modelo geológico actual sobre el modelo preexistente para mayor visualización de los cambios en la disposición de las unidades litológicas de Adriana Norte. (B) Corte transversal en el modelo geológico actualizado. (C) Corte transversal en el modelo geológico preexistente (elaboración propia).

En términos comparativos, el aporte del nuevo modelo es principalmente el reconocimiento del espesor de la unidad de Brecha volcanosedimentaria (BrVs) y la unidad Tobas de Agustina (TA), además de la generación de un nuevo sólido modelado para la unidad de Andesitas superiores (Kpcls). Esto es importante en el sentido de

conocer la profundidad de la mineralización, además de saber la porción de roca estéril para fines ingenieriles de producción. También en comparación con el modelo anterior de Adriana Norte, la unidad Albitófiro (ALB) disminuyó su volumen y está más acotada, y al ser esta una de las rocas hospedantes de mineralización, sirve como guía para efectos exploratorios posteriores en Adriana Norte.

A partir del re-logueo de sondajes realizado en este trabajo, se pudo determinar las diferencias e inconsistencias de la información previamente recolectada. Se debe destacar que se crearon nuevas litologías en algunas unidades, de esta manera, se hizo el cambio de la litología anteriormente caracterizada como piroclastitas pertenecientes a la unidad Tobas de Agustina (TA) a Brechas volcanosedimentarias pertenecientes a la unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs). La importancia de este cambio de litologías, permitió la continuidad de las unidades litológicas en el espacio, además de la definición correcta de los contactos. También el hecho de incluir la litología de Calizas margosas a la unidad de Brecha volcanosedimentaria (BrVs), logró entender que esta secuencia volcanosedimentaria, cuenta con intercalaciones menores de origen marino, correspondiente a calizas, en donde predominan las capas de brechas y litoarenitas. De manera adicional, se logró establecer mediante la revisión microscópica de cortes transparentes previamente realizados, que las rocas descritas como ígneas intrusivas; Dioritas, correspondían a rocas ígneas extrusivas pertenecientes a la unidad Andesitas superiores (Kpcls). Este cambio logró el entendimiento de la mineralización de esta unidad litológica, ya que en Mina Carola las Dioritas en ocasiones mostraban mineralización de mena y en Adriana Norte esto no ocurría.

A modo general, las descripciones y asignación de cada litología a una unidad litológica específica, entrega una caracterización más detallada de la estratigrafía de Adriana Norte. Habitualmente, distintos autores describen las unidades litológicas del Distrito Punta del Cobre de manera más general, por ejemplo, Del Real *et al.* (2018), como se puede ver en la Figura 5, determinan la existencia de una unidad volcánica basal,

correspondiente a las Andesitas inferiores (Kpcli) y al Albitófiro (ALB). Además, describe una unidad superior constituida por las Andesitas superiores (Kpcls) y posteriormente agrupa todas las unidades litológicas volcanoclásticas dentro de la Formación Abundancia y Formación Nantoco, sin hacer una distinción más amplia. De la misma manera lo hace Marshik y Fontboté (2001), definiendo las Andesitas inferiores (Kpcli) y Albitófiro (ALB) dentro del Miembro Geraldo Negro, luego describe el Miembro Algarrobo de manera general, en donde incluye todas las rocas volcanoclásticas y posterior depositación de las formaciones Abundancia y Nantoco.

El trabajo realizado por Sepúlveda (2017), el cual corresponde a la investigación más reciente realizado en Adriana Norte, determina diez unidades litológicas para el Cuerpo 1E, el cual forma parte del sector. A continuación, se nombrarán las unidades litológicas con los nombres asignados por el autor: la unidad de Andesita, Brecha de Techo, Lamprófiro, Albitófiro, Sedimento Rojo, Sedimento Verde, Arcosa, Brecha Sedimentaria, Lutita y Lavas Basálticas. A continuación, en la Figura 38 se muestra un perfil esquemático realizado por el autor, para visualizar la disposición de las unidades litológicas definidas en su trabajo.

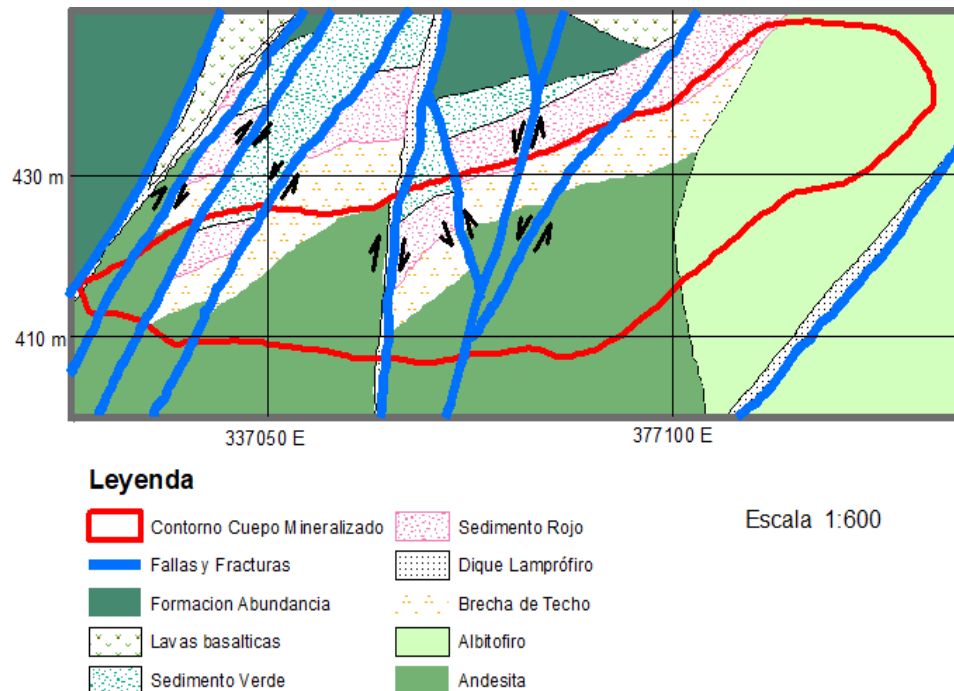


Figura 38. Perfil Litológico 3E Az. 70° del Cuerpo 1E, el cual forma parte de Adriana Norte (extraído de Sepúlveda, 2017).

En cuanto a las Andesitas y Albitófiro, estas se correlacionan a las unidades Andesitas inferiores (Kpcli) y Albitófiro (ALB). No obstante, Sepúlveda (2017), describe al Albitófiro como una roca intrusiva porfídica de composición tonalítica a diferencia del Albitófiro (ALB) descrito en este trabajo, como una roca extrusiva porfídica de composición andesítica-dacítica. En cuanto al Sedimento Rojo descrito por Sepúlveda (2017), este es similar en composición y textura a los Sedimentos Rojos brechizados (SR) descritos en este trabajo. Las principales diferencias en las caracterizaciones litológicas, se encuentran en las unidades sedimentarias y volcanosedimentarias. Sin embargo, de acuerdo a relaciones de contacto, posiciones estratigráficas y descripciones petrográficas, es posible correlacionar las unidades litológicas descritas por Sepúlveda (2017) y las descritas en este estudio.

Los Sedimentos Verdes descritos por el autor, se pueden correlacionar con la unidad Tobas de Agustina (TA), de la misma manera, las unidades sedimentarias como Arcosa, Brecha Sedimentaria y Lutita, se pueden correlacionar con la unidad denominada en este trabajo como Brecha volcanosedimentaria (BrVs) y finalmente las Lavas Basálticas, corresponderían a las Andesitas superiores (Kpcls).

6.2. Validación del modelo y planificación de sondajes exploratorios

De acuerdo a los volúmenes de cada unidad litológica modelada y su relación con la información litológica de la base de datos, es posible identificar que la metodología utilizada en este trabajo fue la adecuada para cumplir con los objetivos propuestos. No obstante, en casos particulares, la información de las litologías de la base de datos recolectada mediante el logueo de sondajes, es escasa. Como se puede observar en el gráfico de la Figura 27, el cual muestra la distribución de la información litológica obtenida a partir del logueo de sondajes, se puede identificar que la mayor información de los sondajes corresponde a las unidades Albitófiro (ALB), Andesitas inferiores (Kpcli) y Tobas de Agustina (TA), esto significaría que probablemente falte información de las unidades sobreyacentes a las unidades volcánicas. Para que la base de datos obtenida a partir del logueo de sondajes sea más consistente y equitativa, se sugiere la importancia de la realización de sondajes de superficie, los cuales corten las unidades litológicas pertenecientes a la Formación Abundancia y Algarrobo, es decir, a Calizas margosas (Cm), Brecha volcanosedimentaria (BrVs), Andesitas superiores (Kpcls) y Sedimentos de Flujo laminados (M). Cabe destacar que los volúmenes de las Calizas margosas (Cm) y la Brecha volcanosedimentaria (BrVs) son significativos, alcanzando en conjunto el 35% del modelo (Figura 26), razón por la cual sería pertinente una mejor definición de los volúmenes a partir de una base de datos más completa. Además, para complementar las caracterizaciones litológicas y optimizar el modelo geológico, sería conveniente la realización de un re-logueo más amplio, es decir, abarcar más sondajes, así como también efectuar un mapeo en interior mina en las labores del sector.

En la Tabla 3, se hace una validación del modelo geológico actualizado de Adriana Norte. De esta manera, se puede observar cuánto porcentaje de la información de los sondajes coincide con los sólidos de cada unidad litológica del modelo, por ejemplo: del 100% del sólido modelado como unidad Andesitas inferiores (Kpcli), el 94,30% coincide con la información caracterizada como esta unidad en los sondajes, de tal forma, que el porcentaje restante fue modelado en otra unidad litológica, en donde el 2,31% fue modelado como Albitófiro (ALB), el 0,19% fue modelado como Sedimentos Rojos brechizados (SR), el 1,48% fue modelado como Tobas de Agustina (TA), el 0,08% fue modelado como Andesitas superiores (Kpcls), el 0,08 fue modelado como la unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs) y el 1,53% no fue modelado. Esta variación en las porciones de la base de datos que no coinciden con el sólido del modelo, puede ser causada por los contactos entre unidades adyacentes, a una malla de sondajes irregular y a la dispersión de las cotas de los sondajes. En términos generales, no existe una gran disgregación de la base de datos, ya que los volúmenes de los sólidos modelados para cada unidad litológica, coinciden sobre el 70% con la información obtenida a partir del logueo de sondajes.

Tabla 3. Tabla comparativa de los sólidos de las unidades litológicas modeladas y la base de datos que coincide con los sólidos modelados.

Unidades litológicas (sólidos modelo geológico)	Unidades litológicas (base de datos que coincide con los sólidos del modelo geológico)			
	Andesitas inferiores (Kpcli)	Albitófiro (ALB)	Sedimentos Rojos brechizados (SR)	Tobas de Agustina (TA)
Andesitas inferiores (Kpcli)	94,30%	1,51%	2,05%	0,60%
Albitófiro (ALB)	2,31%	95,72%	4,22%	0,29%
Sedimentos Rojos brechizados (SR)	0,19%	0,16%	69,05%	1,02%
Tobas de Agustina (TA)	1,48%	0,52%	20,99%	71,45%
Sedimentos de Flujo laminados (M)	0,00%	0,00%	0,00%	0,04%
Andesitas superiores (Kpcls)	0,08%	0,09%	0,34%	2,74%
Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	0,08%	0,91%	3,27%	23,78%
Calizas margosas (Cm)	0,00%	0,00%	0,07%	0,00%
No modelado	1,53%	1,07%	0,00%	0,08%
Total	99,97%	99,98%	99,99%	100,00%
Unidades litológicas (sólidos modelo geológico)	Unidades litológicas (base de datos que coinciden con los sólidos del modelo geológico)			
	Sedimentos de Flujo laminados (M)	Andesitas superiores (Kpcls)	Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	Calizas margosas (Cm)
Andesitas inferiores (Kpcli)	0,14%	1,15%	0,00%	0,00%
Albitófiro (ALB)	0,61%	0,64%	0,00%	0,00%
Sedimentos Rojos brechizados (SR)	0,51%	0,38%	0,05%	0,00%
Tobas de Agustina (TA)	23,90%	7,12%	19,61%	0,00%
Sedimentos de Flujo laminados (M)	70,90%	0,16%	0,00%	0,00%
Andesitas superiores (Kpcls)	1,54%	90,13%	0,02%	0,00%
Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	2,40%	0,42%	80,31%	0,28%
Calizas margosas (Cm)	0,00%	0,00%	0,00%	99,72%
No modelado	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Total	100,00%	100,00%	99,99%	100,00%

Finalmente, al analizar el modelo geológico generado, es posible identificar algunas zonas donde sería conveniente la realización de sondajes exploratorios puntuales, los cuales permitirían completar la información litológica y ayudarían a la optimización del modelo geológico de Adriana Norte. De esta forma, sería posible reconocer y determinar la continuidad de los cuerpos mineralizados. Se establecieron 6 perfiles en distintas labores del sector (Figura 39), los cuales permiten identificar zonas en las cuales resultaría pertinente la realización de sondajes.

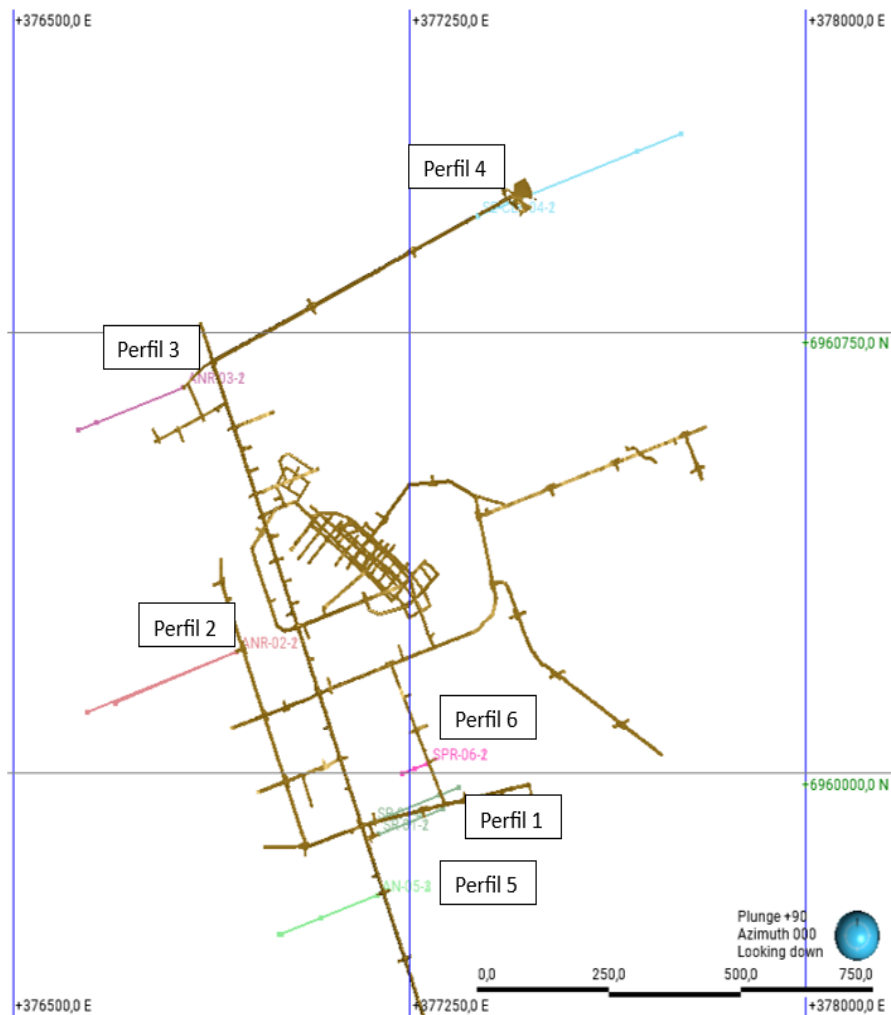
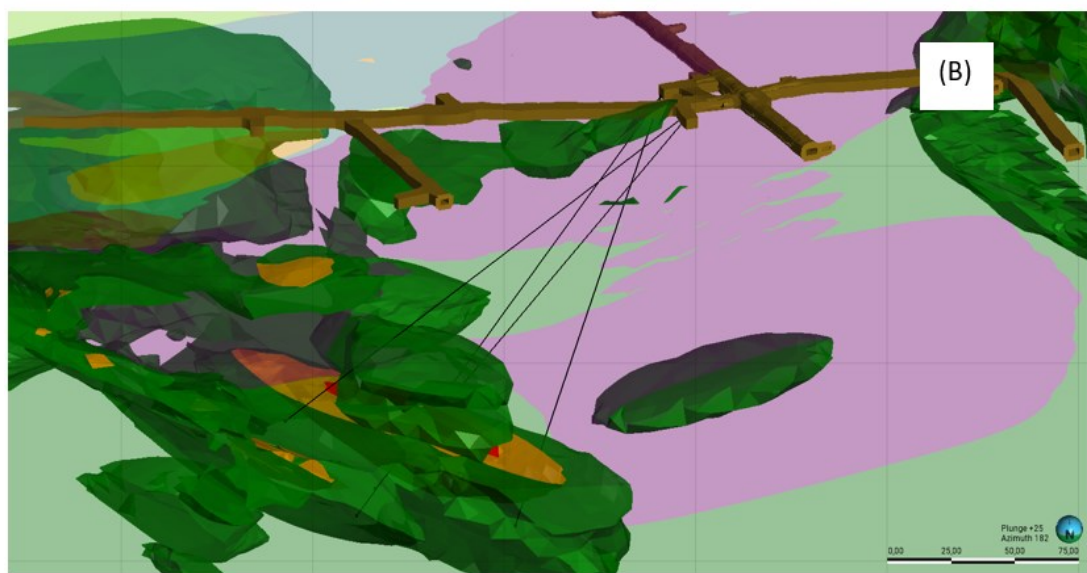
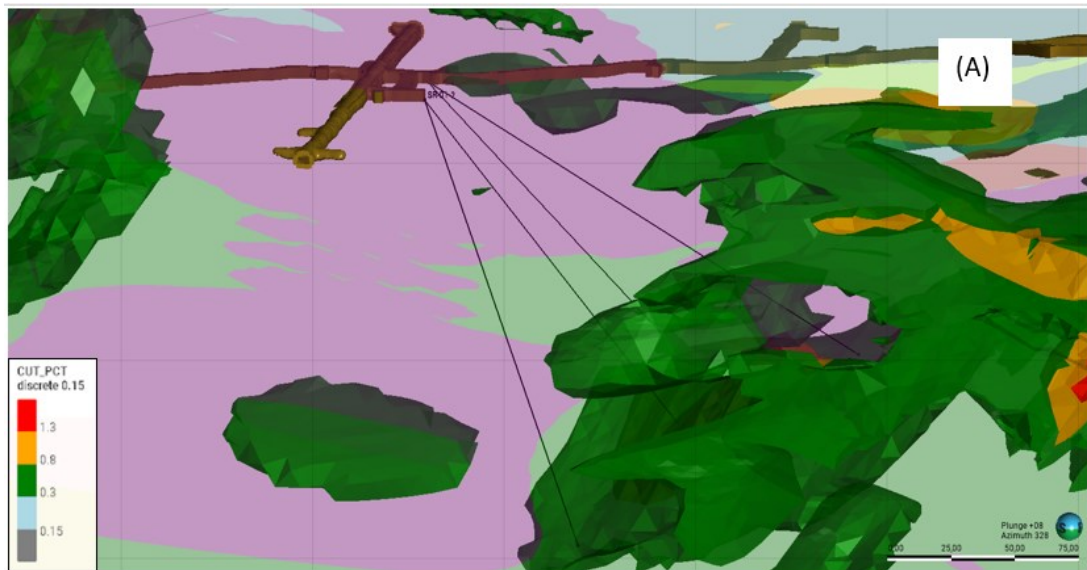


Figura 39. Vista en planta de los sondajes propuestos para Adriana Norte en sus respectivos perfiles.

En el Perfil 1 (Figura 40), es posible identificar que existe una baja precisión en la definición de la unidad Albitófiro (ALB), y, en consecuencia, el contacto entre esta

unidad litológica y las Andesitas inferiores (Kpcli), esto sugiere que sería pertinente la realización de sondajes, los cuales posiblemente corten la unidad Albitófiro (ALB) y Andesitas inferiores (Kpcli), lo cual permitiría obtener la información necesaria para determinar y delimitar de manera más correcta el volumen de la unidad Albitófiro (ALB). Además, en este perfil, los sondajes existentes, no constan con una alta profundidad, y mediante la revisión de la mineralización, existe un cuerpo mineralizado en profundidad, es por esto, que se sugieren sondajes más profundos, los cuales permitan precisar el cuerpo mineralizado de leyes sobre 0,3%.



Legenda











 Albitofiro	 Calizas margosas (Cm)	 Sed. Flujo laminados (M)
 Andesitas inferiores (Kpcli)	 Coluvios y/o derrubios (CD)	 Sed. Rojos brechizados (SR)
 Andesitas superiores (Kpcls)	 Microdioritas cuarcíferas	 Tobas de Agustina (TA)
 Brecha volcanosedimentaria (BrVs)		Unknown

Figura 40. Sondajes propuestos en el Perfil 1 para Adriana Norte. (A) Vista SE de los sondajes, los cuales cortan al cuerpo mineralizado con leyes sobre 0,8%. (B) Vista Norte de los sondajes.

En el Perfil 2 (Figura 41), se observó escasez de sondajes en la estocada correspondiente, y además se identificó la existencia de un cuerpo mineralizado con leyes sobre el 0,3% en profundidad. Es por esto, que resultaría provechoso realizar sondajes en esta zona

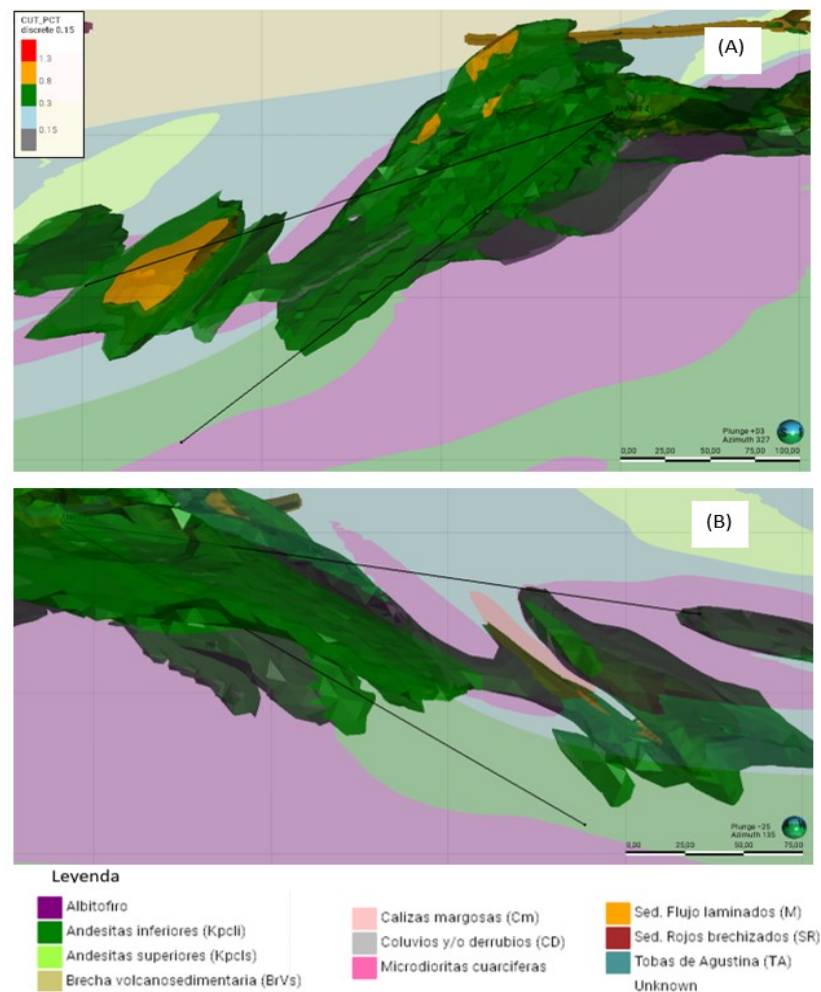
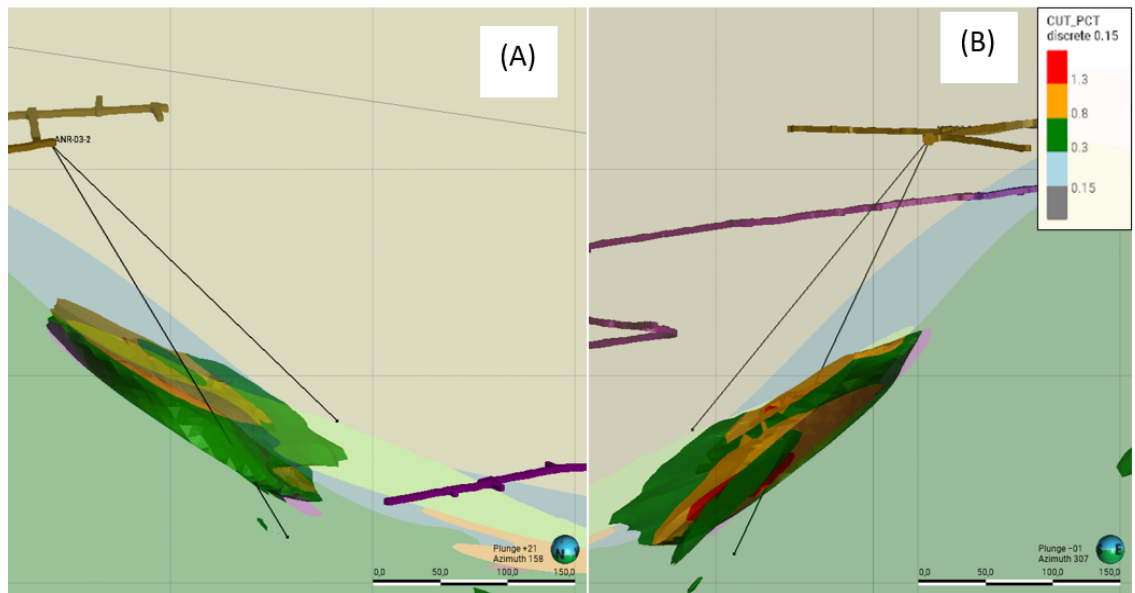


Figura 41. Sondajes propuestos en el Perfil 2 para Adriana Norte. (A) Vista SE de los sondajes, los cuales cortan al cuerpo mineralizado de leyes sobre 0.3%. (B) Vista SW de los sondajes.

En el Perfil 3 (Figura 42), se requiere definir de manera más detallada la distribución de esta zona mineralizada, este cuerpo en profundidad consta con leyes sobre el 1,3%, por esta razón, sería pertinente la realización de sondajes exploratorios en esta sección.



Legenda

- | | | |
|---|---|---|
| Albitofiro | Calizas margosas (Cm) | Sed. Flujo laminados (M) |
| Andesitas inferiores (Kpcli) | Coluvios y/o derrubios (CD) | Sed. Rojos brechizados (SR) |
| Andesitas superiores (Kpcls) | Microdioritas cuarcíferas | Tobas de Agustina (TA) |
| Brecha volcanosedimentaria (BrVs) | | Unknown |

Figura 42. Sondajes propuestos en el Perfil 3 para Adriana Norte. (A) Vista NW de los sondajes, los cuales cortan al cuerpo mineralizado con leyes desde 0,3% hasta más de 1,3%. (B) Vista SE de los sondajes.

En el Perfil 4 (Figura 43), se pudo reconocer la inexistencia de sondajes, los cuales precisen el cuerpo mineralizado en profundidad, por lo cual, sería beneficioso la realización de sondajes exploratorios en este sector.

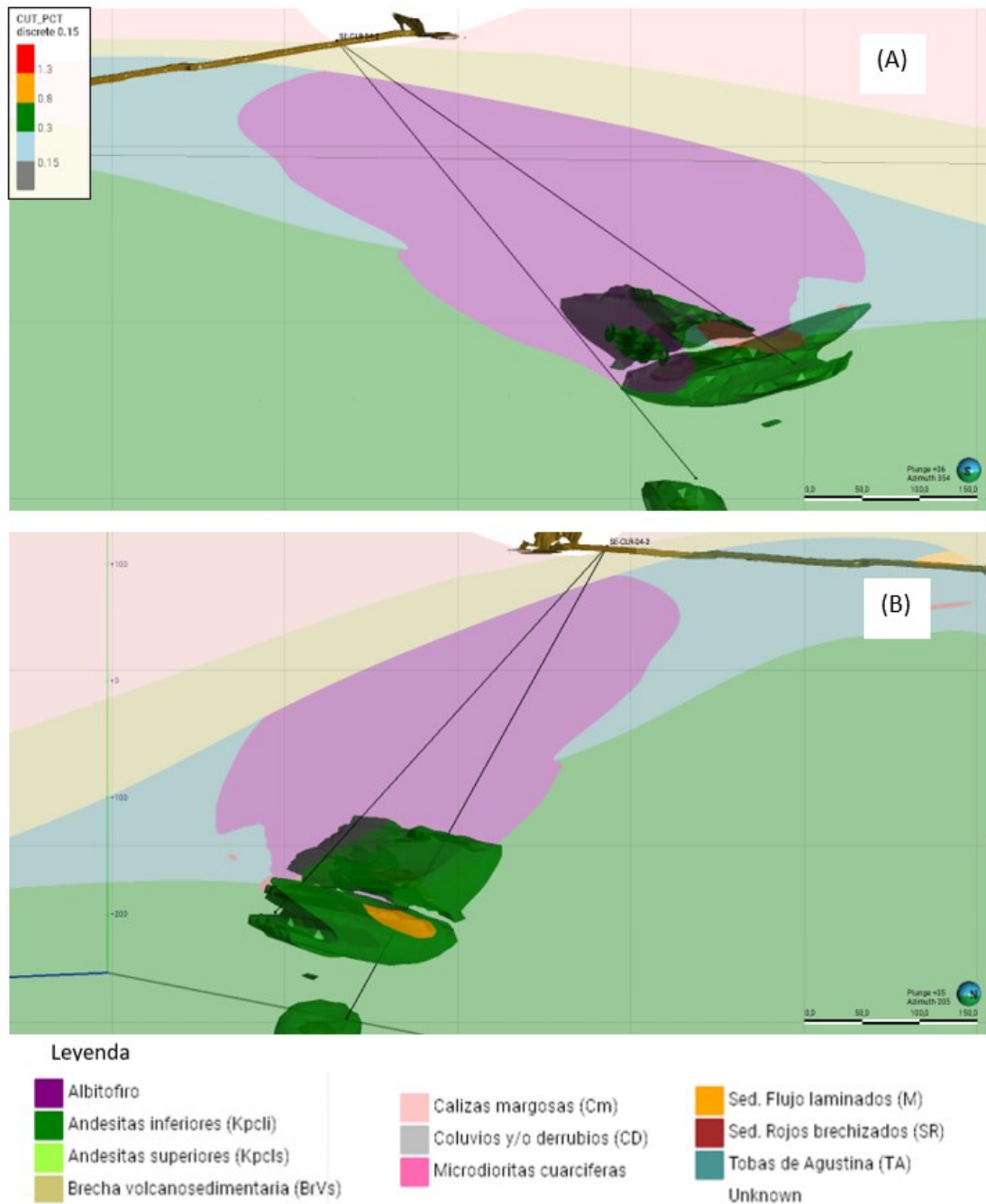


Figura 43. Sondajes propuestos en el Perfil 4 para Adriana Norte. (A) Vista Sur de los sondajes, los cuales cortan al cuerpo mineralizado con leyes desde 0,3%. (B) Vista Norte de los sondajes.

En el Perfil 5 (Figura 44), fue posible reconocer la inexistencia de sondajes en la estocada correspondiente, además de la existencia de un cuerpo mineralizado con leyes de cobre mayores a 0,5%. Esto sugiere, que sería beneficioso la realización de sondajes exploratorios en esta sección.

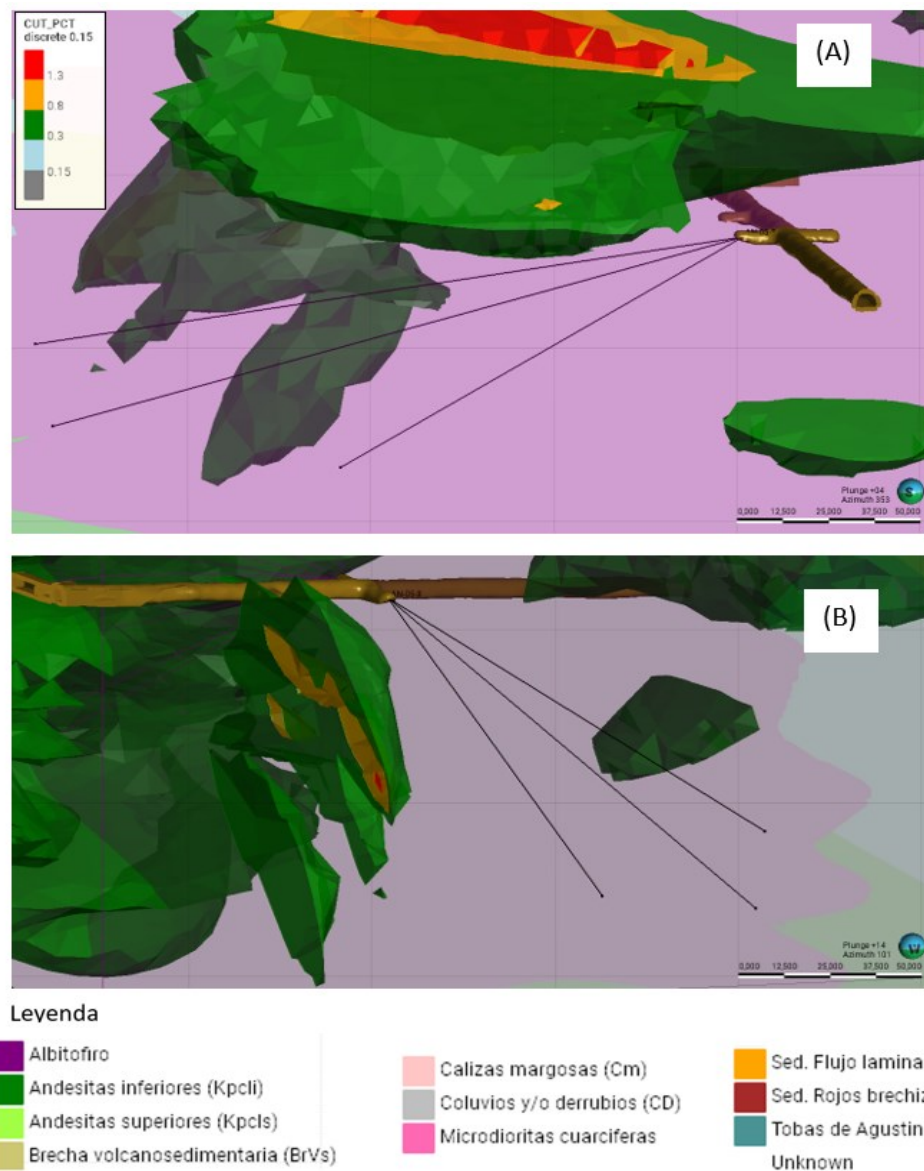


Figura 44. Sondajes propuestos en el Perfil 5 para Adriana Norte. (A) Vista Sur de los sondajes (B) Vista Oeste de los sondajes.

Finalmente, en el Perfil 6 (Figura 45), se identificó un cuerpo mineralizado con leyes de cobre desde 0,3% hasta leyes mayores a 1,3%, sin embargo, en este sector no hay sondajes preexistentes. Por esta razón, sería conveniente la realización de sondajes exploratorios en este sector.

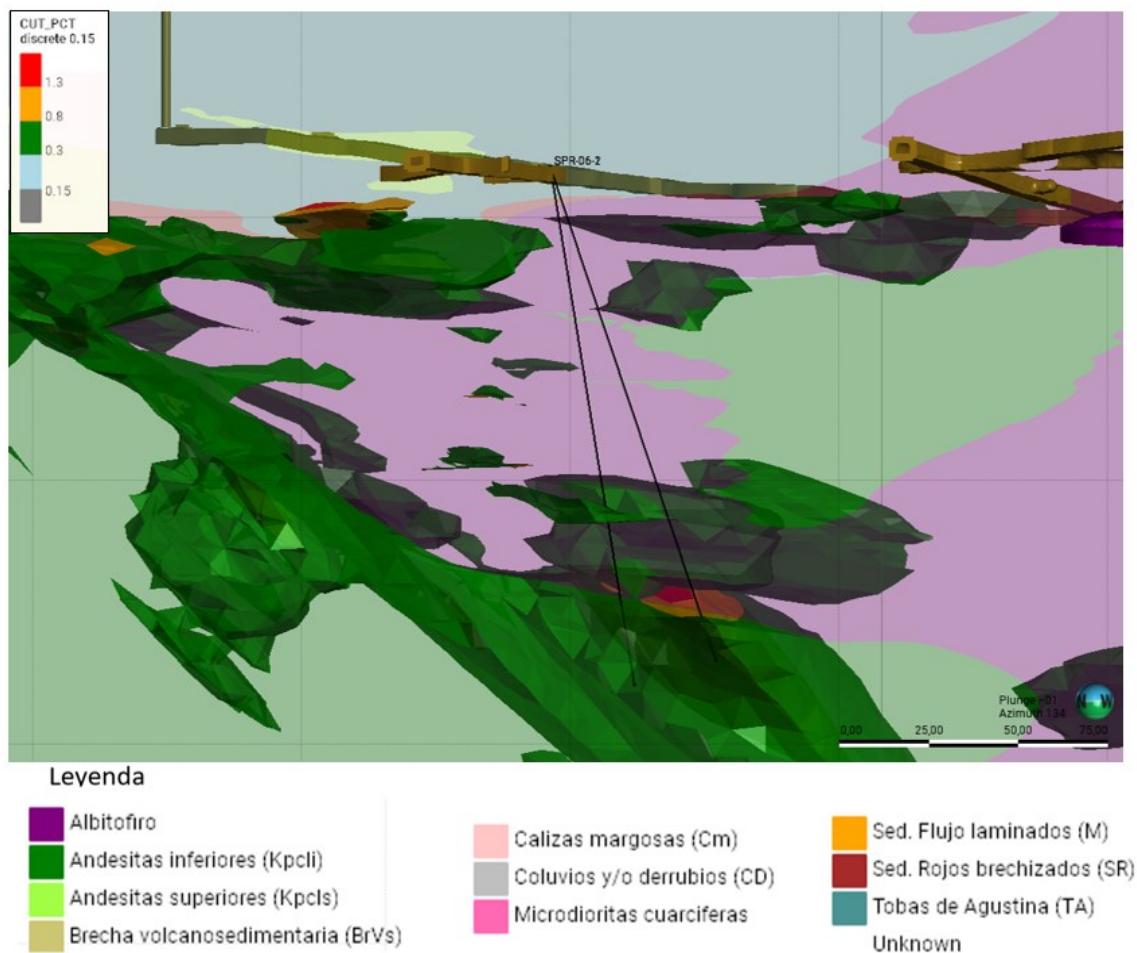


Figura 45. Vista NW de Sondajes propuestos en el Perfil 6 para Adriana Norte.

A continuación, se muestra una tabla final con los sondajes exploratorios propuestos con sus respectivas características:

Tabla 4. Perfiles propuestos para la realización de sondajes con sus respectivas características principales. Cabe destacar que los datos de los sondajes se muestran en inglés para facilitar el ingreso a la base de datos y al software Leapfrog.

Perfil 1							
Drillhole Name	Easting	Northing	Elevation	Azimuth	Dip	Distance	Target Depth
SR-01-1	377191.44	6959895.6	438	70.3	70	10	180
SR-01-2	377191.445	6959895.57	438	70.3	50	10	200
SR-01-3	377179.33	6959916.2	442	70	30	10	200
SR-01-4	377179.33	6959916.25	442	70	45	10	190.983833
Perfil 2							
Drillhole Name	Easting	Northing	Elevation	Azimuth	Dip	Distance	Target Depth
ANR-02-1	376921.926	6960206.44	409	250	20	10	320
ANR-02-2	376921.93	6960206.4	409	249.21	40	10	320
Perfil 3							
Drillhole Name	Easting	Northing	Elevation	Azimuth	Dip	Distance	Target Depth
ANR-03-1	376822.299	6960655.86	533	250	60	10	350
ANR-03-2	376822.3	6960655.9	533	250	45	10	300
Perfil 4							
Drillhole Name	Easting	Northing	Elevation	Azimuth	Dip	Distance	Target Depth
SE-CLR-04-1	377378.74	6960947.98	601.075295	70	35	10	500
SE-CLR-04-2	377378.74	6960948	601.0753	70	50	10	500
Perfil 5							
Drillhole Name	Easting	Northing	Elevation	Azimuth	Dip	Distance	Target Depth
AN-05-1	377188.82	6959792.5	430	250	30	10	130
AN-05-2	377188.82	6959792.5	430	250	15	10	200
AN-05-3	377188.818	6959792.49	430	250	8	10	200
Perfil 6							
Drillhole Name	Easting	Northing	Elevation	Azimuth	Dip	Distance	Target Depth
SPR-06-1	377284.2	6960016.7	458	250	70	10	150
SPR-06-2	377284.203	6960016.75	458	250	80	10	150

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Se identificaron ocho unidades litológicas para Adriana Norte, las cuales se constituyen de base a techo por rocas volcánicas, rocas sedimentarias y rocas volcanosedimentarias. Las rocas volcánicas, se correlacionan con el miembro estratigráfico inferior de la Formación Punta del Cobre; Miembro Geraldo Negro, el cual se conforma por las unidades de Andesitas inferiores (Kpcli) y Albitófiro (ALB). Estas unidades hospedan el mineral de mena del yacimiento, el cual es principalmente calcopirita y se presenta en forma de relleno de fracturas de las rocas como vetillas, vetas y stockwork, además de diseminaciones y de forma masiva. Las leyes porcentuales de cobre, varían desde 0.3% Cu hasta porcentajes mayor a 1.3%, alcanzando concentraciones mayores de cobre en el contacto de ambas unidades y en los niveles más profundos de las Andesitas inferiores (Kpcli). Las principales alteraciones hidrotermales que afectan a las unidades volcánicas son la calco-sódica, formando actinolita en niveles más profundos, tanto en las Andesitas inferiores (Kpcli) como en el contacto inferior del Albitófiro (ALB), además de la formación de magnetita intensa en niveles profundos de las Andesitas inferiores (Kpcli) y en menor intensidad hacia el contacto con el Albitófiro (ALB). Otra alteración principal es la alteración potásica, la cual es más intensa en el contacto de las unidades volcánicas y en profundidad de las Andesitas inferiores (Kpcli), además de la cloritización, la cual afecta en igual proporción a ambas unidades volcánicas. Cabe destacar que la unidad Andesitas superiores (Kpcls) también se conforma por rocas volcánicas, sin embargo, esta se encuentra en niveles más superiores, formando parte del Miembro Algarrobo. Las Andesitas superiores (Kpcls), se encuentran afectadas principalmente por carbonatación, actinolitización y cloritización y a diferencia de las Andesitas inferiores (Kpcli) y el Albitófiro (ALB), esta unidad no presenta mineralización de calcopirita.

Las rocas volcanosedimentarias, forman parte de las unidades Sedimentos Rojos brechizados (SR), Tobas de Agustina (TA), Sedimentos de Flujo laminados (M) y

Brecha volcanosedimentaria (BrVs). Estas unidades se encuentran dentro del Miembro Algarrobo, el cual corresponde al miembro estratigráfico superior de la Formación Punta del Cobre. La unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR), se constituye principalmente por lutitas laminares y brecha volcanosedimentaria polimícticas de matriz rojiza y se encuentra afectada por oxidación y carbonatación. La unidad Tobas de Agustina (TA) se conforma por brechas volcanosedimentarias polimícticas de matriz verdosa, lutitas y tobas lapilli, las cuales se encuentran afectadas por carbonatación, cloritización y hematita-especularita. Los Sedimentos de Flujo laminados (M), se constituyen de lutitas con laminaciones de cuarzo y hematita y brechas volcanosedimentarias, las cuales presentan una deformación post-depositacional. Esta unidad cuenta con minerales de alteración como con magnetita, actinolita, calcita y hematita. La unidad Brecha volcanosedimentaria (BrVs), se compone de areniscas, lutitas, brechas volcanosedimentarias y calizas. Las principales alteraciones asociadas a esta unidad son la silicificación y carbonatación.

La unidad Calizas margosas (Cm), forma parte de la Formación Abundancia, la cual corresponde a la parte inferior del Grupo Chañarcillo. Esta unidad se conforma por rocas sedimentarias carbonáticas, las cuales presentan laminaciones y/o patrones de flujos. La principal alteración asociada a las Calizas margosas (Cm) es la oxidación.

También se considera como unidad litológica a los Diques Lamprofíricos, los cuales cortan a todas las unidades de la Formación Punta del Cobre. Generalmente, estos son de composición microdiorítica y alcanzan espesores de hasta 4 m.

En Adriana Norte se evidencia un control litológico sobre la mineralización, el cual está dado por el límite contacto entre la unidad volcánica y unidad volcano-sedimentaria, o más exactamente la base de la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR). Sin embargo, el principal control sobre la mineralización es estructural.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arévalo, C. (1995). Mapa Geológico de la Hoja Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), N° 8, Escala 1: 100.000.

Barnes, H. L., y Czamanske, G. K. (1967). Solubilities and transport of ore minerals. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, pp. 334, 381.

Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E. y Palma, G. (2017). Desentrañando el origen del clan andino IOCG: un enfoque isotópico Re-Os. *Reseñas de geología del mineral*, pp. 81, 62-78.

Barriaga, C. (1992). Mina Agustina, Copiapó, CACREMI, Informe inédito.

Barton, P.B. y Skinner, B.J. (1979). Sulfide Mineral Stabilities. En: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Segunda Edición, Hubert L. Barnes (ed.), Wiley Interscience Publication, pp. 278-403.

Barton, M. D., y Johnson, D. A. (1996). Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology*, 24(3), pp. 259-262.

Barton, M. D. (2014). Iron Oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems. In: Holland, H. and Turkian, K., (Eds.), *Treatise in Geochemistry*, 2nd Edition, Volume 13, *Geochemistry of Mineral Deposits*, pp. 515-541.

Biese, W. (1942). La distribución del Cretácico Inferior al sur de Copiapó. In *Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología* N°1, pp. 427-466.

Camus., F. (1980). Posible modelo genético para los yacimientos de cobre del distrito minero Punta del Cobre. *Revista Geologica de Chile* N° 11, pp. 51-76.

Carten, R. B. (1986). Sodium-calcium metasomatism; chemical, temporal, and spatial relationships at the Yerington, Nevada, porphyry copper deposit. *Economic Geology*, 81(6), pp. 1495-1519.

- Cembrano, J., y Lara, L. (2009).** The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: a review. *Tectonophysics*, 471(1-2), pp. 96-113.
- Charrier, R., Pinto, L., y Rodríguez, M. P. (2007).** Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile.
- Corbett, G. y Leach, T. (1994).** Southwest Pacific rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization. SEG special pub. N° 6, pp. 237.
- Corbett, G. J., y Leach, T. M. (1998).** Southwest Pacific Rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization. Society of Economic Geologists.
- Corona-Esquivel, R., Tritlla, J., Gómez-Caballero, A., Piedad-Sánchez, N., & Ortiz-Hernández, L. E. (2010).** CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y POTENCIAL MINERO DE LOS DEPÓSITOS IOCG (IRON OXIDE-COPPER-GOLD DEPOSITS).
- Corvalán, J. 1974.** Estratigrafía del Neocomiano marino de la región del sur de Copiapó, Provincia de Atacama. *Revista Geológica de Chile*, v.1, pp. 13-36.
- Dallmeyer, R. D., Brown, M., Grocott, J., Taylor, G. K., y Treloar, P. J. (1996).** Mesozoic magmatic and tectonic events within the Andean plate boundary zone, 30°S, North Chile: constraints from ⁴⁰Ar/³⁹Ar mineral ages. *The Journal of Geology*, 104(1), pp. 19-40.
- Delgado, S., Ortega, R. y Collao, S. (1997).** Microtermometría en cuerpos mineralizados del yacimiento Agustina, Tierra Amarilla, Chile. VIII. Congreso geológico chileno, Antofagasta Vol.2, pp. 930-934.
- Del Real, I y Arriagada, C. (2015).** Inversión tectónica positiva en el distrito El Espino: relaciones entre deformación, magmatismo y mineralización IOCG, Provincia de Choapa, Chile.
- Del Real, I., Thompson, J. F., y 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*, pp. 102, 106-153.

- Del Real I y Thompson, J y Simon, A y Reich, M. (2020).** Geochemical and Isotopic Signature of Pyrite as a Proxy for Fluid Source and Evolution in the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper-Gold District, Chile. *Economic Geology*. 10.5382/econgeo.4765.
- Dott, R. H. (1964).** Wacke, graywacke and matrix; what approach to immature sandstone classification. *Journal of Sedimentary Research*, 34(3), pp. 625-632.
- Dunham, R. J. (1962).** Classification of carbonate rocks according to depositional textures.
- Espinoza, S. (1990).** The Atacama-Coquimbo ferriferous belt, northern Chile. In *Stratabound ore deposits in the Andes*, pp. 353-364. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Giggenbach, W. F. (1997).** The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*.
- Grocott, J., Brown, M., Dallmeyer, R. D., Taylor, G. K., y Treloar, P. J. (1994).** Mechanisms of continental growth in extensional arcs: An example from the Andean plate-boundary zone. *Geology*, 22(5), pp. 391-394.
- Grocott, J., y 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). *Journal of the Geological Society*, 159(4), pp. 425-443.
- Groves, D.I.; Bierlein, F.; Meinert, L.D.; y Hitznab, M.W. (2010).** Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history—Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits: *Economic Geology*, v. 105, pp. 641-654.
- Hemley, J. J., Meyer, C., Hodgson, C. J., y Thatcher, A. B. (1967).** Sulfide solubilities in alteration-controlled systems. *Science*, 158(3808), 1580-1582.

Hitzman, M., Oreskes, N., & Einaudi, M. (1992). Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, 58(1-4), pp. 241-287.

Hitzman, M. W. (2000). Source basins for sediment-hosted stratiform Cu deposits: implications for the structure of the *Zambian Copperbelt*. *Journal of African Earth Sciences*, 30(4), pp. 855-863.

Hoffstetter, H.; Fuenzalida, H.; Cecioni, G. (1957). Lexique Stratigraphique International, Amérique Latine. Centre National de la Recherche Scientifique: Vol. 5, pp 444.

Hopf, S. (1990). The Agustina mine, a volcanic- hosted copper deposit in northern Chile. *Strataboud Ore Deposits in the Andes*, Fontboté, L., Amstutz, G. C., Cardozo, M., Cedillo, E., Frutos, J. (Eds). Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Special Publication 8, pp. 421-434.

Little, J. 1926. The geology and metal deposits of Chile-New York. The Bronwell Co, pp.188.

Jensen, M.L y Bateman, A. M. (1981). *Depósitos minerales económicos* rev. 3ª edición, pp. 593, Wiley, Nueva York.

Lino, S. (1984). Geología de la Mina Augustina. Comuna de Tierra Amarilla. Provincia de Copiapó. Región de Atacama. Memoria para optar al título de geólogo, Universidad Católica del Norte, Inédito.

López, G.P., Hitzman, M. W., y Nelson, E. P. (2014). Alteration patterns and structural controls of the El Espino IOCG mining district, Chile. *Mineralium Deposita*, 49(2), pp. 235-259.

Maksaev, V., Munizaga, F., Valencia, V., Barra, F. (2009). LA-ICP-MS zircon U-Pb geo-chronology to constrain the age of post-Neocomian continental deposits of the Cerrillos Formation, Atacama Region, northern Chile. *Andean Geol.* 36, pp. 264–287.

Malvicini, L., y Saulnier, M. (1979). Texturas de depósitos minerales. *Asociación Argentina de mineralogía, petrografía y sedimentología*.

Marschik, R., Singer, B.s., Munizaga, F., Tassimari, C., Moritz, R., Fonboté, L. (1997). Age of Cu (-Fe- Au) mineralization and termal evolution of the Punta del Cobre district, Chile. *Miner. Deposita* 32, pp. 531-546.

Marschik, R., y Fontboté, L. (2001). The Punta del Cobre Formation, Punta del Cobre–Candelaria area, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(4), pp. 401-433.

Meyer, C. y Hemley, J.J. (1967). Wall Rock Alteration. En: *Geochemistry of HydrothermalOre Deposits*, Primera Edición, Hubert L. Barnes (ed.), Holt, Rinehart and WinstonInc. Publication, pp. 166-235.

Miroslav, R., Pincheira, M. (1997). Distribución de Co y Ni en piritas y calcopiritas del Yacimiento Carola, III Región, Chile; Implicancias metalogenéticas.

Ortiz, F., Silva, L. (1967). Informe Geológico y Geofísico, Distrito Punta del Cobre, entre Puntillas de Bateas y Quebrada Meléndez, Provincia de Atacama: Inf. Inéd.

Ortiz, F., Araya, R., Franqueza, F., Moraga, A., Zentilli, M., (1996). Informe Geológico del Dsitrito Minero de Punta del Cobre. Publicación Especial, I. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago de Chile.

Pirajno, F. (1992). Greisen systems. *Hydrothermal mineral deposits: principles and fundamental concepts for the exploration geologist*, pp. 280-324.

Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Medios de ciencia y negocios de Springer, Berlín.

Powers, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 23(2), pp. 117-119.

- Pop, N., Isache C., Valdman S. et al. (2008).** Informe sobre la Explotación del área de Adriana Norte, Sector Meléndez, Mina Carola. SCM Carola, Copiapó, Chile.
- Raven, P. H., Johnson, G. B., Mason, K. A., Losos, J. B. y Singer, S. R. (2014).** The nature of molecules and properties of water (La naturaleza de las moléculas y las propiedades del agua). En *Biology (Biología)*, 10ª ed., pp. 17-30). Nueva York, NY: McGraw-Hill.
- Ray, G. E., y Lefebure, D. V. (2000).** A synopsis of iron oxide±Cu±Au±P±REE deposits of the Candelaria-Kiruna-Olympic Dam family. Geological fieldwork 1999, Paper No. 2000–1. *British Columbia Geological Survey*, pp. 267-272.
- Reed, M.H. (1997).** Alteración hidrotermal y su relación con la composición del fluido mineral, en *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 3ª ed. (ed. HL Barnes). Nueva York: John Wiley y Sons, pp. 303–65.
- Rickard, D., y Luther III, G. W. (2006).** Metal sulfide complexes and clusters. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61(1), pp. 421-504.
- Rose, A.W. y Burt, D.M. (1979).** Hydrothermal Alteration. En: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Segunda Edición, Hubert L. Barnes (ed.), Wiley Interscience Publication, pp. 173-235.
- Ruge, H. (1976).** Geochemical tables. Elsevier. Evaluación geológica del yacimiento Punta del Cobre. Enami. Copiapó.
- Ruiz, C., (1940).** Estudio Geológico y Económico de los Distritos de Ojancos y Punta del Cobre, Copiapó. Memoria del Título, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Ruiz, C. (1942).** Estudio geológico de la región Ojancos-Punta del Cobre. In *Actas del I Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología*, Santiago, Vol 3, pp. 1186-1225.
- Segestrom, K., y Parker, RL. (1959).** Cuadrángulo Cerrillos, Provincia de Atacama. Instituto de Investigación Geológica, Carta Geológica de Chile, Vol 1, N° 2; pp 34. Santiago.

Segestrom, K., y Ruiz Fuller, C. (1962). Cuadrángulo Cerrillos, Provincia de Atacama. Instituto de Investigación Geológica. Carta Geológica de Chile, Vol. 3, N° 2, pp. 115, Santiago.

Segestrom, K. (1968). Geología de las Hojas Copiapó y Ojos del Salado, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Carta Geológica de Chile, 1:250.000.

Sepúlveda, M. (2017). Validación y redefinición de la geología del Cuerpo 1E de mina Meléndez de Sociedad Contractual Minera Carola, Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile. Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de geólogo. Universidad de Atacama.

Sillitoe, R.H. (2003). Yacimientos de óxido de hierro-cobre-oro: una mirada andina. *Mineralium Deposita*, 38, pp. 787-812.

Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105(1), pp. 3-41.

Streckeisen, A. (1976). To each plutonic Rock its proper name. *Earth Science Rev. Bd.* 12, pp.1-33 Amsterdam, London, New York.

Tarnovschi, R. (1999). Estudio de la alteración hidrotermal y mineralización asociada del yacimiento Carola, III Región de Copiapó, Chile. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad Católica del Norte.

Tilling, R. I. (1976). El batolito andino cerca de Copiapó, Provincia de Atacama: geología y petrología. *Revista Geológica de Chile*, 3, pp. 1-24.

Titley, S.R. (1993). Characteristics of porphyry copper occurrence in the American southwest. In: *Mineral deposit modeling*, GAC special paper 40, pp. 433-464.

Townley, B. (2001). Metalogénesis: Hidrotermalismo y modelos de yacimientos. Geología Económica. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Valenzuela, L. C. (2014). La química del Agua. México: Plaza y Valdés.

Williams, P. (2005). Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Modes of Origin. *Economic Geology*, 100th Anniversary, pp. 371–405.

Wilson, J., y Grocott, J. (1999). The emplacement of the granitic Las Tazas complex, northern Chile: the relationship between local and regional strain. *Journal of Structural Geology*, 21(11), 1513-1523.