



UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE

Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas

Departamento de Ciencias Geológicas

**ALTERACIÓN, MINERALIZACIÓN Y GEOCROLOGÍA DEL
DEPÓSITO Au-Ag ATLAS, FRANJA DE GORBEA, REGIÓN
DE ANTOFAGASTA: PROPUESTA DE UN MODELO DE
EXPLORACIÓN PARA DEPÓSITOS EPITERMALES DE Au-
Ag DEL MIOCENO INFERIOR DEL NORTE DE CHILE**

Tesis para optar al grado de Magíster en Geología Económica

Mención Exploración Minera

PATRICIO ANDRÉS OSORIO LÓPEZ

Profesor Guía: Dr. Shoji Kojima

Antofagasta, Chile

2018

Este trabajo lo dedico a:

Mis padres, Lincoyán, Ana Patricia y Federico.

Mi esposa, Mónica.

Mis hijos, Joaquín y Martín.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de Tesis se ha realizado de forma conjunta con los trabajos de exploración en el Proyecto Atlas. A pesar de todas las condiciones adversas del sector, se logró realizar un gran trabajo con el equipo de Exploraciones Chile de *Yamana Gold*.

El autor quiere dar las gracias a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron a la realización de este trabajo. En primer lugar, debo agradecer el esfuerzo de mi familia, mi esposa e hijos, ya que ellos vivieron y supieron soportar mis ausencias, principalmente, durante el periodo de clases.

Por otra parte, debo agradecer a la empresa *Yamana Gold*, representada por Henry Marsden y Miguel Pérez, quienes aprobaron y apoyaron la realización de este trabajo. Además, agradezco la amistad, colaboración y cooperación que tuvimos con Álvaro Gutiérrez, con quien desarrollamos y evaluamos el Proyecto Atlas-Titán, logrando mejorar el conocimiento geológico del área.

Igualmente, no puedo olvidar a los geólogos que pasaron por Atlas, apoyando los trabajos de exploración como César Rojas, Alejandro Peralta, Jacqueline Harris y Allan Montgomery. Agradezco también a Steve Matthews ya que, gracias a su colaboración, se pudo realizar el estudio de dataciones radiométricas. Una mención especial para nuestra consultora Paula Cornejo quien realizó los estudios petrográficos y calcográficos, aportando todo su conocimiento para resolver variadas interrogantes geológicas.

Por último, debo agradecer a mi profesor guía de la UCN Dr. Shoji Kojima, quien siempre me motivó para realizar la Tesis, agradezco sus consejos y la revisión exhaustiva del escrito. Adicionalmente, también doy las gracias a José Iván Zuluaga, Federico Carozzi, Eduardo Campos y Hans-Gerhard Wilke quienes también aportaron con una revisión crítica de esta Tesis que se entrega.

ÍNDICE

RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	16
1.1 Generalidades.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo general.....	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 UBICACIÓN Y ACCESOS	18
1.4 MÉTODO DE TRABAJO.....	20
1.4.1 Método de muestreo.....	20
1.4.2 Análisis químico.....	20
1.4.3 Control de calidad – QA-QC	21
1.4.4 Análisis de espectrometría (TerraSpec).....	23
1.4.5 Dataciones radiométricas.....	25
1.5 TRABAJOS ANTERIORES.....	25
CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	27
2.1 Evolución tectonomagmática.....	27
2.2 Geología Regional.....	28
2.3 Marco estructural.....	33
CAPÍTULO 3: TIPO DE DEPÓSITO	36
3.1 Generalidades.....	36
3.2 Sub-tipos de depósitos epitermales de alta sulfuración.....	39
3.2.1 Depósitos alojados en brecha.....	39
3.2.2 Depósitos relacionados a diatrema.....	42
3.2.3 Depósitos alojados en rocas estratificadas.....	42
3.2.4 Depósitos controlados por estructuras.....	44
CAPÍTULO 4: GEOLOGÍA DEL SECTOR ATLAS.....	47

4.1 Geología y generalidades.....	47
4.1.1 Formación La Tabla	48
4.1.1.1 Definición	48
4.1.1.2 Litología y/o Petrografía	49
4.1.1.3 Edad.....	50
4.1.2 Unidad Volcanes del Mioceno Inferior	51
4.1.2.1 Definición	51
4.1.2.2 Litología y/o Petrografía	51
4.1.2.2.1 Subunidad Daci-andesítica	51
4.1.2.2.2 Subunidad Volcanoclástica-sedimentaria	54
4.1.2.3 Edad.....	56
4.1.3 Unidad Brechas Freatomagmáticas.....	56
4.1.3.1 Definición	56
4.1.3.2 Litología y/o petrografía	58
4.1.3.3 Edad.....	61
4.1.4 Unidad Brechas hidrotermales.....	62
4.1.4.1 Definición	62
4.1.4.2 Litología y/o petrografía	62
4.1.4.3 Edad.....	64
4.1.5 Unidad Volcánica del Mioceno Inferior a Medio.	65
4.1.5.1 Definición	65
4.1.5.2 Litología y/o petrografía	65
4.1.5.3 Edad.....	66
4.1.6 Ignimbritas Pajonales.....	67
4.1.6.1 Definición	67
4.1.6.2 Litología y/o petrografía	67
4.1.6.3 Edad.....	68
4.1.7 Depósitos aluviales y coluviales modernos.....	68
4.2.1 Generalidades.....	69

4.2.1.1 Alteración tipo <i>Steam Heated</i>	72
4.2.1.2 Silicificación	74
4.2.1.3 Alteración Argílica (caolinita-smectita-clorita)	75
4.2.1.4 Alteración Argílica blanca (caolinita-alunita-dickita)	76
4.2.1.5 Alteración Dickita-Pirofilita	77
4.2.1.6 Alteración Cuarzo-Alunita-Dickita	77
4.2.1.7 Alteración <i>Vuggy Silica</i>	79
4.2.1.8 Alteración “ <i>Amarilla</i> ” (cuarzo-jarosita-alunita-natroalunita)	81
CAPÍTULO V: INTERPRETACIÓN DE DATOS Y MODELO 3D	87
5.1 Generalidades	87
5.2 Interpretación Geoquímica	87
<i>Geoquímica del Au</i>	88
<i>Geoquímica del Hg</i>	89
<i>Geoquímica del Sb</i>	91
<i>Geoquímica del Pb</i>	92
5.3 Interpretación de espectrometría (TerraSpec)	93
5.4 Modelo 3D Integrado	97
CAPÍTULO VI: GEOCRONOLOGÍA	104
6.1 Generalidades	104
6.2 Edades de la Franja Gorbea (Trabajos anteriores)	106
6.3 Edades calculadas para Sector Atlas (Este estudio)	108
6.4 Edades y correlaciones en la Franja Miocena de Chile	112
CAPÍTULO VII: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	118
REFERENCIAS	126
ANEXOS	134
⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar Step-Heating Data for Run 14166-01; AT-27B	135
⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar Step-Heating Data for Run 14167-01; CLATDH0015 439.43	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Franja de Au de Gorbea.....	14
Figura 2. Foto aérea del sector Atlas.....	15
Figura 3. Ubicación Proyecto Atlas.....	18
Figura 4. Ubicación y accesos proyectos Atlas y Titán.....	19
Figura 5. Protocolo de análisis de muestras ACME-ALS.....	21
Figura 6. Gráfico Z Score All Standars Au, Primera Campaña.....	23
Figura 7. Comportamiento de un haz de luz.....	24
Figura 8. Zonas más importantes del espectro electromagnético.....	24
Figura 9. Mapa simplificado del magmatismo cenozoico.....	27
Figura 10. Extracto del mapa Geología de las áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño.....	31
Figura 11. Mapa geológico del norte de Chile mostrando los depósitos de Cu-Au y relación con fallas y lineamientos regionales.....	35
Figura 12. Modelo de alteración-mineralización generalizada para los ambientes epitermal y pórfido.....	37
Figura 13. Estilos esquemáticos y posición con respecto a las rocas del basamento y al paleo nivel freático de los depósitos de alta sulfuración.....	37
Figura 14. Ejemplos de formas de cuerpos mineralizados.....	38
Figura 15. Sección transversal típica del depósito Salares Norte mostrando litologías y leyes e Au.....	40
Figura 16. Sección transversal típica del depósito Pascua Lama.....	41
Figura 17. Sección transversal típica del depósito Lagunas Norte.....	42
Figura 18. Mapa de superficie con las zonas de alteración en depósito Veladero.....	43
Figura 19. Secciones longitudinales del depósito Veladero.....	44

Figura 20. Vista hacia el este del Rajo Dumbo (Yacimiento El Guanaco).....	45
Figura 21. Mapa generalizado del sistema de vetas El Indio	46
Figura 22. Columna estratigráfica generalizada para el sector Atlas.....	48
Figura 23. Modelo del complejo de brechas en (SHZ).....	57
Figura 24. Modelo de alteraciones para sector Atlas.....	71
Figura 25. Sección esquemática para el sector Steam Heated Zone.....	83
Figura 26. Ilustración esquemática del ambiente de formación de los tres tipos de fluidos ácidos.....	84
Figura 27. Zonación vertical de un sistema hidrotermal desde pórfido a epitermal	88
Figura 28. Mapa con muestras geoquímicas de Au para el sector Atlas.....	89
Figura 29. Mapa con muestras geoquímicas de Hg para el sector Atlas.....	90
Figura 30. Mapa con muestras geoquímicas de Sb para el sector Atlas.....	91
Figura 31. Mapa con muestras geoquímicas de Pb para el sector Atlas.....	92
Figura 32. Mapa con lecturas de longitudes de onda para alunitas en sector Atlas	95
Figura 33. Vista 3D del sector Steam Heated Zone (Atlas) mostrando leyes de Au de sondajes y litologías.....	98
Figura 34. Vista 3D del sector Steam Heated Zone (Atlas) mostrando leyes de Au de sondajes y modelo de bloques preliminar de Au (voxel).....	99
Figura 35. Vista 3D del sector Steam Heated Zone (Atlas) mostrando leyes de Au de sondajes y modelo de bloques preliminar de Hg (voxel).....	100
Figura 36. Vista 3D del sector Steam Heated Zone (Atlas) mostrando leyes de Au de sondajes y modelo de bloques preliminar de Pb (voxel).....	101
Figura 37. Vista 3D del sector Steam Heated Zone (Atlas) mostrando leyes de Au de sondajes y valores de longitud de onda para alunitas.....	102

Figura 38. Vista 3D del sector Steam Heated Zone (Atlas) mostrando leyes de Au de sondajes y modelo de bloques de Au (voxel) y modelo 3D de anomalías IP resistivas.....	103
Figura 39. Ejemplo de las etapas de calentamiento a la que es sometida una muestra mineral.....	105
Figura 40. Explicación gráfica de los componentes calculados en el método de isócrona inversa.....	106
Figura 41. Representación gráfica de edades (Ma) calculadas para la Franja de Gorbea.....	107
Figura 42. Espectro <i>Step-Heating</i> $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ para muestra de alunita AT-27B.....	109
Figura 43. Diagrama de isócrona inversa para la muestra de alunita AT-27B.....	110
Figura 44. Espectro <i>Step-Heating</i> $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ para muestra de alunita CLATDH0015-439.43.....	111
Figura 45. Diagrama de isócrona inversa para la muestra de alunita CLATDH0015-439.43.....	112
Figura 46. Representación gráfica de edades (Ma) calculadas para la Franja Au-Ag del Mioceno de Chile (y Argentina).....	115
Figura 47. Representación gráfica de edades (Ma) calculadas para la Franja Au-Ag del Mioceno de Chile (y Argentina), mostrando cantidad de onzas por depósito.....	117
Figura 48. Diagrama paragenético del sector Atlas, mostrando la correlación con la presencia de Au y con la longitud de onda de las alunitas.....	121
Figura 49. Franja de depósitos epitermales del Mioceno de Chile.....	124
Figura 50. Modelo geológico y de alteraciones final del depósito Atlas.....	125

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Muestra C1606060B del Sector Atlas, correspondiente a una brecha con clastos de rocas paleozoicas, asignadas a Fm. La Tabla.....	50
Fotografía 2. Muestra AT-16 del Sector Atlas, correspondiente a una andesita porfídica de piroxeno y hornblenda, correspondiente a la Subunidad daci-andesítica.....	52
Fotografía 3. Muestra AT-03 del Sector Atlas, corresponde a una daciandesita porfídica de anfíbol, correspondiente a la Subunidad daci-andesítica.....	54
Fotografía 4. Muestra AT35A del Sector Atlas, correspondiente a una volcarenita epiclástica polimíctica con clastos volcanogénicos, correspondiente a la Subunidad Volcanoclástica-sedimentaria.....	55
Fotografía 5. Sondaje CLATDH0017 (Profundidad 280 m) del Sector Atlas (Falda Zone), corresponde a una toba lito-cristalina de composición andesítica, correspondiente a la Subunidad Volcanoclástica-sedimentaria.....	56
Fotografía 6. Muestra de afloramiento de brecha freatomagmática en Sector Atlas (Portezuelo), con escasa alteración.....	58
Fotografía 7. Muestra de afloramiento de brecha freatomagmática en Sector Atlas (Steam Heated Zone (SHZ)), con silicificación intensa.....	59
Fotografía 8. Muestra C1703822A del Sector Atlas, correspondiente a Brecha freatomagmática fluidal, con fragmentos dacíticos de anfíbola lixiviados y matriz más riolítica con cuarzo volcanogénico.....	61
Fotografía 9. Muestra C1606069A del Sector Atlas, correspondiente a brecha hidrotermal (“ <i>vuggy silica</i> ”), con líticos volcánicos silicificados y lixiviados con cuarzo y jarosita y una matriz silícea jasperoidal.....	63
Fotografía 10. Sondaje CLATDH0015, mostrando varias profundidades desde los 400 m.....	64
Fotografía 11. Muestra AT-05 del Sector Falda Zone (Atlas), correspondiente a una Dacita porfídica rica en cristales de hornblenda y biotita, con rasgos de reabsorción magmática.....	66

Fotografía 12. Muestras de afloramientos del sector Atlas Sur, de Unidad Ignimbritas Pajonales.....	68
Fotografía 13. Zona de Steam Heated en plataforma de sondajes CLATDH0007 y CLATDH0010.....	72
Fotografía 15. Afloramiento de sílice opalino en Sector Central-East Breccia.....	74
Fotografía 16. Brecha hidrotermal con matriz de sílice calcedónico y clastos de andesita porfídica a 63 m de profundidad en Sector Central-East Breccia (Sondaje CLATDH0019).....	74
Fotografía 17. Andesita porfídica con alteración argílica, principalmente, selectiva en plagioclasas, y vetilleo variable de cuarzo calcedónico, Steam Heated Zone (Sondaje CLATDH0016, Prof: 110.10 m).....	75
Fotografía 18. Brecha freatomagmática con alteración blanca – Caolinita- (Sondaje CLATDH0019).....	76
Fotografía 19. Zona de alteración con cavidades rellenas con alteración cuarzo-alunita (Sondaje CLATDH0015: A) 196.90 m y B) 197.95 m).....	78
Fotografía 20. Zona de alteración Cuarzo-alunita, específicamente con relleno de matriz con <i>cream silica</i> (Sondaje CLATDH0015: 141.10 m).....	79
Fotografía 21. Zona de alteración vuggy silica sin relleno (afloramiento sector Apollo Breccia).....	79
Fotografía 22. Zona de alteración vuggy silica con relleno de alunita y óx. Fe (Sondaje CLATDH0015: 433.55 m, Sector Steam Heated Zone).....	80
Fotografía 23. Zona de alteración amarilla con clastos de vuggy silica y matriz de alunita-jarosita (Sondaje CLATDH0015: 400 m).....	81
Fotografía 24. Zona de alteración amarilla con clastos de sílice y matriz de alunita, jarosita, natroalunita y menor baritina (Sondaje CLATDH0015: 420.80 m).....	82
Fotografía 25. Zona de alteración amarilla con oro visible en clivaje de baritina (Pozo CLATDH0015: 415.05 m).....	85
Fotografía 26. Afloramiento de estructura rellena con cristales de baritina blanquecina de aspecto lechoso con relleno de cavidades por Óx. Fe y Mn (Sector Atlas Gold Zone).....	85

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Gráficos de relación $Na/(Na+K)$ vs longitud de onda de las alunitas.....	70
Gráfico 2. Espectros infrarrojos para distintos tipos de alunitas.....	71
Gráfico 3. Correlación entre razón $Na/(Na+K)$ y longitud de onda de alunitas.....	94
Gráfico 4. Correlación entre gráficos de longitud de onda para alunitas y leyes de Au-Ag para pozo CLATDH0015 (<i>Steam Heated Zone</i>).....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales características orientadas al reconocimiento en terreno de los depósitos del tipo epitermales y sus subtipos.....	36
Tabla 2: Recopilación de dataciones radiométricas para la Franja de Gorbea..._	107
Tabla 3: Localización de muestras datadas del sector Atlas.....	108
Tabla 4: Recopilación de dataciones radiométricas para la Franja del Mioceno de Chile (y Argentina).....	114
Tabla 5: Minerales del grupo de la alunita.....	122

RESUMEN

La franja metalogénica de Au-Ag del Mioceno del Norte de Chile, representa una importante fuente para la presencia de depósitos epitermales de alta sulfuración (EHS).

Durante los últimos ocho años, la Franja de Au-Ag del Mioceno cobró especial interés debido a los descubrimientos de Salares Norte (Por *Goldfields* en 2011) con 3.1 Moz Au y Alturas (Por *Barrick* en 2015) con 6.8 Moz Au. Este interés también llegó a *Yamana Gold*, lo que se tradujo en la firma del *Joint Venture* con la empresa *Mirasol Resources* en 2015 por una serie de propiedades de la denominada Franja de Gorbea, que incluye los sectores Atlas y Titán como los de mayor interés prospectivo. Desde 2015 a 2017 se realizaron una serie de trabajos, incluidos sondajes exploratorios que mejoran de manera importante el conocimiento del área, entregando modelos geológicos aplicables a la franja.

La Franja de Gorbea comprende un dominio netamente volcánico con unidades que van desde el Mioceno al Holoceno, con registros menores de Paleozoico Superior de la Formación La Tabla (Carbonífero-Pérmico). Los principales rasgos estructurales vienen dados por las trazas del Lineamiento NW Culampajá, el cual se ha definido que viene desde Argentina, y trazas del Sistema de Fallas NE Vaquillas. En general, se observa que el Sistema Vaquillas controla gran parte de la mineralización en Atlas. Una serie de zonas de alteración (anomalías de color) se observan en el área de estudio, las cuales comprenden zonas de *steam heated* y zonas de alteración argílica avanzada, lo que indica pH~2-3, ideal para la formación de depósitos EHS.

El presente estudio reconoció como las unidades litológicas más importantes a las brechas freatomagmáticas, las cuales representan la roca de caja ideal para alojar mineralización aurífera. Estas unidades pueden alojar mineralización masiva, es decir, de alto tonelaje y baja ley; aunque también se ha logrado encontrar mineralización alojada en estructuras, pero de menor importancia. Además, se reconocieron una serie de tipos de alteración, de los cuales el *vuggy silica* (Qz-alunita) y la alteración amarilla (Qz-jarosita-alunita-natroalunita-baritina) son las de mayor importancia, ya que controlan la presencia del Au y, en menor forma, de la Ag. El estudio de espectrometría aplicado, ha permitido diferenciar las alunitas K y Na a partir del uso de longitudes de onda (Medidas en nm usando Terraspec). En general, las longitudes de onda hasta 1.480 nm indican composiciones K, entre 1480 y 1485 nm una mezcla de K y Na; y, a partir, de los 1.485 nm se consideran de composición Na, siendo estas últimas las más importantes, ya que indican una T° de formación mayor, y, por ende, están relacionadas directamente con la precipitación del Au en el sistema.

La edad para Atlas es 20.6 Ma (⁴⁰Ar-³⁹Ar en alunita) y para la Franja de Gorbea 21-15 Ma. Ambas son correlacionables con la edad de mineralización del Distrito La Coipa (Au-Ag) en la Tercera Región.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los depósitos de oro en Chile no se ha masificado, debido a la falta de descubrimientos en los últimos 20 años. Hasta principios de los años 90', los depósitos epitermales de alta sulfuración (EHS) como El Indio, Can-Can, Guanaco y Choquelimpie, junto a yacimientos menores, cubrían la producción de Au del país. Durante la década de los 90', los descubrimientos de El Peñón (epitermal de baja sulfuración), La Coipa y Pascua-Lama (epitermales de alta sulfuración) dieron nuevo auge a la minería del Au, sin embargo, desde allí, los únicos descubrimientos de importancia fueron realizados en las cercanías de las minas o proyectos en desarrollo.

El estudio y los trabajos realizados en la Franja de Maricunga de la Tercera Región, han permitido definir sectores con mineralización epitermal de Au y otros con mineralización estilo pórfidos de Au. Desde el 2000 al 2010, la mayoría de los descubrimientos realizados en la franja han sido depósitos del tipo pórfidos Au-(Cu), los cuales han demorado su desarrollo hasta la etapa de construcción, debido a que los estudios de pre-factibilidad no han sido muy favorables, principalmente, por las leyes que no siempre son altas.

Durante los últimos 5 años se ha retomado el interés en la franja miocena desde la Primera a la Cuarta Regiones, principalmente, por los descubrimientos de los depósitos epitermales de alta sulfuración como Salares Norte de *Goldfields* (Azevedo, 2015) y Alturas de *Barrick* (Barrick, 2017; Astorga *et al.*, 2017). Estos descubrimientos han entregado una importante cantidad de recursos minables de Au y Ag, los que, además, cuentan con el valor de ser minerales lixiviables, lo que se traduce en un costo menor en el desarrollo de un proyecto minero.

Por otra parte, el conocimiento y manejo de nuevos modelos geológicos de los depósitos de Au de Sudamérica ha contribuido a generar nuevas ideas de exploración para ser aplicadas en distritos donde se pensó que ya no había nada por encontrar. Un ejemplo claro sucedió en el Distrito El Indio, en donde el depósito EHS de carácter vetiforme como El Indio, fue por más de 20 años explotado y explorado en búsqueda de nuevas vetas de alta ley Au-Ag, sin embargo, luego de los descubrimientos en Perú y, más específicamente, luego del descubrimiento de Veladero en Argentina, el equipo de Barrick traspasó ese conocimiento, logrando continuar la búsqueda con un modelo EHS alojado en brechas, las que al contrario de las vetas, representan depósitos de menor ley

pero de alto tonelaje. Todo esto se tradujo en el descubrimiento del Depósito EHS Alturas, el cual cuenta con un inventario de 6.8 Moz de Au en calidad de recursos inferidos (Barrick, 2017; Astorga *et al.*, 2017).

La Franja de Gorbea fue definida por la Compañía *Mirasol Resources* el año 2014, durante el inicio de su programa de exploración de la Franja Miocena. Luego de adquirir un total de 9 propiedades cuya disposición tiene una orientación NW, se definió la franja de acuerdo a la posición de las propiedades (Figura 1). En capítulos posteriores se discutirá respecto a este tema.

Dentro de las propiedades adquiridas por *Mirasol Resources*, existen dos, que, por tamaño y conocimiento, son las de mayor interés, Atlas y Titán (Figura 1).

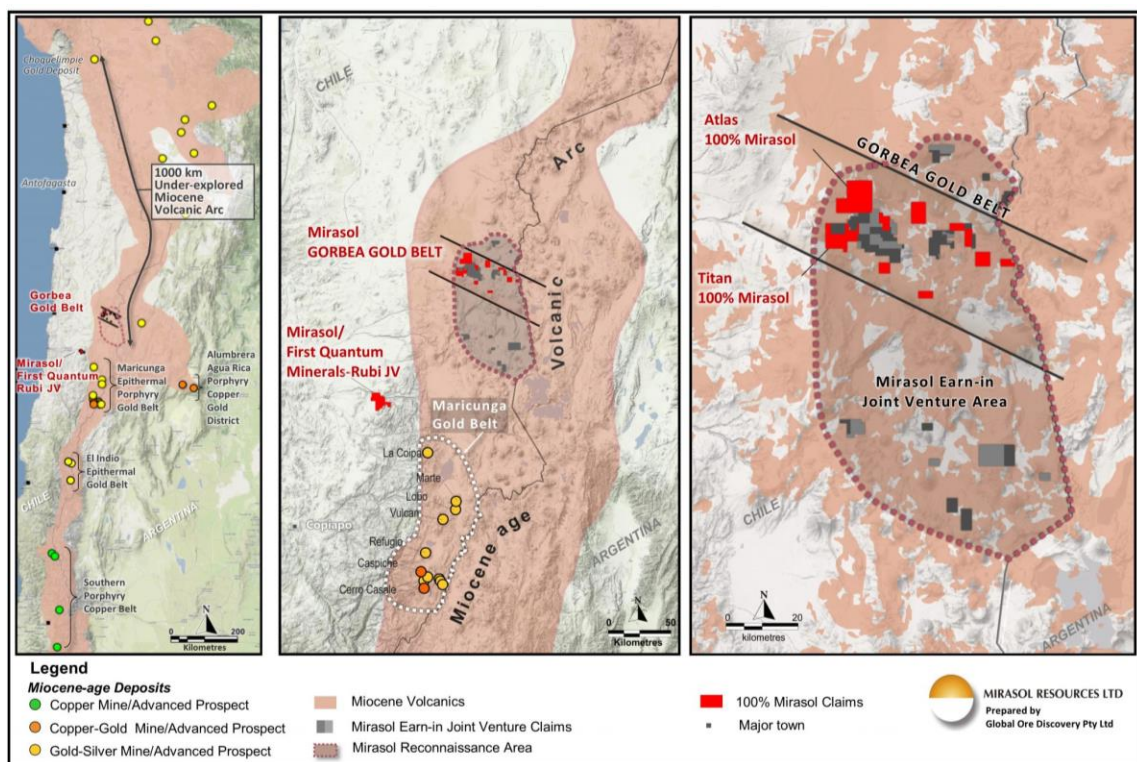


Figura 1. Franja de Au de Gorbea. Ubicación de los proyectos en relación a la Franja Volcánica del Mioceno (Mirásol, 2014).

Los trabajos en Atlas y Titán se inician luego de la firma de una Opción de Compra entre *Yamana Gold Inc.* y *Mirasol Resources* (2015), esta última es dueña de ambos proyectos y de otras propiedades dentro de la Franja de Gorbea (Ver Figura 1) incluidas en el acuerdo. La opción de compra es por un periodo de

4 años y comprende pagos ascendentes en cada aniversario de la firma y gastos en Exploración comprometidos durante cada periodo.

El seguimiento a los proyectos Atlas y Titán se inició en marzo del 2013, cuando Mirasol publicó los primeros resultados con valores anómalos de Au y Ag en trincheras de Titán, en una zona con *Steam Heated*. Durante todo ese año se intentó contactar a Mirasol y visitar los proyectos, hasta que recién en marzo de 2014 (después de una campaña de sondajes cortos en Titán) fue posible realizar la primera visita a ambos proyectos. En esa primera visita ya existían trincheras en Atlas, con alteración tipo cuarzo-alunita-baritina cristalina y *vuggy silica*, con valores de hasta 50.3 g/t Au y 421 g/t Ag en superficie. Luego de esa visita se iniciaron las negociaciones con Mirasol para llegar a una Opción de Compra.

Hasta la fecha se han completado tres campañas de perforación en los sectores de Atlas (Figura 2) y Titán.

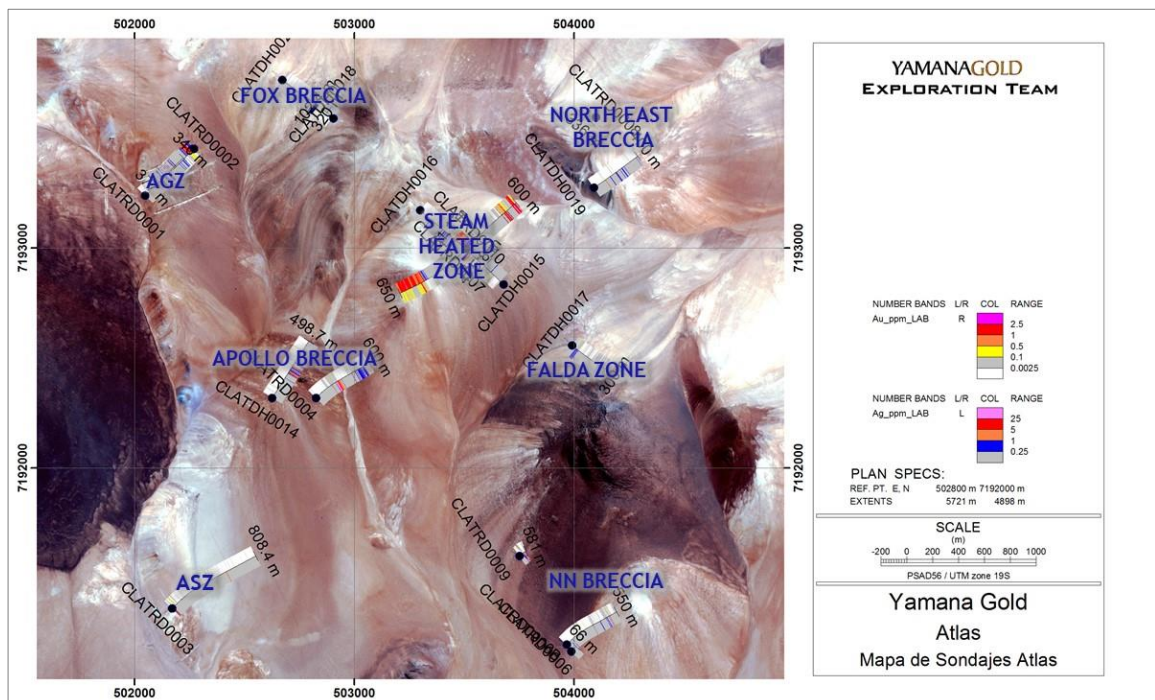


Figura 2. Foto aérea del sector Atlas mostrando sondajes de la primera y segunda campaña de perforación junto a la identificación de las áreas perforadas.

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

1.1 Generalidades

En este trabajo se exponen, principalmente, los resultados de las dos primeras campañas de sondajes (ya publicadas) del sector Atlas (Ver Figura 2), ya que la tercera se encuentra en etapa de evaluación. La primera campaña se realizó entre octubre del 2015 y marzo del 2016, con un total de 6.146,35 metros en 14 sondajes DDH-RC, de los cuales los 10 primeros se realizaron en Atlas y los cuatro últimos en Titán. Por temas de tiempo y compromisos que cumplir, esta primera campaña se realizó utilizando la información geológica previa de Mirasol y, principalmente enfocada a cortar *targets* geofísicos resistivos. Esta campaña arroja como mejor intercepto en Atlas, el sondaje CLATRD0007: 40 m @ 1,38 g/t Au y 17,8 g/t Ag (556 - 596 m), incluidos 28 m @ 1,82 g/t Au y 22 g/t Ag. Intercepto muy profundo. Además, se cortan otros interceptos de interés en los sondajes CLATDR0004 y CLATDR0010.

La segunda campaña en Atlas se inicia en enero del 2017 terminando el 19 de mayo del mismo año, con un total de 2.557,95 metros en siete sondajes DDH. En esta campaña no se lograron perforar todos los pozos planificados por la llegada del invierno, pero se obtuvo un intercepto relevante en el sondaje CLATDH0015: 114.10 m @ 1.077 g/t Au, incluido una zona de 36 m @ 2.489 g/t Au (Sector *Steam Heated Zone*, ver Figura 2), con mineralización abierta en profundidad, último metraje en 0.76 g/t Au. Este intercepto corresponde a un Complejo de Brechas hidrotermales, potente, emplazado dentro de un cuerpo mayor de brechas freatomagmáticas. Se encuentra a menor profundidad que los interceptos de la primera campaña, pero aún muy profundo.

Antes del inicio de la segunda campaña se realizó un mapa de geología y alteración de Atlas, lo que cambia en forma importante el modelo. Se identificaron varios cuerpos de brechas freatomagmáticas e hidrotermales, que pasan a constituir blancos de primera prioridad. Se identificaron nuevas zonas con alteración cuarzo alunita y se define una zona central de alteración hidrotermal además de otras zonas de brechas periféricas.

Durante el avance de la segunda campaña se realizaron análisis de Terraspec en muestras de superficie y en muestras de sondajes, estas últimas en forma sistemática cada 20 metros o cada 10 muestras. Este estudio permite construir un modelo de zonación de alteración desde superficie hasta la zona con

mineralización de Oro en el sondaje CLATDH0015, que además se correlaciona muy bien con la T° de las Alunitas y con algunos elementos como el Pb y el Hg.

Al final de la segunda campaña se tiene la certeza de que el sistema en Atlas tiene mineralización de Au importante, aún muy profunda, pero con un gran potencial. Además, en esta campaña hubo un salto cualitativo en el conocimiento del modelo de Atlas, lo que permitió definir mejor los siguientes blancos y sondajes a perforar para intentar dar forma a este complejo de brechas con mineralización de oro, buscar zonas de alta ley y/o mineralización más cercana a la superficie.

A la fecha, el Complejo de Brechas con mineralización aurífera descubierto en Atlas tiene un gran potencial, sólo falta encontrar mineralización más somera. A lo anterior se debe sumar el potencial de Titán –que sólo ha sido perforado con sondajes cortos- y de los numerosos *targets* opcionados dentro de la Franja de Gorbea.

La Tesis que se presenta, se enfoca en los trabajos realizados en el Sector Atlas tanto a nivel de superficie, como a los trabajos de cartografía y descripción de sondajes. Además, de la interpretación 3D del sistema.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es definir el potencial exploratorio del prospecto Atlas, además de generar un modelo geológico que sirva de base para la exploración en el resto de la Franja de Gorbea.

1.2.2 Objetivos específicos

- Confeccionar un mapa litológico y de alteraciones (Escala 1:10.000) del sector Atlas.

- Definir los eventos de alteración y mineralización de Au y Ag para el sector Atlas, utilizando petrografía, calcografía, espectrometría (terraspec) y edades ^{40}Ar - ^{39}Ar .

- Seleccionar la mejor área que permita definir un modelo geológico (litología, alteración, mineralización y geoquímica) 3D que sirva como modelo de exploración para ser usado en la franja.

- Realizar dos dataciones radiométricas ^{40}Ar - ^{39}Ar en alunita.
- Entregar recomendaciones de exploración para el resto del sector Atlas.

1.3 UBICACIÓN Y ACCESOS

Los Proyectos Atlas y Titán están ubicados en el límite de las regiones de Antofagasta y Atacama, aproximadamente 150 km al Este de la ciudad de Taltal y a 240 km al SE de la ciudad de Antofagasta (Figura 3), a una altura entre 4,000 – 4,300 msnm.

Ambos proyectos se encuentran 120 km al SSE de la Mina el Peñón y a 61 km al SE de la Mina Guanaco (Figura 3) y, aproximadamente, a 40 km de la frontera Chile-Argentina.

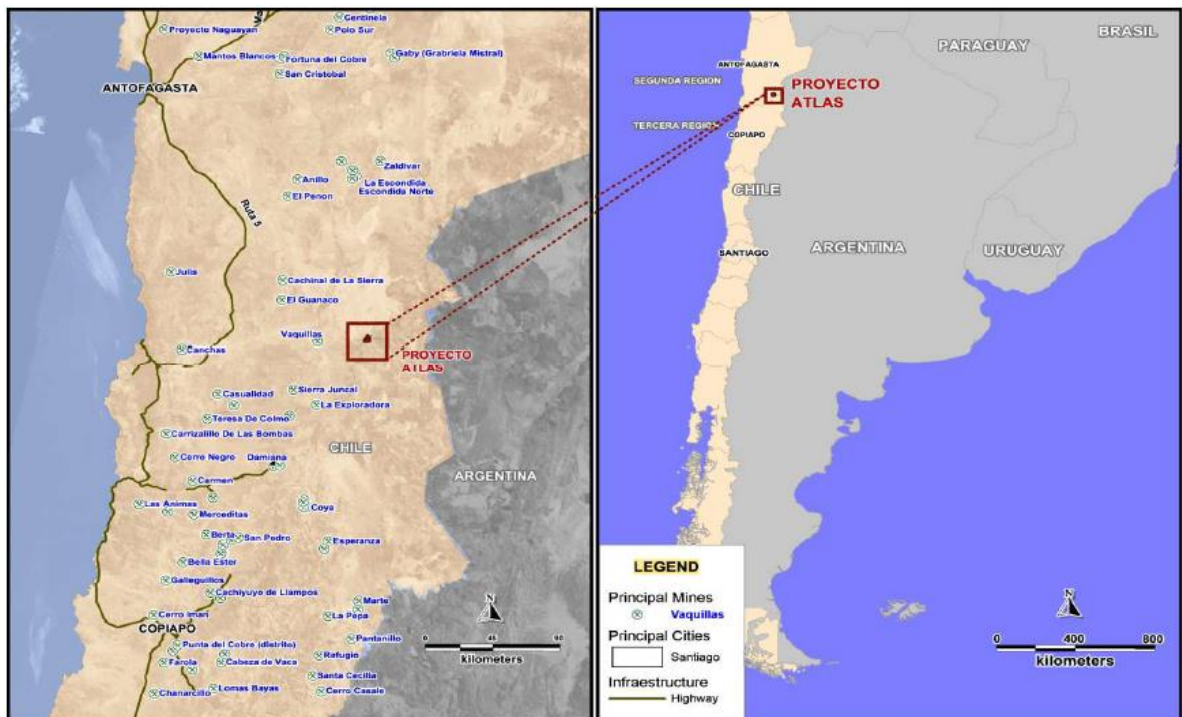


Figura 3. Ubicación Proyecto Atlas, 240 km al SE ciudad de Antofagasta, limite II – III Región.

El Acceso es por el camino B-885 que va desde la Ruta 5 Norte hacia el Salar de Aguas Calientes, 96 km desde la Ruta 5 (Ver Figura 4) hasta el proyecto, por caminos transitables casi todo el año salvo dos a tres meses en invierno. Se

puede acceder al proyecto desde Antofagasta o desde Copiapó, por la Ruta 5 Norte hasta el cruce con la Ruta B-885 (Ver Figura 4).

No hay comunidades cerca y la zona es un distrito con fuerte tradición minera. El campamento se encuentra dentro de la propiedad minera de Titán, a una cota de 4,150 msnm. Debido a la aridez y extremas inclemencias climáticas, la única actividad económica desarrollada en el distrito es la minera, encontrándose numerosas empresas activas realizando tareas de Exploración.

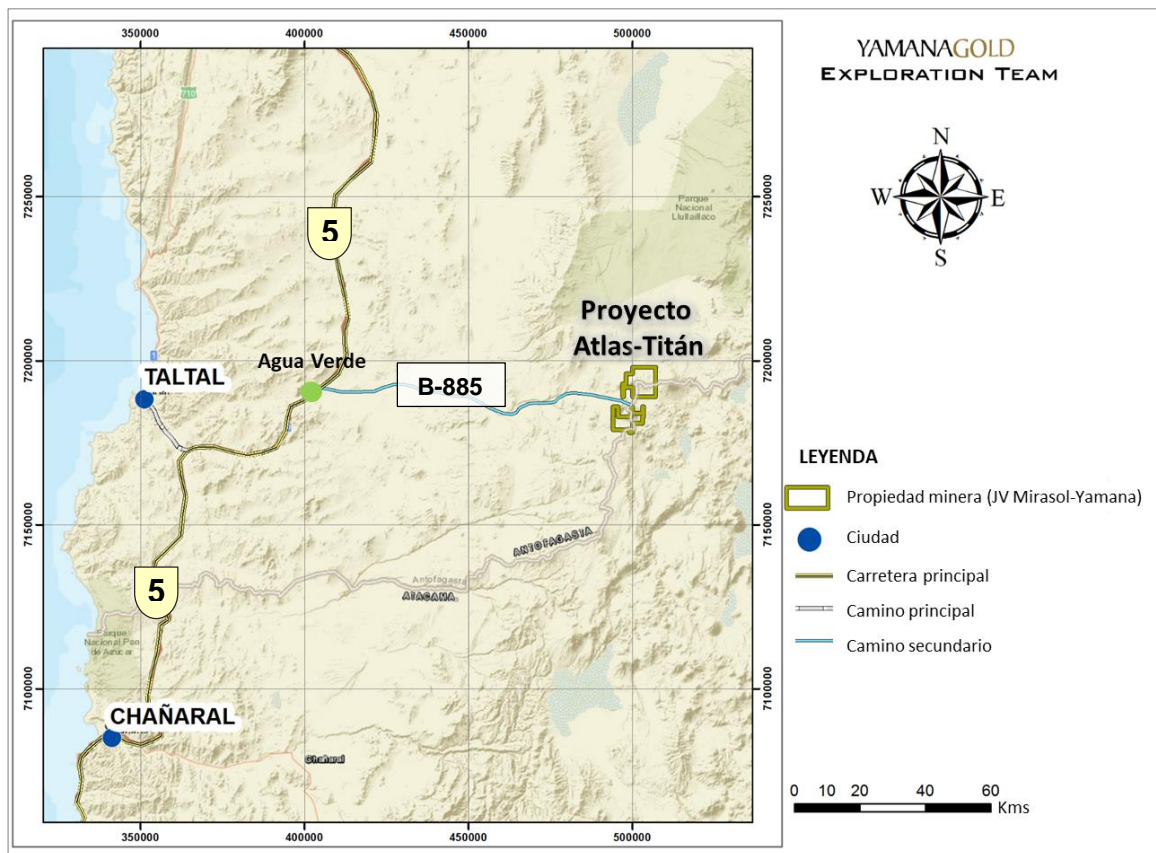


Figura 4. Ubicación y accesos Proyectos Atlas y Titán.

Los proyectos Atlas y Titán se encuentran separados por apenas 12 kms, si se considera el centro de alteración de ambos sistemas, y bastante menos si se considera el límite de las propiedades mineras.

El límite regional corta ambas propiedades justo por la mitad, quedando la zona principal de Atlas en la Región de Antofagasta y la zona principal de Titán en la Región de Atacama.

1.4 MÉTODO DE TRABAJO

1.4.1 Método de muestreo

El método de muestreo durante las dos campañas de sondajes consistió en la toma de muestras sistemáticas cada dos metros en los sondajes RC y luego muestras cada dos metros como máximo en DDH. En los sondajes DDH el largo de la muestra fue definido de acuerdo a la roca cortada: en tramos mineralizados la muestra fue en algunos casos menor a dos metros, como mínimo 50 cm. En tramos sin mineralización ni alteración de interés, los tramos fueron de 2 m.

En los sondajes DDH en tramos con muy baja recuperación o sin recuperación, fue necesario tomar muestras mayores a dos metros, hasta 3 -4 m de largo para tener suficiente muestra. Esto ocurrió muy pocas veces, en el inicio de algunos sondajes –tramos de relleno- y también en zonas con fallas importantes con muchas arcillas, roca molida y baja recuperación.

En sondajes RC queda un rechazo en terreno de cada muestra, desde donde se sacaron muestras para duplicados. En cada plataforma quedó un rechazo casi completo del sondaje RC, en bolsas plásticas, las que luego fueron apiladas y ordenadas sobre *pallets* de madera y empaquetados con malla *rachel*.

Los sondajes DDH dejaron como rechazo la mitad del testigo, en bandejas ordenadas y apiladas en el patio de acopio del Proyecto. Cada sondaje fue fotografiado, también como respaldo.

El protocolo de preparación y análisis de las muestras está basado en los protocolos de QAQC del Grupo de Exploraciones de Yamana Chile.

1.4.2 Análisis químico

El Protocolo de Análisis de las muestras al llegar al Laboratorio (ACME – ALS) se detalla en la Figura 5.

Las muestras fueron analizadas, en una primera etapa, por FA AAS 30 gr más ICP + Hg. Luego si el Au > 5 ppm, la muestra se analizó por FA 30 g. Gravimétrico. Los límites máximos ICP son: Ag hasta 100 ppm, Cu hasta 10,000 ppm, Pb hasta 10,000 ppm y Zn hasta 10,000 ppm. El ICP realizado es ICP MA GEO, *Multiacid digestion, geochemical level*, en ambos Laboratorios.

En el Laboratorio ACME se realizó Hg Vapor Frío (Hg CV), en ALS se realizó el análisis Hg ICP MS (*Trace by Mass ICP*).

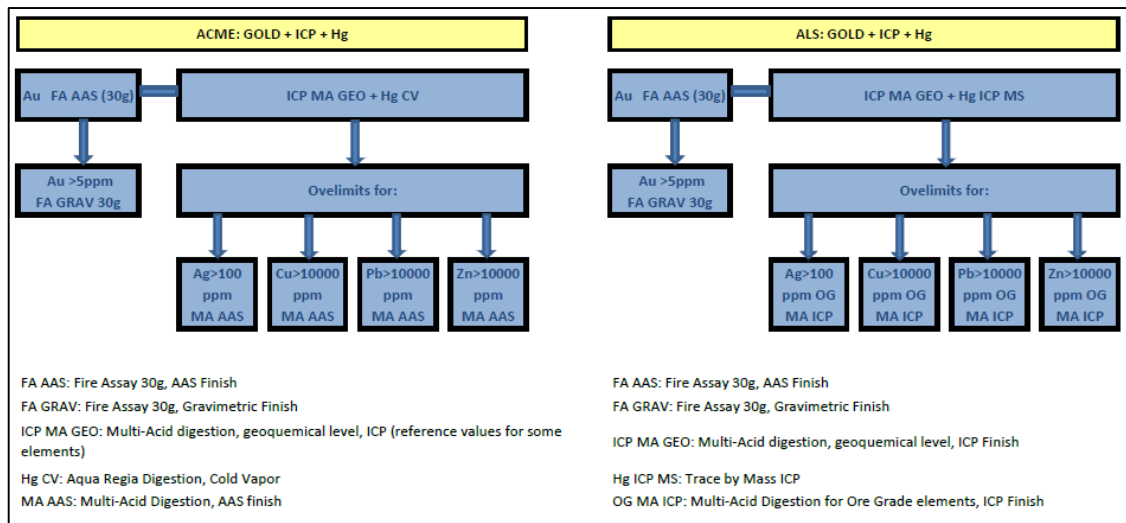


Figura 5. Protocolo de Análisis de muestras ACME – ALS (QAQC, FINAL REPORT, MAY 2016).

Todas las muestras de la Segunda Campaña en Atlas (Enero – mayo 2017) fueron enviadas al Laboratorio ALS, siguiendo el mismo protocolo de Análisis descrito arriba, procesamiento – molienda en ALS Copiapó y Análisis en ALS Lima.

1.4.3 Control de calidad – QA-QC

En ambas campañas de sondajes se trabajó de acuerdo a los Protocolos de Yamana, con el apoyo permanente del equipo de QAQC, realizando los envíos de muestras de sondajes RC – DDH con los Controles de Calidad necesarios para chequear todo el proceso y para que los resultados finales sean auditables. Al final de cada campaña se realizó un proceso de validación de los sondajes, trabajo en conjunto entre los equipos de Geología y QAQC de Yamana Chile.

El 12 de febrero del 2016 durante la primera campaña hubo un cambio de Laboratorio desde ACME a ALS, ambos Laboratorios certificados y aprobados por Yamana. A partir de esa fecha ALS pasa a ser el Laboratorio principal y ACME el secundario.

Los envíos de muestras de sondajes al laboratorio se realizaron según protocolo, con ORDEN DE TRABAJO/ORDEN DE MUESTREO generadas en el software *DHLogger*.

Cada 75 muestras (una fundida) se insertaron 5 Controles de Calidad en las muestras de RC: un Blank, un Estándar de baja ley, un Estándar de alta ley, un doble y una muestra estéril. En el caso de muestras de DDH, no se insertaron dobles para no dejar la bandeja sin muestra. Tanto las pulpas de Estándares, blancos y muestras estériles son certificadas y aprobadas por QAQC. Esto queda detallado en cada ORDEN DE MUESTREO de cada envío.

Todos los sondajes tanto de la primera como de la segunda campaña fueron mapeados en software *DHLogger*, en una unidad Local y luego subidos a un servidor Central donde QAQC realiza el control de calidad, ingresa las leyes reportadas por el Laboratorio (previa aprobación) y realiza el proceso de validación y cierre del sondaje.

Los resultados del laboratorio llegan a QAQC, quienes chequean los valores de las muestras de control de calidad, que se encuentren dentro de máximo 3 desviaciones estándares (SD). Si las muestras estándares de QC superan las 3 SD (Ver ejemplo en Figura 6), se reanalizan, dentro de la misma fundida, las muestras con valores dentro del mismo rango del estándar fallado.

Si una muestra Blank arroja un valor alto (superior a 5 veces el límite de detección) y la muestra anterior es un valor alto, esto implica contaminación. En este caso se manda a reanalizar el tramo con valores similares cercanos al inserto Blank. El Blank o blanco se usa para detectar contaminación en el análisis.

El inserto Estéril detecta contaminación en la preparación y el análisis. Si una muestra Estéril arroja un valor alto, el procedimiento es el mismo que para una muestra Blank.

En todos los casos anteriores, QAQC primero chequea que no sea error en el Envío desde terreno (en el procedimiento de insertos de controles de calidad), luego se procede a buscar el error en el laboratorio.

Los duplicados de terreno sirven para medir la precisión del laboratorio. En caso de que haya una diferencia relevante entre dos muestras duplicadas, esto debe ser analizado caso por caso ya que depende de la geología/mineralización de la muestra en particular. Duplicados sólo se realizaron en la primera campaña, en las muestras de RC.

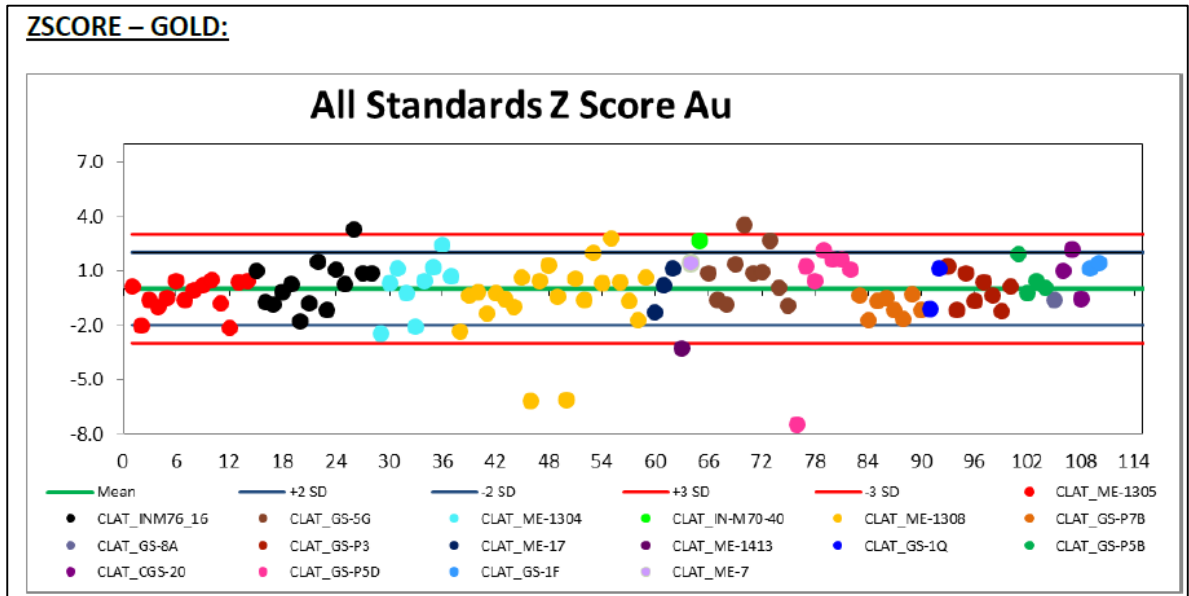


Figura 6. Gráfico Z Score All Standars Au, Primera Campaña (QAQC, FINAL REPORT, MAY – 2016).

Al final de cada campaña el equipo de QAQC entregó un reporte donde se aprobó la calidad de los análisis del Laboratorio y se validó la información de los sondeos reportados.

1.4.4 Análisis de espectrometría (TerraSpec)

La espectrometría es una técnica basada en el estudio del comportamiento de las ondas del campo electromagnético que son emitidas, absorbidas, reflejadas o refractadas por un cuerpo sólido, líquido o gas. Cabe mencionar que, en este capítulo sólo se tratarán los aspectos más generales del tema.

Todo cuerpo que sea sometido a efectos de radiación, como un haz de luz, experimenta un fenómeno de reflexión y absorción de energía como se muestra en la Figura 7, la cual, se manifiesta en forma de ondas electromagnéticas que pueden ser medidas y analizadas en función de su amplitud y longitud, principalmente. El Espectro electromagnético en la figura 8, muestra en forma gráfica las zonas de energía, separadas por tipo y longitud de

onda. Algunas de estas zonas son: Rayos gama (10-4m- 10-10 m), Rayos X (10-12 m– 10-8m), Rayos UV (10-8m – 10- 7m), la zona de luz visible (350µnm – 740µnm), Infra rojo (0.74µnm – 1000µm), también, el umbral de las micro-ondas, ondas de radio FM y AM etc. (Ostrooumov, 2006).

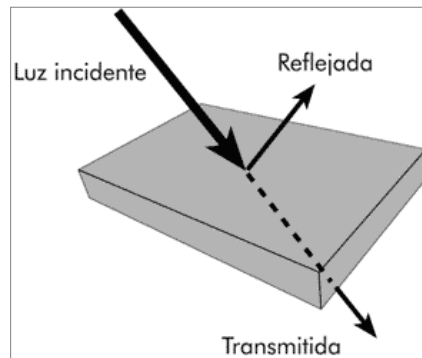


Figura 7.- Muestra el comportamiento de un haz de luz al incidir sobre un cuerpo dado, una parte es reflejada, otra se propaga por el medio en forma difusa o transmitida. Los métodos espectrométricos (SWIR) miden las propiedades de aquella que ha sido reflejada.

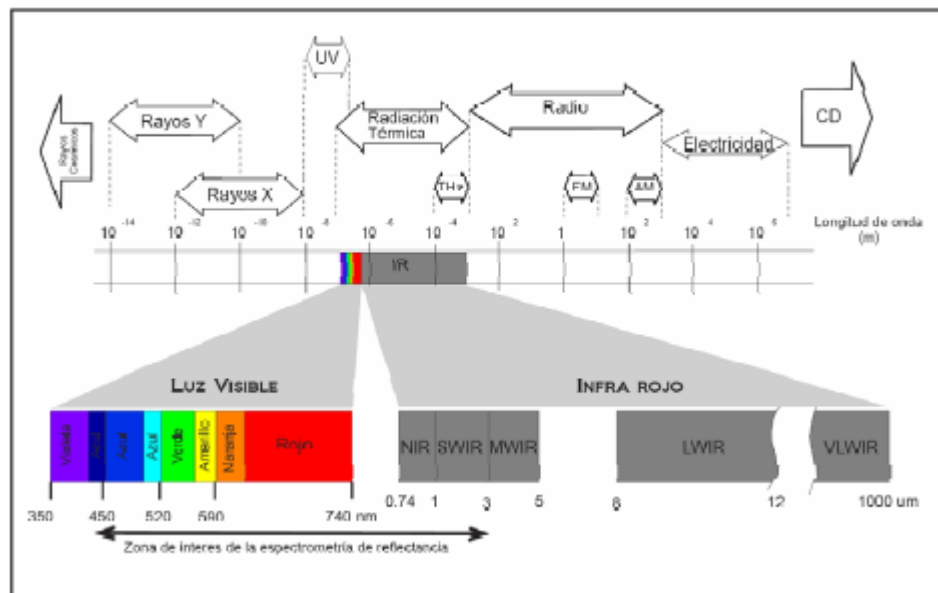


Figura 8.- Muestra las zonas más importantes del espectro electromagnético, ampliando las de la luz visible e infrarrojo (IR). El campo de detección para los espectrómetros actuales es de 400 – 2500 nm abarcando gran parte de la zona de la luz visible, Cercana al infrarrojo (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR).

Durante la segunda campaña de sondajes se realizó el análisis sistemático en todos los sondajes de Terraspec en el Laboratorio ALS. Una de cada 10 muestras fue enviada a analizar por **TRSPEC-20 + INTERP-11**, lo que significa un análisis, aproximadamente, cada 20 metros.

Lo anterior permitió aportar valiosa información de la zonación de los minerales de alteración hidrotermal y de las temperaturas de las alunetas a medida que el sondaje se acerca a la zona con mineralización de oro. Este estudio es preliminar ya que sólo se consideran los sondajes de la primera campaña y en particular los pozos CLATDH0015 – CLATDH0016 en la zona del complejo de brechas, pero luego de esta campaña se van a analizar todos los sondajes, para armar un modelo en 3D de esta zonación.

En los capítulos siguientes se detallan los resultados obtenidos y la primera interpretación de este estudio y en el ANEXO ANÁLISIS TERRASPEC se entregan tablas con los resultados para los sondajes CLATDH0014 al CLATDH0020.

1.4.5 Dataciones radiométricas

En total se realizaron dos dataciones radiométricas en aluneta por método ^{40}Ar - ^{39}Ar . El estudio se realizó en la Unidad de Geología Isotópica del Departamento de Laboratorios perteneciente a la Subdirección Nacional de Geología del SERNAGEOMIN. El estudio se realizó en un espectrómetro de masas MAP 215-50, automatizado, acoplado a un sistema láser de CO_2 para la fusión de la muestra de una potencia de 30 watt. Este equipo permite medir muestras con precisión en edades mayor a 1 Ma mediante calentamiento por pasos (“*step-heating*”) o por fusión total. Para detalles, ver Capítulo VI de Geocronología y datos del trabajo en Anexos.

1.5 TRABAJOS ANTERIORES

Los trabajos del sector estudiado, incluyendo Atlas y Titán, además de la Franja de Gorbea en general, son escasos y, han sido de carácter regional, salvo en los últimos años en que tanto *Mirasol Resources* como *Yamana Gold* han realizado informes internos con buenas caracterizaciones geológicas. Los trabajos más representativos en el área son:

- Naranjo *et al.* (2013). En este trabajo se realiza un levantamiento geológico de las áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño, cubriendo una superficie de unos 3.000 km², aproximadamente. Este trabajo incluye el área de Atlas y se entrega un mapa geológico escala 1:100.000, con un informe con las características geológicas de cada unidad más una síntesis de la geología estructural y geología económica revisada. Además, aporta con una serie de nuevas dataciones radiométricas (⁴⁰Ar-³⁹Ar) para el sector.
- Venegas *et al.* (2013). Presenta un levantamiento geológico del área Sierra Vaquillas Altas, cubriendo una superficie de unos 2.790 km², aproximadamente. Este trabajo incluye el área de Titán y se entrega un mapa geológico escala 1:100.000, más un informe con las características geológicas de cada unidad más una síntesis de la geología estructural y un capítulo completo de geología económica. Además, aporta con una serie de nuevas dataciones radiométricas (⁴⁰Ar-³⁹Ar) para el sector y una recopilación de dataciones para los sectores Vn. Chaco y Titán.
- *Mirasol Resources* (2014). Realiza uno de los primeros *News release* publicados por la empresa Mirasol en donde presenta el Proyecto Atlas como una nueva zona reconocida a través de los trabajos de exploración básica realizados en la franja miocena. En este documento, se presentan las propiedades, muestreos con leyes de Au y Ag.
- Gutiérrez y Osorio (2017). Constituye el trabajo más completo realizado en los proyectos Atlas y Titán, ya que resume toda la historia del proyecto hasta que se firma el JV entre Mirasol Resources y Yamana Gold. Además, se presentan los resultados de las campañas de perforación desde el 2015 al 2017, mostrando los resultados geológicos y geoquímicos para cada sector. Por último, se realiza una caracterización geológica (Litología, alteraciones, geoquímica, etc.) del sector Atlas, incluyendo estudios de petrografía microscópica y calcografía. En este informe se da un salto cualitativo debido a que se incluyen estudios espectroscópicos (Terraspec), los cuales en conjunto con todas las otras características geológicas permiten confeccionar un modelo geológico en 3D, específicamente, para el sector de *Steam Heated Zone* (SHZ) en Atlas.

CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 Evolución tectonomagmática

Durante el Cenozoico, se produjo un gran desarrollo del volcanismo de los Andes Centrales de América del Sur (Ver Figura 9). Las primeras manifestaciones son del Eoceno Superior al Oligoceno con la presencia de un volcanismo intermedio con características de lavas de arco (Mpodozis *et al.* 1996; Montero *et al.*, 2010). Durante el Oligoceno-Mioceno Inferior, el volcanismo se representa por actividad trasarco caracterizada por la presencia de cuerpos subvolcánicos e intrusivos menores. Los grandes estratovolcanes que definen el arco magmático se formaron en el Mioceno Medio (~14 Ma) cuando se produce un incremento en el volumen de magma (Montero *et al.*, 2010).

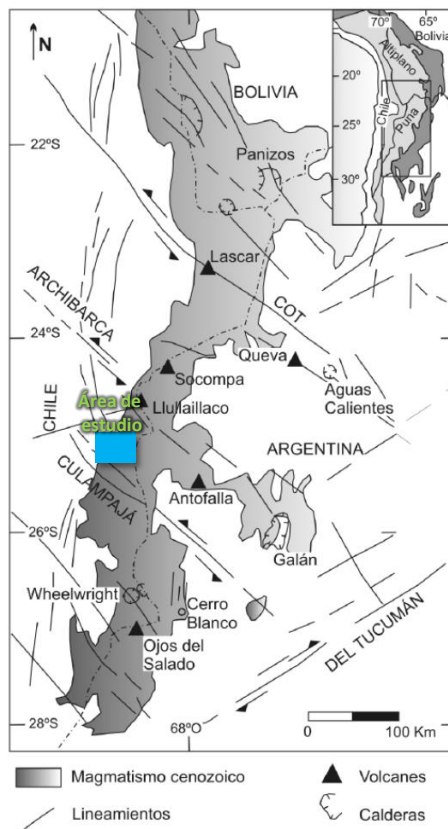


Figura 9. Mapa simplificado mostrando la distribución del magmatismo cenozoico en el *plateau* de los Andes Centrales de Sudamérica (Modificado de Montero *et al.*, 2010).

Desde el punto de vista tectónico, Ramos y Folguera (2009), atribuyen las características del volcanismo en las distintas porciones de Los Andes a una serie de zonas de subducción estilo *flat slab* (subducción cercanamente plana) las cuales han migrado hasta las que conocemos en la actualidad. En este mismo sentido, el área de estudio se enmarcaría dentro del extremo sur del denominado Bloque Puna, en donde Ramos y Folguera (2009) documentan que existió una zona de *flat slab* entre los 18 a 12 Ma caracterizada por la ocurrencia de volcanismo riolítico y amplios campos ignimbríticos.

Con respecto a la metalogénesis, adquieren mayor importancia las estructuras tipo lineamientos definidos inicialmente por Salfity (1985) y complementado por Richards *et al.* (2001), los cuales representarían megaestructuras que cruzan por completo el orógeno andino entre Argentina y Chile. En la Figura 11 se pueden apreciar los lineamientos con dirección NW y, en menor medida los NE. Principalmente, destacan los lineamientos Calama-Olacapato-El Toro, Archibarca y Culampajá. Este último está atravesando el área de estudio. Richards *et al.* (2001) propone una correlación directa entre los mayores centros mineralizados, los cuales se ubican en la intersección de estos lineamientos descritos, con las zonas de fallas NS, principalmente, Sistema de fallas Domeyko. Durante muchos años se ha intentado probar esta teoría y, si bien aún no existe una postura concluyente, se estima que, en efecto, son altamente probables estas correlaciones. Por consiguiente, este tipo de correlación, también puede aplicarse en el área de estudio, ya que las observaciones muestran que, en la Franja de Gorbea ocurre esta intersección estructural entre el lineamiento NE Culampajá y trazas de un sistema de fallas NE.

2.2 Geología Regional

El marco geológico regional (Ver Figura 10) expuesto en el área de estudio posee un completo registro de la evolución del arco volcánico cenozoico superior en los Andes Centrales de Chile. Las condiciones de extrema aridez imperantes, a lo menos, desde aproximadamente los 15 Ma, han permitido la notable preservación de estructuras volcánicas, depósitos y formas asociadas. Esto favorece la caracterización de las distintas etapas del arco volcánico en la zona (Naranjo *et al.*, 2013).

La Formación La Tabla (Carbonífero Superior-Pérmico Medio) (Venegas *et al.*, 2013) constituye parte del basamento en la zona y se expone en un bloque alzado por fallas inversas en la parte noroccidental del área. Simultáneamente con el alzamiento andino, ocurrido entre los 25 y 10 Ma, se depositaron potentes depósitos de conglomerados y brechas que conforman las Gravas de Atacama (Mga) en la zona (Naranjo *et al.*, 2013).

El frente volcánico occidental comprende en este segmento a la mayoría de los estratovolcanes de mayor tamaño (>10 km³), pertenecientes a los volcanes del Mioceno inferior al Mioceno Superior (Miv, Mimv, Mmsv) y, salvo el Volcán Azufre (Mmsv), han colapsado en una o más oportunidades. Estas unidades de volcanes pudieron tener una extensión mucho más amplia que la actual, pero han sido cubiertos por nuevos volcanes, construidos desde el Mioceno superior y ampliamente distribuidos en la zona (Naranjo *et al.*, 2013).

Hacia el este, la unidad Volcanes del Mioceno superior – Plioceno inferior (MPv) tiene una amplia distribución norte-sur. Además, esta unidad evidencia un desplazamiento del eje al oriente y el ensanchamiento del arco, caracterizado por volcanes y domos mayoritariamente de menor altura (330 m promedio) y tamaño (principalmente menores que 3 km³). Sobre esta unidad de volcanes se emplaza el arco volcánico activo, que, en la parte oriental del mapa, forma un cordón montañoso NNE de 50 km de largo. Las primeras etapas de este cordón comprenden los complejos volcánicos plio-pleistocenos (PPIp, PPIac, PPIcn, PPIrg), sobre los cuales se construyeron los complejos más jóvenes de la zona (Ple, Pla, PIHb, PIHca, PIHI) cuyos productos más recientes han sido datados en el Holoceno. No obstante, su actividad actual se reduce a manifestaciones fumarólicas solo en los complejos Lastarria (PIHI) y Bayo (PIHb) (Naranjo *et al.*, 2013).

Las evidencias geoquímicas indican que, a partir del Mioceno superior, el contenido de potasio se incrementó, posiblemente debido a la migración del eje del arco volcánico. Por otra parte, a partir del Plioceno se mantiene el mismo eje y se observa una mayor dispersión en el contenido de potasio para las lavas de los complejos volcánicos plio-holocenos. De esta manera, las unidades de volcanes desde el Plioceno representan la estabilización del eje en su posición actual. En ese sentido, Trumbull *et al.* (1999) proponen un aumento en el grado de contaminación cortical de los productos de volcanes en la zona, a partir de los 8 Ma. Además, sobre la base de métodos geofísicos, discuten la existencia de un nivel en la corteza media con fusión parcial.

Intercaladas entre los volcanes se encuentran tres unidades de ignimbritas. Durante el Mioceno inferior y medio, las unidades de Ignimbritas Río Frío (Mirf) y Pajonales (Mip) cubrieron gran parte de la zona de estudio, inclusive volcanes y productos de la unidad Volcanes del Mioceno inferior, y se extendieron como mantos en el sector noroccidental del mapa. Adicionalmente, los aportes de materiales de las Ignimbritas Río Frío a la cuenca del Salar de Pajonales permitieron la formación de los Estratos Pajonales (Miep). La fuente de estas ignimbritas se encuentra al sur del área del mapa, en la elusiva caldera Aguilar. Por su parte, durante el Pleistoceno tuvo lugar la erupción de la ignimbrita de escudo, Caletones Cori (Plicc), emplazada en la Corrida de Cori, en el sector nororiental del mapa. Sobre esta ignimbrita se formó posteriormente el Volcán Escorial (Ple) (Naranjo *et al.*, 2013).

La presencia de una morrena lateral (Mm) en el flanco sur del Volcán de la Pena indica la existencia de una o más lenguas glaciales en la parte alta de volcanes durante el Mioceno medio. Estos registros corresponden a una de las evidencias glaciales neógenas más antiguas del hemisferio sur (Rutter *et al.*, 2012). Además, en el flanco sur de diversos volcanes mio-holocenos se han formado depósitos solifluidales (MHds), que evidencian actividad periglacial sobre 4.000 m s.n.m. en ese lapso (Naranjo *et al.*, 2013).

Seis cuencas endorreicas se han mantenido activas desde el Mioceno inferior. Estas se han formado por la captación de los niveles de aguas freáticas y superficiales, y su posterior evaporación ha dado origen a salares (MHs). El aporte principal de sales proviene de los volcanes y, como en el caso del salar de Pajonales, de un extenso '*plateau*' ignimbrítico con inclinación hacia la cuenca (Naranjo *et al.*, 2013).

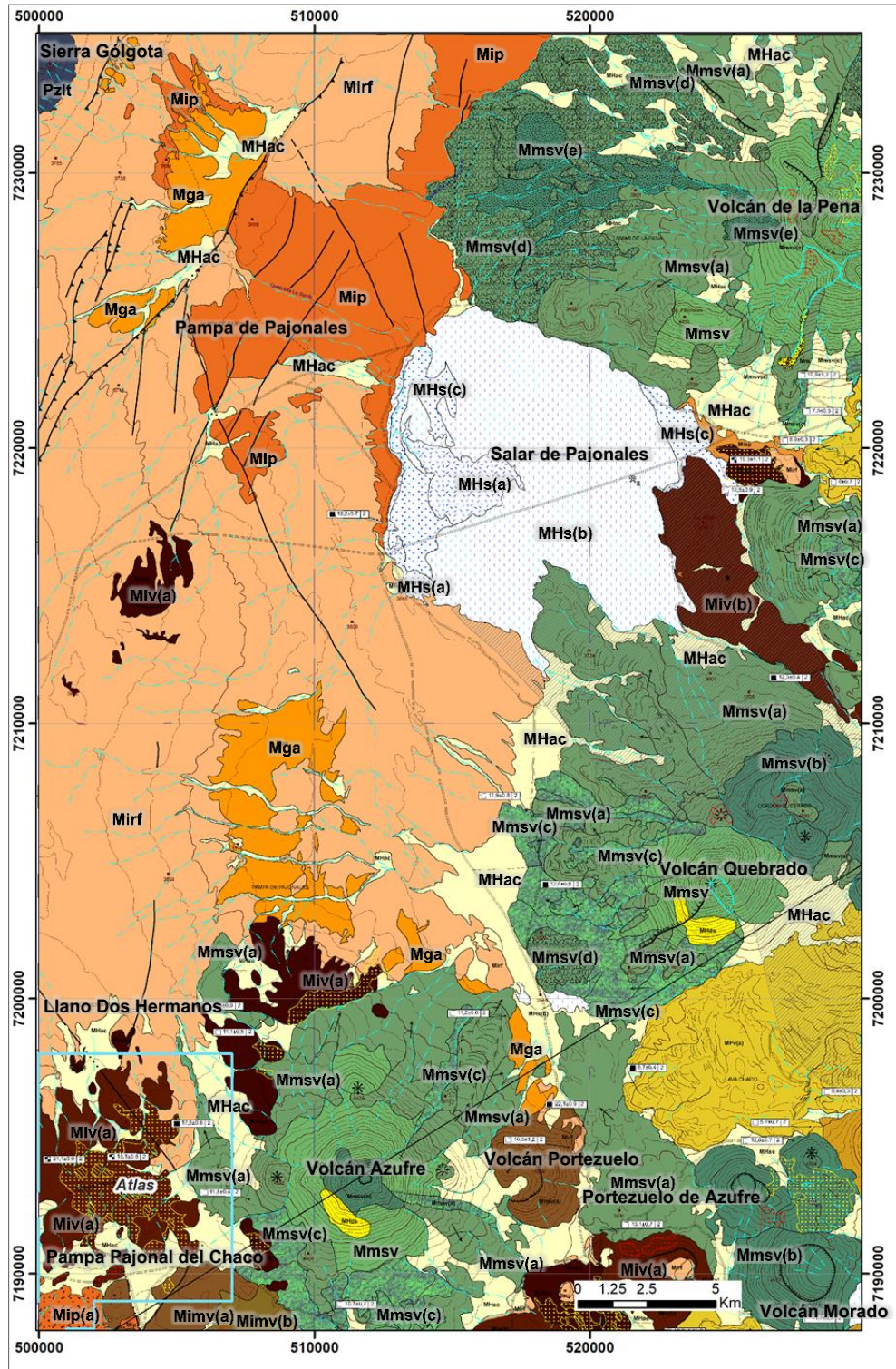

















Figura 10. Extracto de mapa GEOLOGÍA DE LAS ÁREAS SALAR DE PAJONALES Y CERRO MOÑO (Naranjo *et al.*, 2013). Leyenda en siguiente página

NEÓGENO	MIOCENO	PLUOCENO
<p>Volcanes e ignimbritas</p>	<p>Volcanes del Mioceno Medio a Superior (Mioceno medio a superior, ca.13.1-10.7 Ma) Estratovolcanes compuestos de grandes dimensiones, mediana a débilmente erosionados, calderas de avanzadas y domos ocasionales; lavas con morfologías superficiales preservadas. Lavas (a); andesitas de dos proxenos, andesitas basálticas de olivino y proxiemo, escasas dacitas de hornblenda y biotita, y lava-domos andesito-dacíticos. Depósitos de proclastos de caída (b); alternancia de colares negros y rojos oxidados, fragmentos principalmente finos con bloques de hasta 30 cm de diámetro. Depósitos de avanzadas (d); mal seleccionados, con lítilos de hasta 2.5 m de lavas del edificio. Depósito lahárico (e); depósito clásico matriz soportado, con textura arenosa y clastos lítilos de andesita porfírica, principalmente angulosos.</p> <p>Volcanes del Mioceno Inferior a Medio (Mioceno inferior a medio, ca. 16.5-15.6 Ma) Estratovolcanes compuestos de grandes dimensiones, mediana a débilmente erosionados, calderas de preservadas, cráteres, calderas y depósitos de avanzadas ocasionales. Lavas (a); son andesitas de proxenos y daciandesitas de hornblenda, con bandas de flujo ocasionales. Depósitos de proclastos de caída (b), de color gris claro a oscuro, con niveles rojos por oxidación, con lavas intercaladas. Avalancha volcánica (c); depósito mal seleccionado de fragmentos brechizados y angulosos, de lavas y del edificio volcánico, y bloques con diacáscamiento prismático.</p> <p>Ignimbritas Pajonales (Mioceno inferior a medio, ca. 16.5-15.6 Ma) Conjunto de tobas dacíticas de centizas y cristales, moderada a débilmente soldadas, con plagioclasa, biotita, anfíbola, proxiemo, comúnmente rosadas, y flujos ricos en pómez (bombas) y lítilos. (a) Ignimbrita <i>Qatañiz</i>; corresponde a un nivel basal empobrecido en finos y rico en lítilos polimícticos, que incluye bloques (~30 cm) y bombas juveniles (60% SiO₂) con diacáscamiento prismático.</p> <p>Ignimbritas Río Frío (Mioceno inferior, ca. 22.1-17.5 Ma) Conjunto de tobas dacíticas de cristales intensamente soldadas en toda su extensión, rosadas y grises, con abundantes flammes, plagioclasa, anfíbola, proxiemo y biotita. Forman extensos mantos de suaves pendientes. (a) Facies de brechas tamaño lapilli a bloques (brechas de arrastre o 'Lag breccias'). (b) Principalmente vitrofiro.</p> <p>Volcanes del Mioceno Inferior (Mioceno inferior, ca. 23.7-16.4 Ma) Conjunto de estratovolcanes, esqueletos de volcanes, secuencias de lavas y proclastos estratificados, moderada a intensamente erosionados, cueillos y diques. (a) Principalmente andesitas de ortoproxiemo y clinoproxiemo, con daciandesitas de hornblenda y/o biotita y proxiemo; y andesitas basálticas de ortoproxiemo y olivino; (b) depósitos proclásticos de caída, con capas rojizas de espesores de hasta 10 m que corresponden a terrás de lapilli escudado y lítilos de tamaño hasta bombas y bloques, con intercalaciones subordinadas de coladas de lava.</p>	<p>Depósitos Aluviales y Coluviales (Mioceno-Holoceno) Depósitos aluviales y coluviales indiferenciados; no consolidados, asociados a aluviales aluviales. En general se desarrollan en abanicos de ventilación, con matriz arenosa y clastos subangulosos, localmente consolidados, monomícticos y angulosos, gradando lateralmente a depósitos aluviales, los que generalmente corresponden a bloques, gravas, arenas y limo, polimícticos, con mala selección.</p> <p>Depósitos salinos (Mioceno-Holoceno) Depósitos de sales y sedimentos finos, dentro de los cuales se reconocen 3 facies principales. Superficies suaves, húmedas o secas, inundadas o frecuentemente inundables (a), compuestas principalmente por halita y otros minerales ocasionalmente en pequeñas dunas de material fino. Las áreas inundables presentan un predominio de cloruros (halita) sobre precipitados de sulfatos. Localmente, se desarrollan cuencas endorreicas de lago con costas salinas. Costra salina (b), compuesta principalmente de halita y lagunas de salmuera, esporádicas o permanentes. Intercalación de sedimentos acumulados en el fondo de antiguas lagunas de salmuera y costas de las actuales.</p> <p>Depósitos Solifudales (Mioceno medio-Holoceno) Depósitos de arenas y limos, con bloques (rodasman, cordones sinuosos y lítilos métricos que se han desarrollado principalmente sobre depósitos proclásticos de caída y aluviales-coluviales de las unidades del Mioceno medio a Holoceno.</p> <p>Depósitos Metárficos (Mioceno medio) Depósitos dacíticos mal seleccionados, matriz soportada de bolones y bloques principalmente volcánicos subangulosos, en una matriz de gravas subangulosas a subredondeadas, arena y limo. Se han identificado como morrenas laterales principalmente en el volcán de la Peña.</p> <p>Depósitos Solifudales (Mioceno medio-Holoceno) Depósitos de arenas y limos, con bloques (rodasman, cordones sinuosos y lítilos métricos que se han desarrollado principalmente sobre depósitos proclásticos de caída y aluviales-coluviales de las unidades del Mioceno medio a Holoceno.</p> <p>Depósitos Metárficos (Mioceno medio) Depósitos dacíticos mal seleccionados, matriz soportada de bolones y bloques principalmente volcánicos subangulosos, en una matriz de gravas subangulosas a subredondeadas, arena y limo. Se han identificado como morrenas laterales principalmente en el volcán de la Peña.</p> <p>Estratos Pajonales (Mioceno inferior) Depósito de areniscas y conglomerados framente estratificados, subhorizontales, cementados por sílice, color blanco a gris claro, de hasta 5 m de potencia. Localmente presenta estratificación cruzada, gradación normal e indicadores direccionales. Poseen fragmentos subredondeados de rocas alteradas y lavas porfíricas además de cuarzo translúcido y bolón lechoso. Estos estratos se habrían depositado en la paleocuenca endorreica del Salar de Pajonales.</p> <p>Gravas de Mtrama (Mioceno inferior a medio) Depósitos de bolones y bloques en una matriz de arena, mal seleccionados, localmente consolidados, con cemento de carbonatos y sulfatos, con clastos principalmente de rocas del basamento. Se distinguen notados desde redondeados hasta subangulosos, en una matriz arenosa.</p>
<p>MHac</p> 	<p>MHs</p> 	<p>MHs</p> 
<p>Mm</p> 	<p>Mm</p> 	<p>Mm</p> 
<p>Mlep</p> 	<p>Mlep</p> 	<p>Mlep</p> 
<p>Mga</p> 	<p>Mga</p> 	<p>Mga</p> 
<p>Pzfr</p> 	<p>Pzfr</p> 	<p>Pzfr</p> 

LEYENDA

Volcanes e ignimbritas

Depósitos y rocas sedimentarias

BASAMENTO DEL ARCO VOLCÁNICO CENOZOICO SUPERIOR

Formación La Tabla (Carbonífero? - Pérmico)
 Tobsas soldadas, porfidos rófilicos y lavas maiczas riodacíticas, de colores morado, gris verdoso y anaranjado. Las lavas son porfíricas con ojos de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. Las tobas son lítilicas y de cristales, con rasgos de fluidez y soldamiento, en las que son comunes las 'flammes' y texturas axilolíticas. Los porfidos rófilicos presentan texturas microgranulares con entrecrecimiento de cuarzo y feldespato potásico.

La remoción de materiales deleznales, como depósitos piroclásticos, zonas con alteración hidrotermal, etc., ha permitido la generación de abanicos aluviales (MHac) por acción de lluvias torrenciales. Localmente, asociados a zonas escarpadas, se han originado depósitos coluviales. La acumulación de estos depósitos ha sido permanente y continua durante la evolución de los relieves volcánicos de la zona, a partir del Mioceno inferior (Naranjo *et al.*, 2013).

2.3 Marco estructural

Con respecto al marco estructural regional, el área se encuentra en medio de un cruce de grandes estructuras tanto NW como NE. Las estructuras NW corresponden a trazas del lineamiento Culampajá (Ver figuras 10 y 11) (Salfity, 1985; Richards *et al.*, 2001) mientras que las estructuras NE se han asociado, históricamente, al denominado Sistema de Falla Vaquillas. Richards *et al.* (2001) propone que los depósitos mayores en Chile y Argentina calzan sobre estos lineamientos mayores de tendencia NE, principalmente, cuando se produce un cruce estructural con lineamientos NE o NS. Siguiendo lo anterior, se puede explicar que todos los depósitos reconocidos dentro de la Franja de Gorbea han sido emplazados ayudados por este cruce de estructuras NE y NW.

Además, se puede agregar que, en la cordillera andina a la latitud del área de estudio, se identifican tres dominios morfo-estructurales. Un dominio occidental comprende la Cordillera de Domeyko, formada entre el Oligoceno y el Mioceno medio-superior (Naranjo y Paskoff, 1985; Naranjo *et al.*, 1994), un dominio oriental que comprende al arco volcánico cenozoico superior y un 'plateau' intermedio. El dominio occidental está evidenciado en el sector noroeste del mapa por la presencia de conglomerados y gravas (Mga) del piedemonte, generado por la erosión de los terrenos alzados, los que están constituidos por rocas pérmicas de la Formación La Tabla (Pzlt) (Naranjo *et al.*, 2013).

Al oriente de la Cordillera de Domeyko, un extenso 'plateau' ignimbrítico, inclinado aproximadamente 6° hacia el este, define la transición entre ambos dominios. Este 'plateau', formado por las ignimbritas Río Frío y Pajonales (Mirf y Mip), se encuentra afectado por fallas y lineamientos de orientación noroeste y noreste; éstas últimas son inversas y exhiben rechazos de decenas de metros, mayormente, con vergencia oeste.

El dominio oriental está cubierto por, e incluye, los edificios volcánicos del Mioceno al Holoceno, los cuales se generaron a partir de cámaras magmáticas y conductos formados en espacios estructurales conjugados en relación a las

estructuras inversas compresivas. Con la excepción de los volcanes del frente del arco, la mayoría de los cuales han sufrido colapsos parciales y de un lineamiento de orientación NNW que afecta al Cordón Volcánico Atalaya-Chuta del Plio-Pleistoceno, no se observan otras evidencias de deformación en las estructuras del arco. En la parte sur del mapa, el frente del arco volcánico está desplazado aproximadamente 30 km hacia el oeste. Este desplazamiento del frente coincide con la desaparición de la Cordillera de Domeyko desde los 25°20' y hasta los 26°10', debido probablemente a un particionamiento de la deformación que a la vez permitiría el desarrollo, al sur de la carta, de una zona extensional que habría favorecido el emplazamiento de calderas miocenas (Naranjo y Lara, 2002; Naranjo *et al.*, 2013).

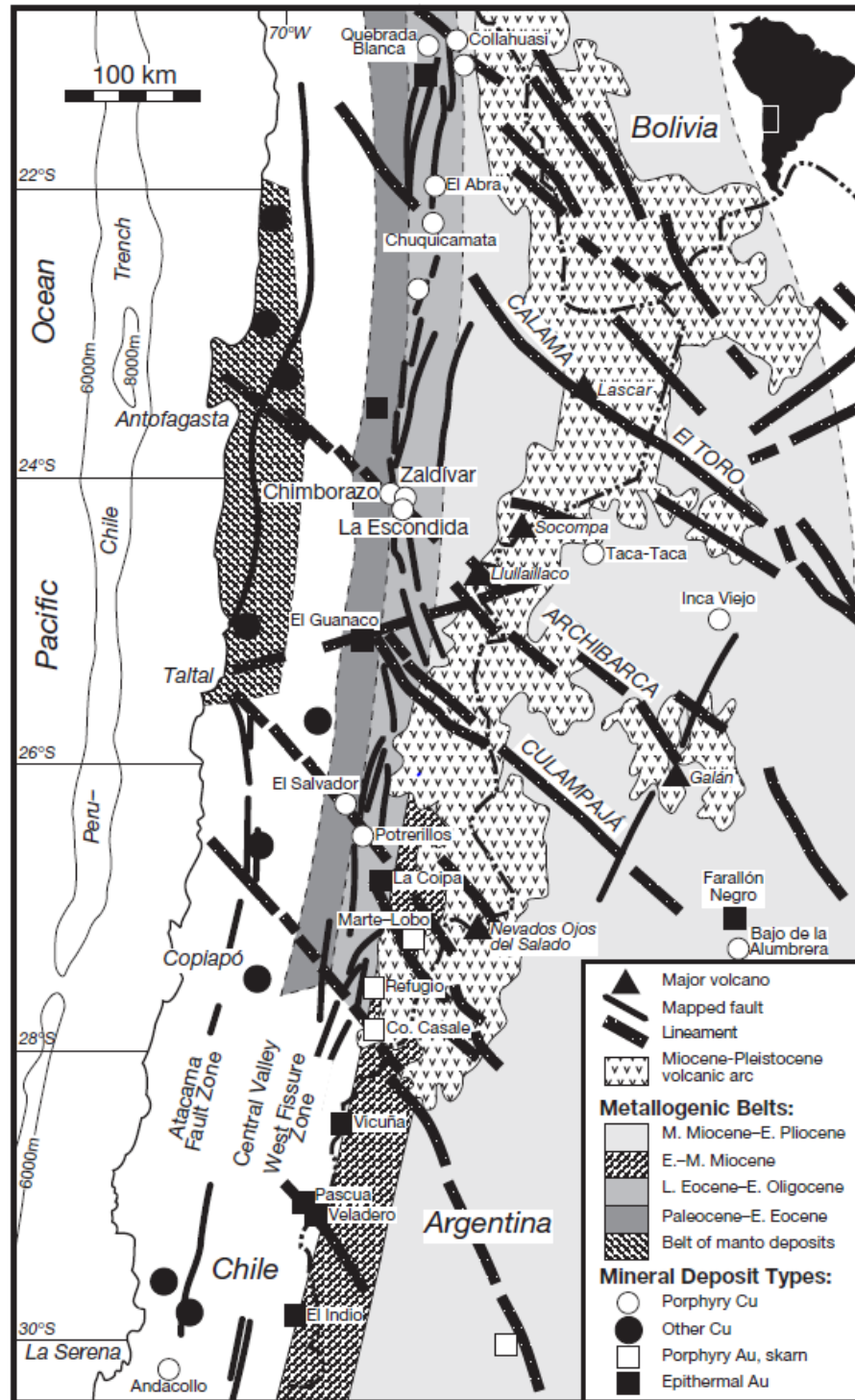


Figura 11. Mapa geológico del norte de Chile mostrando la localización de los depósitos mayores de Cu y Au en relación con las franjas paralelas al arco de magmatismo contemporáneo; y las fallas-lineamientos regionales (Richards *et al.*, 2001).

CAPÍTULO 3: TIPO DE DEPÓSITO

3.1 Generalidades

Si bien en posteriores capítulos se concluirá respecto al tipo de depósito de manera más detallada, se quiere entregar como hipótesis de trabajo que el depósito Atlas corresponde a un yacimiento epitermal Au-Ag de alta sulfuración (según clasificación de Hedenquist, 1987; Hedenquist *et al.*, 2000; Sillitoe y Hedenquist, 2003). Esta hipótesis se basa en una revisión rápida de la tabla 1, en donde las características observadas en Atlas, permiten clasificarlo como un depósito epitermal de alta sulfuración (EHS) (Ver Figura 12), ante todo por el grado de acidez que evidencia toda la asociación mineral presente.

Tabla 1: Principales características orientadas al reconocimiento en terreno de los depósitos del tipo epitermales y sus subtipos (Sillitoe y Hedenquist, 2003).

	High sulfidation		Intermediate sulfidation	Low sulfidation	
	Oxidized magma	(Reduced magma) ¹		Subalkaline magma	Alkaline magma
Type example	El Indio, Chile (vein); Yanacocha, Peru (disseminated)	Potosí, Bolivia (Ag-rich)	Baguio, Philippines (Au-rich);	Midas, Nevada	Emperor, Fiji
Genetically related volcanic rocks	Mainly andesite to rhyodacite	Rhyodacite	Principally andesite to rhyodacite but locally rhyolite	Basalt to rhyolite	Alkali basalt to trachyte
Key proximal alteration minerals	Quartz-alunite/APS; quartz-pyrophyllite/dickite at depth	Quartz-alunite/APS; quartz-dickite at depth	Sericite; adularia generally uncommon	Illite/smectite-adularia	Roscoelite-illite-adularia
Silica gangue	Massive fine-grained silicification and vuggy residual quartz		Vein-filling crustiform and comb quartz	Vein-filling crustiform and colloform chalcedony and quartz; carbonate-replacement texture	Vein-filling crustiform and colloform chalcedony and quartz; quartz deficiency common in early stages
Carbonate gangue	Absent		Common, typically including manganiferous varieties	Present but typically minor and late	Abundant but not manganiferous
Other gangue	Barite common, typically late		Barite and manganiferous silicates present locally	Barite uncommon; fluorite present locally	Barite, celestite, and/or fluorite common locally
Sulfide abundance	10–90 vol %		5–>20 vol %	Typically <1–2 vol % (but up to 20 vol % where hosted by basalt)	2–10 vol %
Key sulfide species	Enargite, luzonite, famatinite, covellite	Acanthite, stibnite	Sphalerite, galena, tetrahedrite-tennantite, chalcopyrite	Minor to very minor arsenopyrite ± pyrrhotite; minor sphalerite, galena, tetrahedrite-tennantite, chalcopyrite	
Main metals	Au-Ag, Cu, As-Sb	Ag, Sb, Sn	Ag-Au, Zn, Pb, Cu	Au ± Ag	
Minor metals	Zn, Pb, Bi, W, Mo, Sn, Hg	Bi, W	Mo, As, Sb	Zn, Pb, Cu, Mo, As, Sb, Hg	
Te and Se species	Tellurides common; selenides present locally	None known but few data	Tellurides common locally; selenides uncommon	Selenides common; tellurides present locally	Tellurides abundant; selenides uncommon

APS = aluminum-phosphate-sulfate minerals

En el modelo de evolución desde un sistema de pórfido ($>T^{\circ}$) a un ambiente epitermal, podemos observar que los depósitos observados en Atlas y Titán, se encuentran en temperaturas de formación bajo los $\sim 300^{\circ}\text{C}$ (Ver Figura 12).

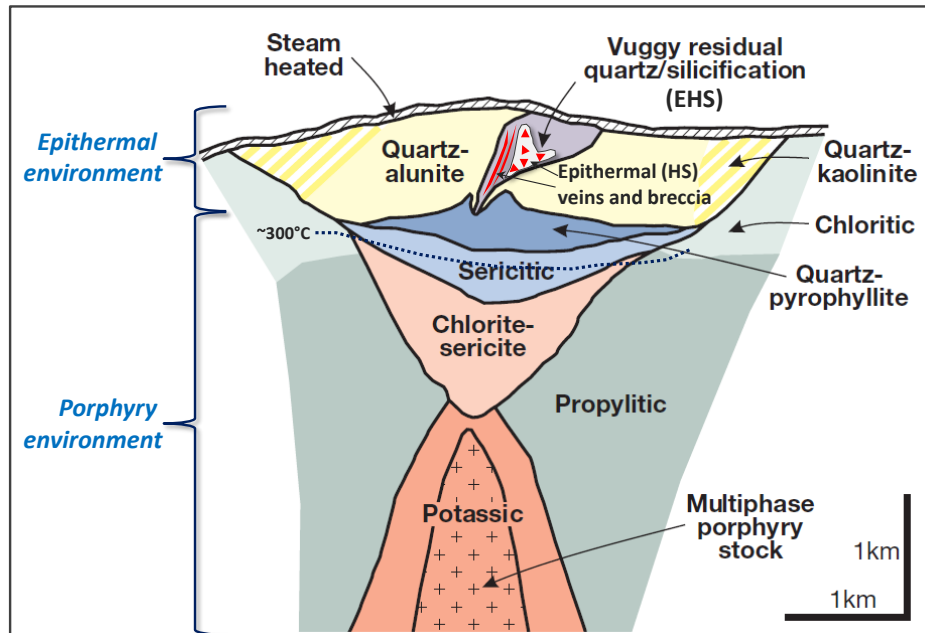


Figura 12. Modelo de alteración-mineralización generalizada para ambientes epitermal y pórfido no telescópico (modificado de Sillitoe, 2010).

Sillitoe (1991) realiza una comparación esquemática entre la geometría de los diferentes depósitos de Au del norte de Chile (Ver Fig. 13) lo que representa una primera aproximación para tener una sub-división respecto a los depósitos epitermales HS de acuerdo a la forma y tipo de mineralización del depósito.

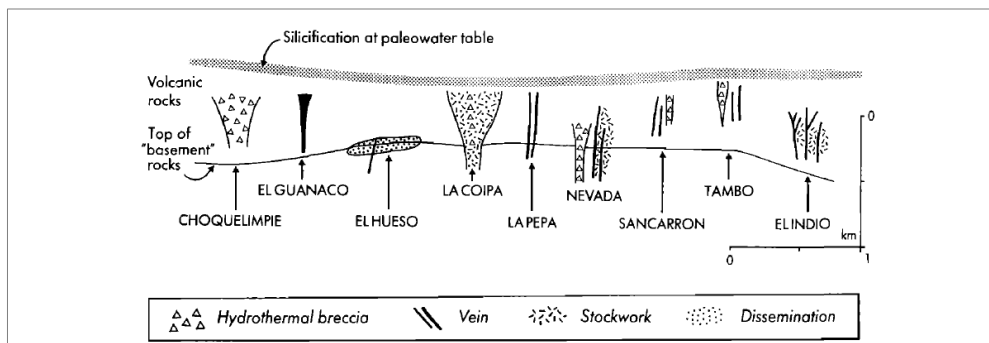


Figura 13. Estilos esquemáticos y posición con respecto a las rocas del basamento y al paleo nivel freático de los depósitos de alta sulfuración en Chile. Notar la proximidad (Sillitoe, 1991).

La Figura 14 muestra diferentes formas de los cuerpos mineralizados divididos según los controles litológicos (roca de caja), estructurales y procesos hidrotermales (Sillitoe, 1993).

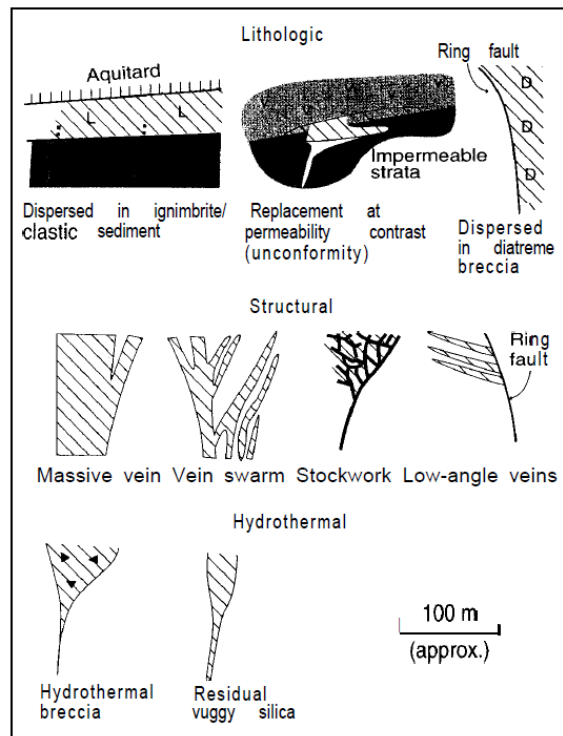


Figura 14. Ejemplos de formas de cuerpos mineralizados, controlados por roca de caja, por estructuras y procesos hidrotermales (Sillitoe, 1993). La mineralización se muestra como líneas oblicuas.

La mineralización asociada a control litológico se aloja siguiendo la geometría, potencia y dirección de la roca de caja, por lo que podemos tener mineralización estratoligada depositada en capas o cuerpos de rocas fragmentales (tobas, rocas sedimentarias, brechas volcánicas, diatremas, etc.) pudiendo tener disposiciones subhorizontales o subverticales (Sillitoe, 1993). Los controles estructurales entregan cuerpos mineralizados que han sido emplazados en fallas y sistemas de fracturas (vetas, vetillas, stockwork, etc.) (Sillitoe, 1993). Por último, el control por procesos hidrotermales resulta ser el tipo más controversial, debido a que todos los controles anteriores se originan por eventos hidrotermales y, en general, tanto las brechas hidrotermales como el *vuggy silica* pueden ser formados en roca de caja fragmental o siguiendo estructuras importantes (Sillitoe, 1993). Más importante aún es diferenciar entre

los depósitos epitermales HS que más se repiten a nivel mundial, en donde es posible separar según su forma de emplazamiento.

3.2 Sub-tipos de depósitos epitermales de alta sulfuración

Si bien los depósitos epitermales de alta sulfuración tienen características bien definidas (Ver Tabla 1), ante todo por el tipo de fluidos mineralizadores presentes en el sistema, se hace necesario clasificar sub-tipos que sean definidos de acuerdo a la forma de emplazamiento. Si bien en este tipo de depósitos los fluidos hidrotermales que provocan la mineralización son muy similares (pH~2-3), es la geometría en donde se depositan estos fluidos la que cambia y la que entrega la forma final a estos depósitos. Debido a esta forma se pueden subdividir 4 clases:

- Depósitos alojados en brecha.
- Depósitos relacionados a diatrema.
- Depósitos alojados en rocas estratificadas.
- Depósitos controlados por estructuras.

3.2.1 Depósitos alojados en brecha

Corresponden a depósitos epitermales HS que están alojados en brechas de origen magmático-hidrotermal que presentan una permeabilidad ideal para alojar mineralización. Los últimos descubrimientos en Chile se caracterizan por la presencia de una brecha freatomagmática emplazada en niveles volcánicos en donde se desarrolla la mineralización de Au-Ag tanto en *vuggy silica* como en brechas hidrotermales. En este tipo de depósitos se puede tener una serie de eventos de brecha, los cuales pueden ser diferenciados por asociaciones minerales, sin embargo, es de utilidad sólo separar los cuerpos que tienen mineralización de Au-Ag, para no dificultar el modelo final. Es común denominar el cuerpo completo como un complejo de brechas, en donde se puede tener brecha escasamente alterada, brecha con moderada a fuertemente alterada sin mineralización y brecha fuertemente alterada con mineralización.

En las figuras 15 y 16 se observan los modelos de los depósitos Salares Norte de *Goldfields* (Azevedo *et al.*, 2015) y Pascua Lama de *Barrick* (Barrick, 2017; Astorga *et al.*, 2017), respectivamente, en donde se observa la presencia de un cuerpo de brecha, denominada polimíctica o heterolítica, que representa la roca de caja donde se deposita la mineralización de Au-Ag. Esta brecha se puede clasificar como brecha freatomagmática o diatrema según sea el caso.

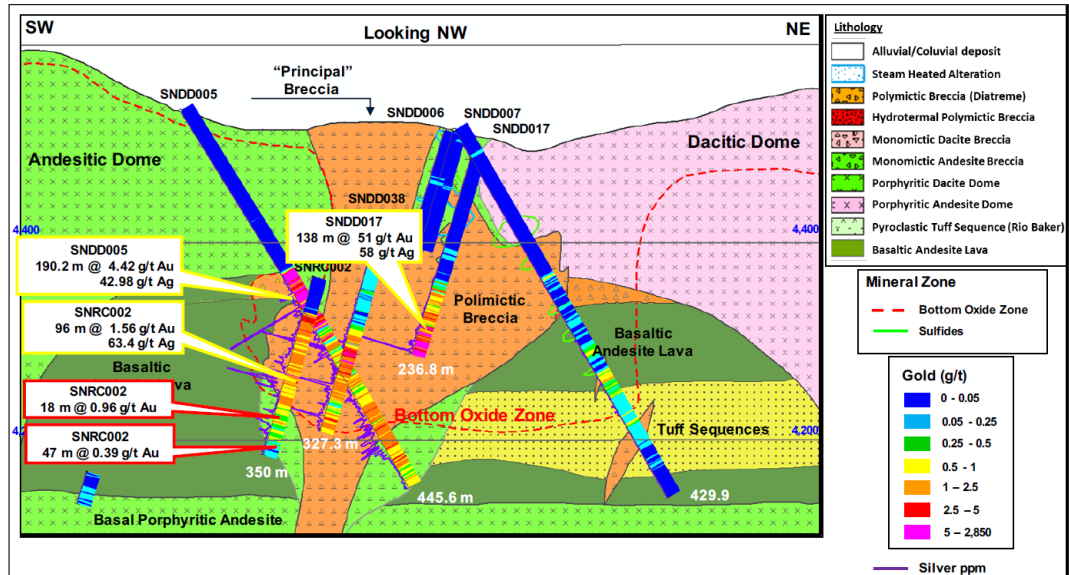


Figura 15. Sección transversal típica del depósito Salares Norte mostrando litologías y leyes de Au (Azevedo *et al.*, 2015).

En ambos casos, la mineralización de Au-Ag también se deposita en los alrededores de la brecha, en roca volcánica, sin embargo, las leyes son mucho más marginales que el núcleo de alta ley.

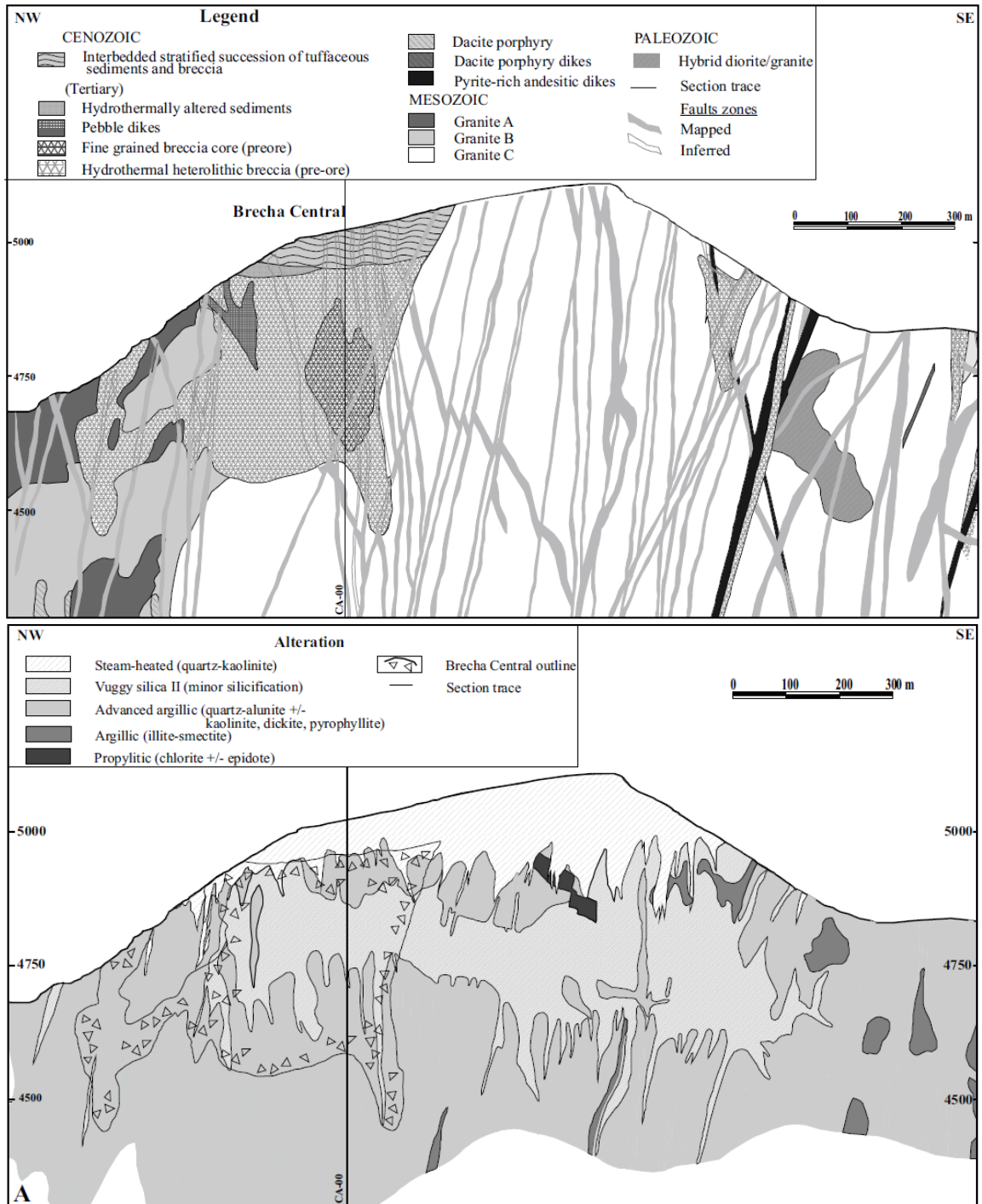
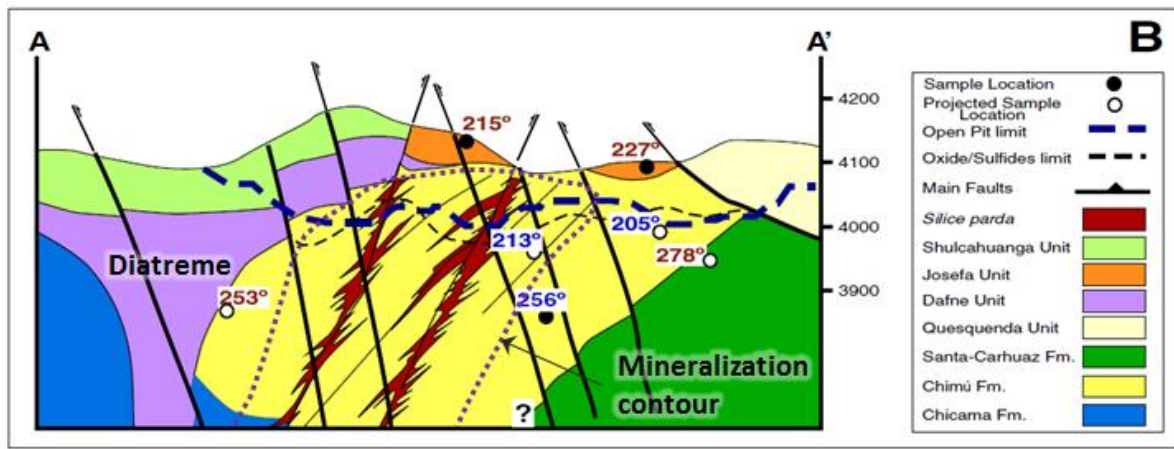


Figura 16. Sección transversal típica del depósito Pascua Lama mostrando litologías y alteraciones (Chouinard *et al.*, 2005).

3.2.2 Depósitos relacionados a diatrema

Este tipo se refiere a aquellos yacimientos HS de Au-Ag que han sido depositados en los bordes o muy cerca de un cuerpo de diatrema, pero el cuerpo central no se encuentra mineralizado. Normalmente, se tienen núcleos de diatrema estériles con bordes mineralizados.



Este tipo de depósitos es bastante común en Perú. Yanacocha y Lagunas Norte (Fig. 17) son ejemplos muy claros de cuerpos mineralizados ubicados en zonas periféricas o a lo largo de los márgenes de una diatrema. En algunos casos, los cuerpos mineralizados se encuentran rodeando completa o parcialmente a la diatrema.

3.2.3 Depósitos alojados en rocas estratificadas.

Este subtipo corresponde a aquellos depósitos epitermales HS que han sido emplazados siguiendo un nivel de roca estratificada favorable, usualmente, con la permeabilidad necesaria para alojar mineralización. Las rocas favorables más receptivas suelen ser las tobas líticas ya que tienen la componente fragmental suficiente para albergar la alteración hidrotermal capaz de originar cuerpos mineralizados; aunque también pueden ser rocas receptivas las brechas volcánicas, rocas sedimentarias clásticas, etc. Salvo algunas excepciones, estos depósitos son estratoligados y se presentan con disposición subhorizontal.

Los ejemplos clásicos de este tipo de depósitos son Yanacocha y Veladero (Ver figuras 18 y 19). Para el caso de Veladero, el cuerpo mineralizado está alojado en rocas volcánicas y volcanoclásticas del Mioceno, correspondientes a las formaciones Cerro de las Tórtolas y Vacas Heladas. La disposición de la mineralización es casi horizontal (Charchaflíe *et al.*, 2007; Holley, 2012).

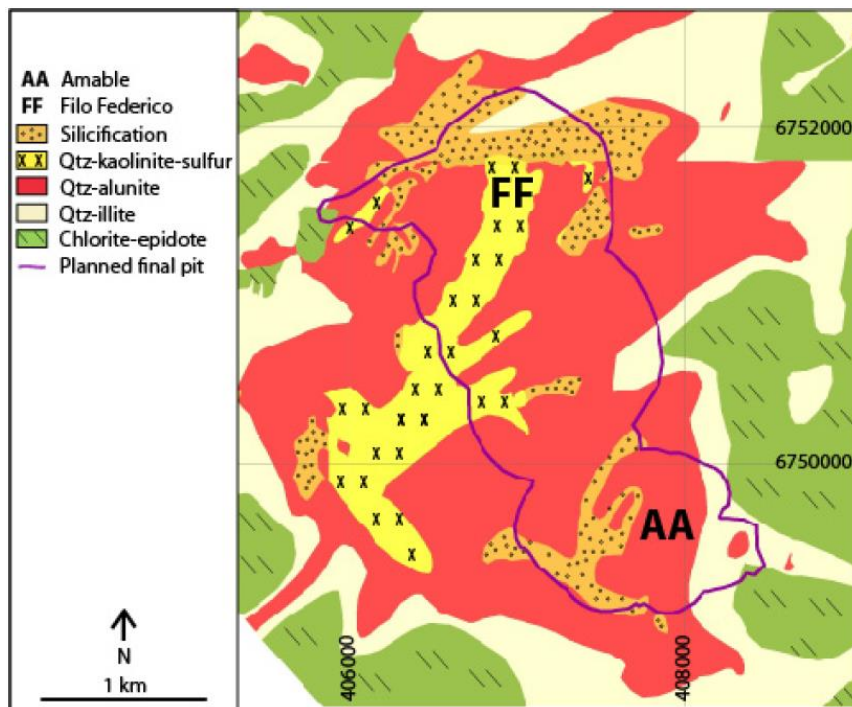


Figura 18. Mapa de superficie con las zonas de alteración en depósito Veladero (Holley, 2012).

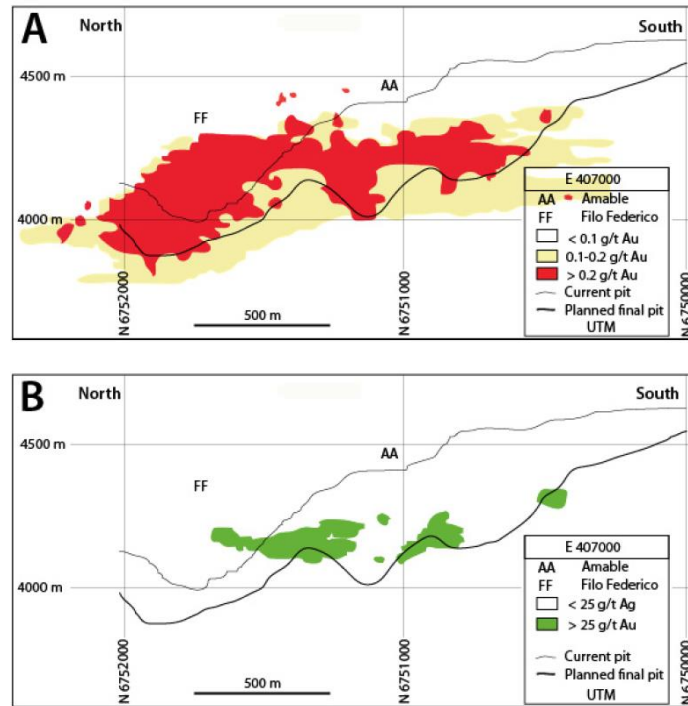


Figura. 19. Secciones longitudinales del depósito Veladero, mostrando la distribución del Au y Ag (Holley, 2012).

En general, este tipo de depósitos (íntegramente estratiformes) no se reconocen en Chile, excepto en algunos depósitos donde se produce una combinación en la depositación.

3.2.4 Depósitos controlados por estructuras.

Se refieren a aquellos depósitos epitermales HS Au-Ag en donde los fluidos mineralizadores y posterior depositación se ha concentrado en alguna estructura que se encuentre en roca poco permeable a impermeable, que asegure una concentración tabular de la mineralización.

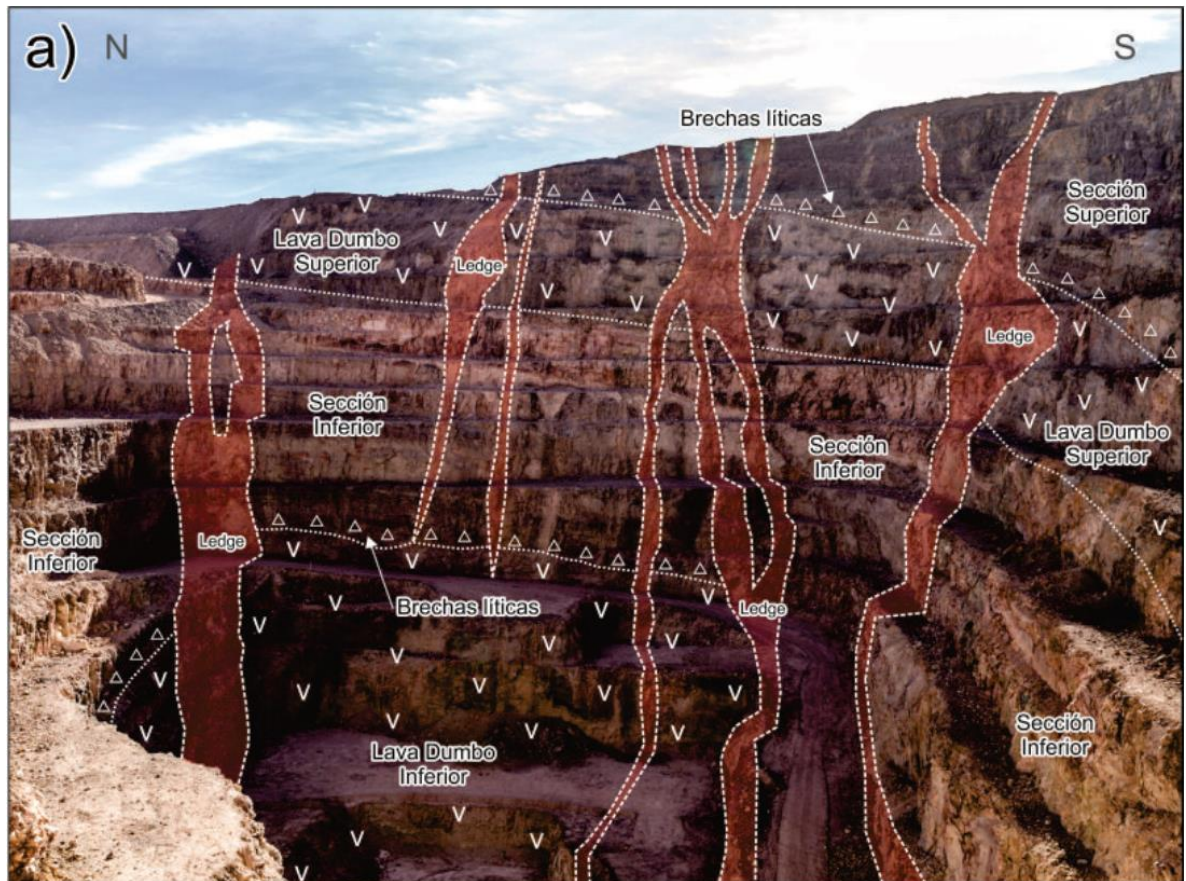


Figura 20. Vista hacia el este del Rajo Dumbo mostrando las secciones aflorantes del Sistema Hidromagmático Dumbo (Yacimiento El Guanaco) y su relación con las estructuras mineralizadas (ledges) (Páez *et al.*, 2015).

En general, este tipo de depósitos se encuentran en casi todos los yacimientos epitermales HS, aunque sea de forma local. Algunos de los depósitos más importantes de éstos son El Guanaco (Ver Fig. 20; Páez *et al.*, 2015) y El Indio (Ver Figura 21; Heather y Díaz, 2000). A pesar de tener edades diferentes, en todos estos casos, los cuerpos mineralizados son tabulares y se alojan principalmente, en andesitas o rocas volcanoclásticas con escasa permeabilidad, lo que permite que los fluidos queden concentrados según el arreglo de fallas y fracturas existentes, formando vetas o brechas acotadas a las estructuras. Este tipo de depósitos se caracteriza por ser de tamaños medianos a pequeños, con menor tonelaje, pero con leyes que pueden llegar a niveles de bonanza.

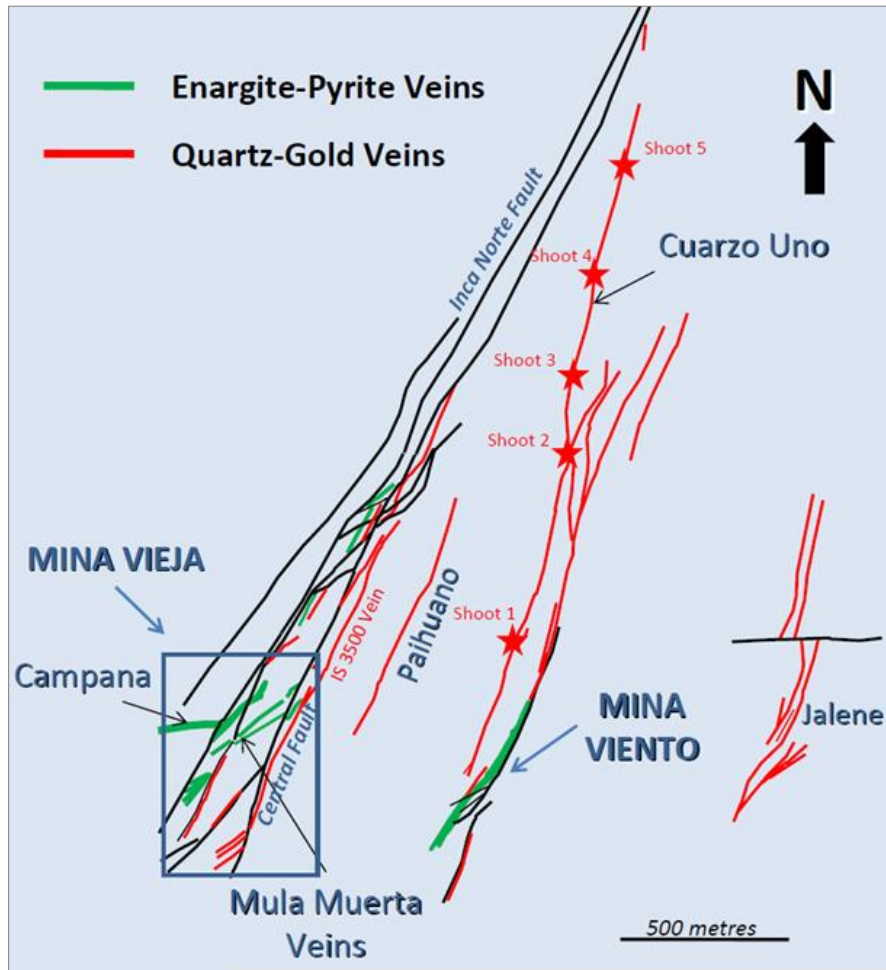


Figura 21. Mapa generalizado del sistema de vetas El Indio (Heather y Díaz, 2000).

CAPÍTULO 4: GEOLOGÍA DEL SECTOR ATLAS

4.1 Geología y generalidades

El estudio geológico realizado en el Sector Atlas, se ha llevado a cabo en dos etapas: la primera consistió en un levantamiento geológico realizado durante octubre-diciembre de 2016 (Ver Mapa Geológico y de Alteraciones en anexos), y la segunda culminó con la campaña de sondajes realizada entre enero a mayo de 2017. Las observaciones presentadas a continuación comprenden estudios de superficie y sondajes.

Las características geológicas del Sector Atlas se manifiestan como un conjunto de rocas volcánicas estratificadas con diferentes grados de alteración hidrotermal. Además, se observa un conjunto de cuerpos de brecha de origen magmático-hidrotermal. Todo esto nos permite señalar que durante el Mioceno Inferior se produjo una actividad volcánica importante en donde se depositaron, principalmente, andesitas con intercalaciones de tobas y volcarenitas; posteriormente se produjo una actividad subvolcánica o hipabisal que derivó en la formación de brechas freatomagmáticas. Finalmente, la actividad hidrotermal fue masiva y de carácter ácido, capaz de generar alteración y mineralización epitermal de alta sulfuración. El emplazamiento de los cuerpos mineralizados fue canalizado por los sistemas de fallas NE, el cual tuvo movimientos inversos que alzaron algunos bloques. Las fallas NW habrían tenido movimientos importantes en etapas post-minerales. Debido a todo lo mencionado, es posible encontrar en superficie bloques completamente preservados, bloques preservados erosionados y bloques alzados.

En general, las unidades reconocidas para el Sector Atlas son (Ver Figura 22):

- Formación La Tabla.
- Unidad Volcánica del Mioceno Inferior
- Brechas freatomagmáticas.
- Brechas hidrotermales.
- Unidad Volcánica del Mioceno Inferior a Medio.
- Ignimbritas Pajonales
- Depósitos aluviales y coluviales modernos.

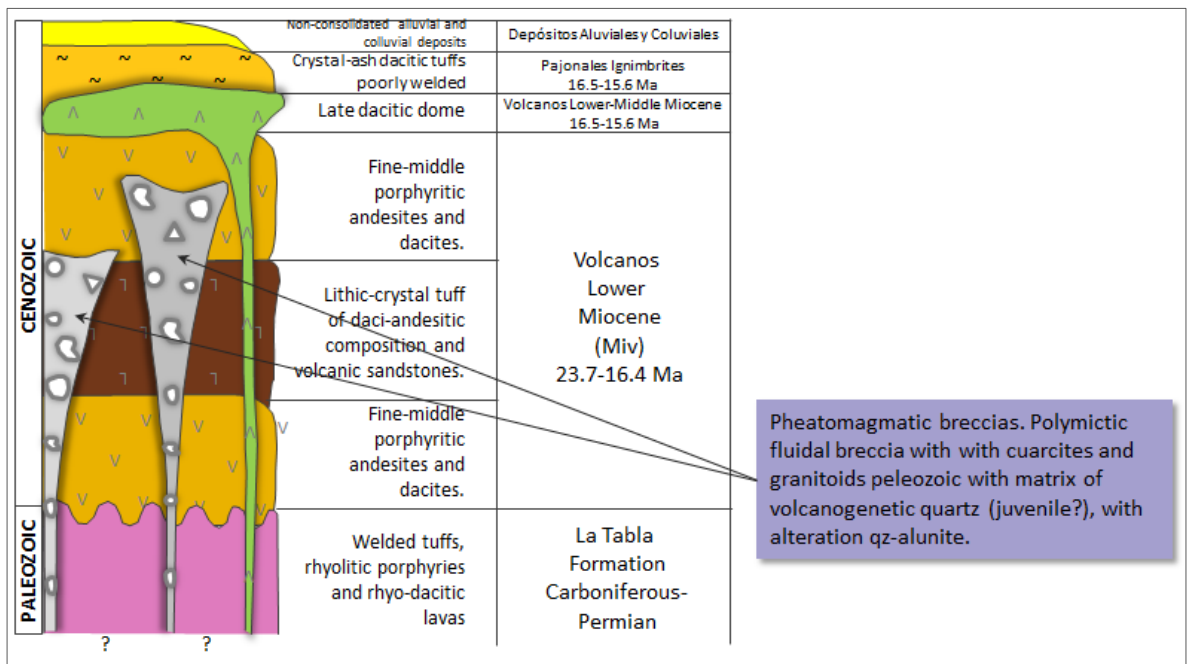


Figura 22. Columna estratigráfica generalizada para el Sector Atlas.

4.1.1 Formación La Tabla

4.1.1.1 Definición

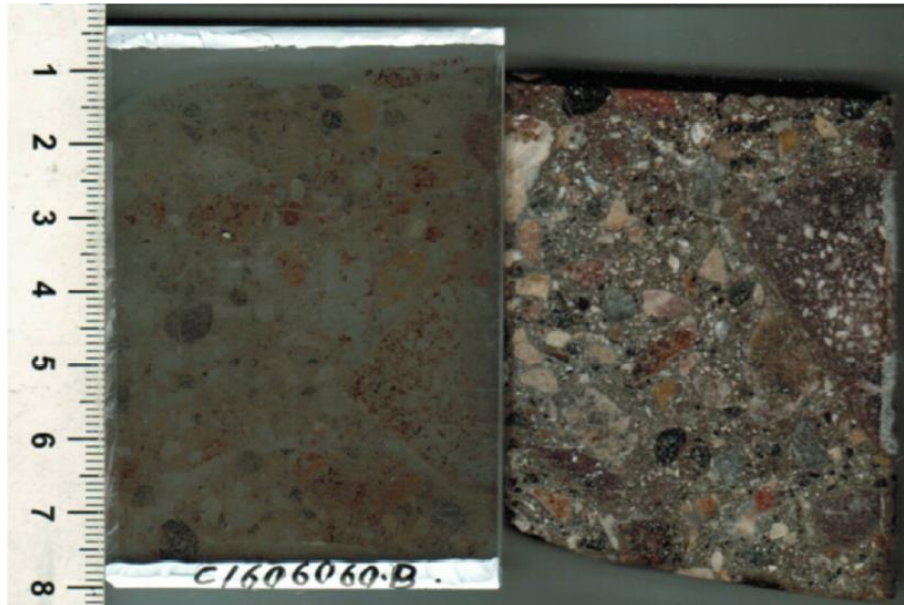
Esta unidad fue definida por García (1967) en la parte occidental del Salar de Pedernales como una unidad formada principalmente por “mantos de lava porfídica, amigdaloidales, grises, alternados con bancos de brecha clara y de lava silíceo, y capas silíceas de color crema claro”. En las cercanías del área (Sierra Gólgota) está constituida por tobas soldadas y pórfidos riolíticos, además de

lavas macizas de color morado, gris, verdoso y anaranjado (Naranjo *et al.*, 2013). Se desconoce la base de esta unidad que, inmediatamente al oeste de la zona, se encuentra cubierta con discordancia de erosión y angular por rocas de la Formación Quebrada del Salitre del Triásico Superior (Naranjo y Puig, 1984).

4.1.1.2 Litología y/o Petrografía

Si bien en el sector de Atlas no aflora ningún registro de la Formación La Tabla, sí se han encontrado clastos paleozoicos en brechas, los cuales pueden ser asignados a esta formación. La importancia de mencionar esta unidad es que representa el basamento del sector.

En muestra del Sector Atlas (Muestra C1606060B, ver Fotografía 1), se describen clastos de supuesta edad paleozoica (Cornejo, 2016). En la muestra C1606060B, lo más significativo es la incorporación de fragmentos de cuarcitas y granitoides paleozoicos, junto a variado material volcanogénico. Todos afectados por alteración a alunita y arcillas, al igual que los componentes menores de la matriz. Al microscopio, los fragmentos de granitoides contienen cuarzo plutónico anhedral, con fuerte extinción ondulosa y las plagioclasas, feldespato potásico y micas del granito original, aparecen reemplazadas por agregados hojosos, relativamente gruesos de alunita (0.1mm) con sílice y caolinita micropunteada, impregnada de limonitas rojizas. El efecto de alteración de los fragmentos es tan avanzado, que incluso, se observa propagación de fracturas intracristalinas en el cuarzo plutónico con alunita y, aparentemente, regueros de sulfuros opacos. Las cuarcitas tienen formas redondeadas (6-8 mm) y la textura es granoblástica con detritos de cuarzo recristalizado, zircones detríticos redondeados y la fracción intersticial, intensamente reemplazada por alunita y algunas limonitas.



Fotografía 1. Muestra C1606060B del Sector Atlas, correspondiente a una brecha con clastos de rocas paleozoicas, asignadas a Fm. La Tabla.

4.1.1.3 Edad

Los afloramientos de esta unidad en Sierra Gólgota, al noroeste del área, fueron correlacionados por Naranjo y Puig (1984) con unidades de las mismas características litoestratigráficas en la Cordillera de Domeyko, inmediatamente al oeste del área. Allí, la Formación La Tabla está compuesta por un complejo de flujos riolíticos y cuerpos hipabisales graníticos, los que Davidson *et al.* (1985) interpretaron como la interfase de rocas volcánicas y plutónicas, generadas en un ambiente de calderas volcánicas. Estos autores obtuvieron dataciones K-Ar y Rb-Sr de granitos y riolitas de esta unidad, las que incluyen el lapso 300 - 280 Ma (Naranjo y Puig, 1984; Naranjo *et al.*, 2013).

La Formación La Tabla forma parte de un episodio magmático que incluye componentes efusivos e intrusivos hipabisales de características ácidas, desarrollado en un ambiente continental. Al sur del área, en el mapa de las áreas Salar de Agua Amarga y Portezuelo del León Muerto, las rocas de esta formación están intruídas por rocas de la Granodiorita León Muerto, de edad pérmica tardía (Naranjo *et al.*, 2013), cuyas características petrográficas indican un emplazamiento en profundidad, lo que contrasta con el carácter subaéreo o

hipabisal de la Formación La Tabla. En consecuencia, es posible que los afloramientos de esta formación, en el mapa de las áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño, pertenezcan al lapso Carbonífero-Pérmico, lo que evidencia el diacronismo con los afloramientos de riolitas del Grupo Choiyoi al sur de los 29°S asignados al Permo-Triásico (Mpodozis y Kay, 1990).

4.1.2 Unidad Volcanes del Mioceno Inferior

4.1.2.1 Definición

Esta unidad fue definida por Naranjo y Cornejo (1992) como Conjunto Volcánico I y denominada Volcanes del Mioceno Inferior por Naranjo *et al.* (2013). En la definición se incluye un conjunto de estratovolcanes, esqueletos de volcanes, secuencias de lavas y piroclastos estratificados, moderada a intensamente erosionados, cuyos remanentes se encuentran cubiertos discordantemente por la unidad de Ignimbritas Río Frío, las Gravas de Atacama y las subsecuentes unidades de roca. Estos volcanes presentan, generalmente, grados de erosión notablemente más profundos que, a menudo, dejan al descubierto parte de la estratificación interna de los edificios. Los afloramientos se presentan como remanentes de estratovolcanes, por lo que es infrecuente la presencia de estructuras y formas volcánicas definidas (Naranjo *et al.*, 2013).

En el área de Atlas, esta unidad es ampliamente reconocida en superficie y en sondajes como coladas andesíticas con intercalaciones de rocas volcanoclásticas.

4.1.2.2 Litología y/o Petrografía

En el área de Atlas, la mayoría de los afloramientos están representados por esta unidad, la que se representa por una subunidad de lavas andesíticas a dacíticas porfídicas y otra subunidad volcanoclástica-sedimentaria.

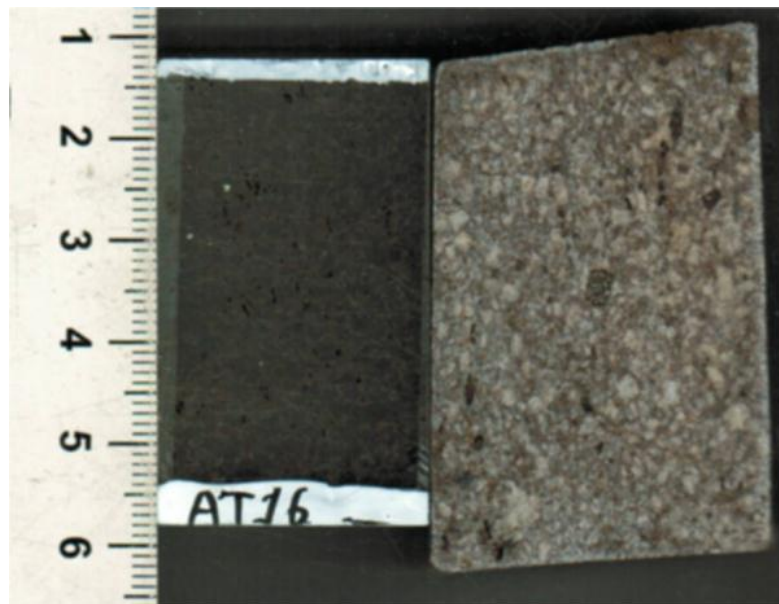
4.1.2.2.1 Subunidad Daci-andesítica

Está representada por coladas de lavas andesíticas y dacíticas las cuales representan el dominio de la unidad. En terreno se pudo medir un rumbo N70-75°E y un manto de 15-20° al SE.

El estudio petrográfico (Muestra AT-16) nos permite observar, al microscopio, una andesita porfídica de piroxeno y hornblenda (Ver Fotografía 2),

con fenocristales y glomero-cristales de plagioclasa (andesina) (1 a 4 mm) (25%) con maclas, zonación y un aspecto fresco, apreciándose fracturamiento de algunos cristales con impregnación por limonitas y desarrollo incipiente de esmectitas sobre algunas texturas cribadas y laminitas muy finas de zeolitas.

Los minerales máficos son también abundantes y corresponden a ortopiroxeno tipo hiperstena (0.5-1 mm) (4-5%) de color beige, con fracturas y una leve alteración a *inter-layers* de esmectitas con clorita. También se reconoce clinopiroxeno tipo augita (4-5%) con abundantes inclusiones de magnetita y apatito. Además, se encuentran cristales mayores de hornblenda (1 a 3 mm) (5-6%) prismática, de color anaranjado rojizo, que pueden ser consideradas como oxihornblenda, muy pleocroicas, con texturas esqueléticas de reabsorción magmática y coronas finas de reacción y oxidación. Como minerales accesorios se encuentra titanomagnetita (0.1-0.4 mm) (3%) con inclusiones de apatito y zircones y abundante apatito liberado.



Fotografía 2. Muestra AT-16 del Sector Atlas, correspondiente a una andesita porfídica de piroxeno y hornblenda, correspondiente a la Subunidad daci-andesítica.

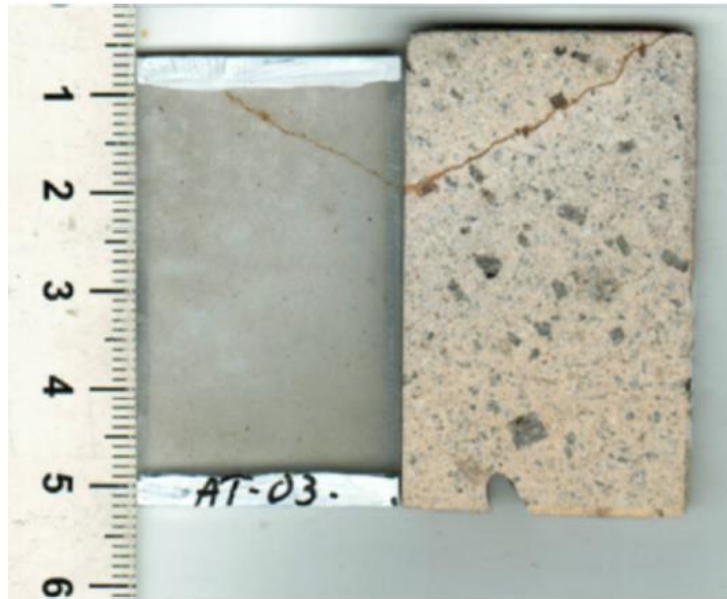
La masa fundamental es de origen vítreo muy viscoso, de color beige oscuro, con agujitas opacíticas en masas vítreas con rasgos débiles de desvitrificación (criptofelsítica), que generalmente se hace más cristalina en la

periferia de los 4 fenocristales, con desarrollo de un fino entrecrecimiento felsítico, localmente con rasgos esferulíticos (Cornejo, 2016).

Para la muestra AT-03 (Ver Fotografía 3), al microscopio, se observa que la composición original de la roca pareciera ser de tipo daciandesítica, incluso, andesítica, ya que contiene abundantes relictos de anfíbol y otros minerales máficos y las plagioclasas están reemplazadas por arcillas aluminosas. No se observan relictos de cuarzo volcánogénico o de biotita que indicaran una composición más ácida. La textura relictiva es porfídica fluidal, con siluetas de fenocristales tabulares de plagioclasa (1 a 2 mm) con vestigios de las maclas, zonación, y el cristal totalmente reemplazado por arcillas (caolinita micropunteada de muy baja cristalinidad, con láminas remanentes del feldespato original).

Los minerales máficos más reconocibles corresponden a anfíboles de secciones prismáticas y romboidales (1 a 3 mm), con el margen oscuro con micropartículas limoníticas y óxidos de titanio residuales y, el cristal en sí, está reemplazado por cuarzo de baja cristalinidad con fibras de filosilicatos (illita) levemente birrefringentes. Otras formas más granulares corresponden a piroxenos, reconociéndose también, abundantes granos de titanomagnetita oxidada (0.2-0.5mm) a óxidos de titanio oscuros rojizos, con inclusiones remanentes de zircones accesorios.

La masa fundamental aparentemente tenía textura pilotaxítica fluidal y está reemplazada por arcillas tipo caolinita de muy baja cristalinidad con cuarzo micrométrico y pequeñas partículas opacas oxidadas.



Fotografía 3. Muestra AT-03 del Sector Atlas, corresponde a una daciandesita porfídica de anfíbol, correspondiente a la Subunidad daci-andesítica.

4.1.2.2 Subunidad Volcanoclástica-sedimentaria

Esta subunidad corresponde a horizontes de tobas litocristalinas daci-andesíticas y volcarenitas epiclásticas polimícticas formadas por material volcanogénico. Esta subunidad se encuentra intercalada en las andesitas porfídicas.

El estudio petrográfico de la muestra AT-35A (Volcarenita epiclástica polimíctica con clastos volcanogénicos) (Ver Fotografía 4) permite observar, al microscopio, que la mayoría de los componentes tienen formas redondeadas irregulares (1 a 4 mm) de muy diversas litologías, que corresponden a andesitas o daciandesitas de aspecto opalizado y con los máficos (piroxenos) y titanomagnetita oxidada. Las formas pumíceas son también bastante irregulares (0.5 hasta 3 mm) y están compuestas por esqueletos de vidrio fibroso opalizado y en oquedades aparecen rosetas de tridimita.

Otro grupo de líticos corresponden a rocas silicificadas finas (0.5-3 mm) (8-10%), que parecen corresponder a areniscas finas cuarzo-feldespáticas y otros, tipo volcanogénicos más afaníticos, sobre los cuales se han formado rosetas gruesas de turmalina (0.1-0.5 mm) de color verde petróleo y el fragmento

está alterado a rosetas finas de sericita. También se reconoce rutilo y circones y unos agregados globulares rojizos de limonitas hematíticas (Cornejo, 2017A).



Fotografía 4. Muestra AT35A del Sector Atlas, correspondiente a una volcarenita epiclástica polimíctica con clastos volcanogénicos, correspondiente a la Subunidad Volcanoclástica-sedimentaria.

La fracción de la matriz de la roca, contiene formas menores de cristales liberados de plagioclasa (0.5 mm) y algunas astillas de cuarzo volcanogénico, cementadas (6-8%) por bandas de ópalo de color beige y comportamiento isótropo, adherido a la pared de los fragmentos. Hacia el centro de las oquedades se observa caolinita muy fina de aspecto “sal y pimienta” y cristalitas incoloras subcuadradas, prácticamente micrométricas de alunita. Adosados a los márgenes de los fragmentos se observan limonitas hematíticas rojas (Cornejo, 2017A).

La roca no presenta venillas y, como se mencionó, la formación de la sericita y la turmalina es previa a la formación de este depósito. La alteración dominante es argílica avanzada de un nivel alto (superficial), ya que predomina la caolinita y el ópalo.



Fotografía 5. Sondaje CLATDH0017 (Profundidad 280 m) del Sector Atlas (Falda Zone), corresponde a una toba lito-cristalina de composición andesítica, correspondiente a la Subunidad Volcanoclástica-sedimentaria.

En el sondaje CLATDH0017 a los 280 m de profundidad (Ver Fotografía 5) se logró interceptar una toba litocristalina de composición andesítica, con escasa alteración argílica y clorita, no observándose estratificación. Estas tobas más las unidades sedimentarias, forman la Subunidad Volcanoclástica-sedimentaria.

4.1.2.3 Edad

La Unidad Volcanes del Mioceno Inferior fue datada por Naranjo y Cornejo (1992), donde obtuvieron 9 edades K-Ar en roca total y alunita-cuarzo para la unidad Volcanes del Mioceno inferior, que definen un intervalo comprendido entre los 23,7 a los 16,4 Ma. Estas edades incluyen prácticamente todos los volcanes y las respectivas alteraciones hidrotermales de la unidad (Naranjo *et al.*, 2013).

4.1.3 Unidad Brechas Freatomagmáticas

4.1.3.1 Definición

El término brecha freatomagmática proviene de violentas erupciones ocasionadas por el emplazamiento de magma despresurizado (Diques o cuerpos sub-volcánicos) que libera volátiles y llega a ponerse en contacto con el nivel de aguas subterráneas, donde rápidamente se sobrecalienta para formar vapor (Sillitoe y Bonham, 1984; Sillitoe, 1985; Corbett y Leach, 1998).

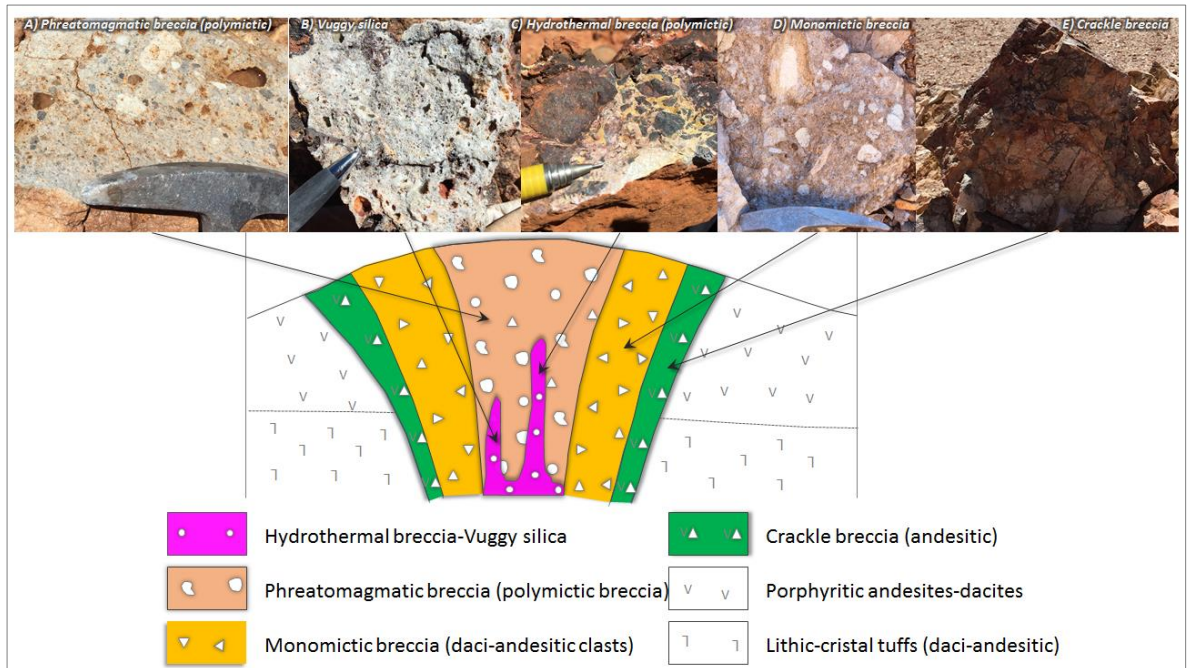


Fig. 23. Modelo del complejo de brechas, en donde se tiene un centro polimíctico gradando hacia bordes monomícticos.

Esta unidad hasta ahora no había sido definida (se incluía dentro de la Unidad Volcanes del Mioceno Inferior) para el área (sólo fue mencionada en reportes de *Mirasol Resources Ltd.*, aunque sin descripciones detalladas), por lo que en este trabajo se define como un grupo de brechas de origen magmático-hidrotermal polimícticas con material juvenil (polvo de roca) en la matriz. Estas rocas muestran una estructura típica formada por un complejo de brechas con un centro que presenta material polimíctico que ha sufrido mayor aporte energético y hacia los bordes se tiene material cercanamente monomíctico que, paulatinamente, gradada hasta la roca de caja (Ver Figura 23). Estos complejos de brecha aparecen en varios sectores del área, totalizando 5 núcleos de interés (Ver Mapa Geológico en anexos).

La importancia que se le puede atribuir a esta unidad, como se complementará en capítulos posteriores, es que representa una excelente roca de caja para alojar mineralización en brechas hidrotermales.

4.1.3.2 Litología y/o petrografía

Los afloramientos de esta unidad se observan, a menudo, con fuerte alteración hidrotermal, sobre todo alteración argílica avanzada, sin embargo, se han encontrado sectores con buenos registros para observar (Ver fotografías 6 y 7). En cuanto a los sondajes, también se han observado zonas con escasa alteración y otras con fuerte alteración y mineralización aurífera alojada en este tipo de brechas.



Fotografía 6. Muestra de afloramiento de brecha freatomagmática en Sector Atlas (Portezuelo), con escasa alteración.

El estudio petrográfico realizado en la muestra C1606060B permite ver una roca de textura brechosa matriz-soportada, de composición polimíctica, con fragmentos subredondeados a angulosos de orden de 4 a 5 cm de diámetro hasta 1cm. Aunque en la muestra de mano la brecha pareciera ser un depósito epiclástico convencional, al microscopio, existen ciertos rasgos texturales en la matriz y tipo de alteración en los diversos componentes líticos, que podrían indicar que corresponde a una fase explosiva precursora tipo “brecha freática” de un cuerpo mayor de “diatrema”. Lo más significativo es la incorporación de fragmentos de cuarcitas y granitoides paleozoicos, junto a variado material volcanogénico. Todos afectados por alteración a alunita y arcillas, al igual que los componentes menores de la matriz.



Fotografía 7. Muestra de afloramiento de brecha freatomagmática en Sector Atlas (*Steam Heated Zone* (SHZ)), con silicificación intensa.

Al microscopio (muestra C1606060B), los fragmentos de granitoides contienen cuarzo plutónico anhedral, con fuerte extinción ondulosa y las plagioclasas, feldespato potásico y micas del granito original, aparecen reemplazadas por agregados hojosos, relativamente gruesos de alunita (0.1 mm) con sílice y caolinita micropunteada, impregnada de limonitas rojizas. El efecto de alteración de los fragmentos tan avanzado, que incluso, se observa propagación de fracturas intracrystalinas en el cuarzo plutónico con alunita y, aparentemente, regueros de sulfuros opacos. Las cuarcitas tienen formas redondeadas (6-8 mm) y la textura es granoblástica con detritos de cuarzo recristalizado, circones detríticos redondeados y la fracción intersticial, intensamente reemplazada por alunita y algunas limonitas. Los fragmentos volcanogénicos también son muy variados, de origen vítreo y otros más porfídicos donde destacan algunos, en especial, muy alterados, con venillas de alunita cristalina del orden de 0.5 mm de espesor y con *boxworks* de sulfuros y el fragmento en sí, microcraquelado, impregnado de limonitas (Ver Fotografía 1).

La matriz es fragmental con trozos pequeños de material volcanogénico (0.5-3 mm) de aspecto oqueroso, impregnado de limonitas. También se encuentran trozos angulosos astillados de cuarzo volcanogénico, adquiriendo la matriz, rasgos de flujo, con las astillas de los cristalitos, orientadas en un material

microcristalino, compuesto de abundante alunita fina con cuarzo (microcristalino hidrotermal), que va formando bandas en torno a los fragmentos líticos mayores y, también, logra propagarse como pequeños pelillos a través de los líticos, tanto los volcanogénicos como el material antiguo, especialmente en el margen de los fragmentos se observan microvenillas de alunita (0.1-0.3 mm) con cuarzo fino de baja cristalinidad, entre la matriz y el lítico y, en algunos casos, logra penetrar a través de los líticos (Cornejo, 2016).

Estas observaciones y la intensidad de alteración a alunita, parecen indicar que el cuerpo de brecha es explosivo más que un origen sedimentario epiclástico para este depósito.

El estudio petrográfico realizado en la muestra C1703822A (Ver Fotografía 8) expone una roca de textura brechosa matriz-soportada, con rasgos de flujo. Se observan ciertos fragmentos angulosos muy silicificados de color blanco y aspecto sacaroidal, en una matriz de tono beige-ocre, que presenta banditas oscuras sinuosas de color más castaño, que corresponden a bandas con rutilo y otros óxidos de titanio, que en este tipo de sistemas (“diatremas” o “brechas freatomagmáticas”), se conoce como “sílice parda”, asociada a la destrucción de minerales máficos y granitos de titanomagnetita en presencia de gases muy ácidos, en ambientes de alteración argílica avanzada.

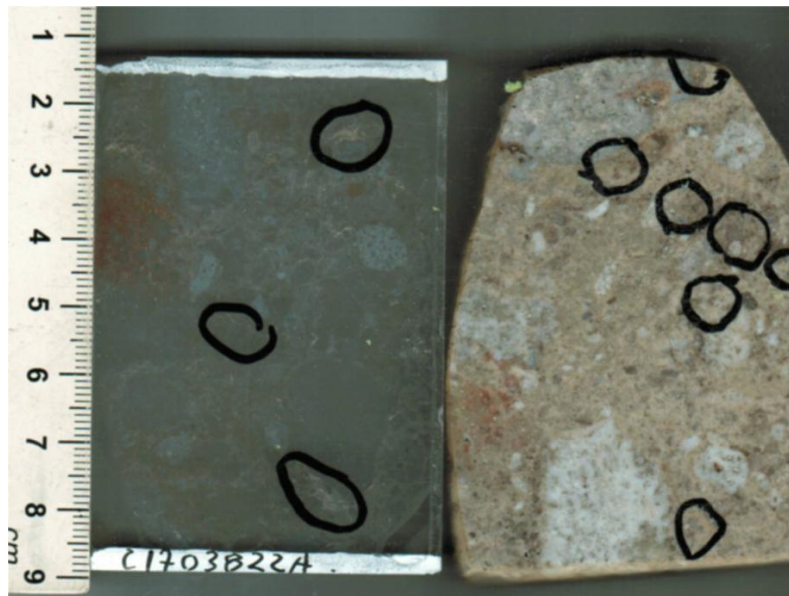
Al microscopio, la textura es matriz-soportada, muy heterogénea, con fragmentos diversos de rocas volcanogénicas silicificadas y lixiviadas, con texturas de “*vuggy silica*”. Los tamaños son centimétricos (2-3 cm) hasta 1cm. Se reconocen trozos mayores de una roca daciandesítica silicificada y lixiviada con formas de anfíbolos romboidales y también de plagioclasas (0.5-2 mm) en este caso, reemplazadas por cuarzo microgranular de aspecto impuro.

Otros fragmentos muy silíceos tienen composición más riolítica, ya que contienen “ojos” de cuarzo pequeños (0.5 mm) y algunas formas de anfíbolos y biotitas oxidadas.

En la matriz de la brecha, aparecen trozos alargados (2-4 mm) de aspecto silíceo fluidal que pueden corresponder a pómez o material juvenil, también con “ojos” de cuarzo pequeños. El material más fino fragmentado, corresponde a trozos de rocas muy silicificadas, en su mayoría riolíticas y, también, se aprecian astillas de cuarzo volcanogénico liberados y cristales mayores de circones de hasta 0.5 mm. El material fino intersticial es silíceo muy oscuro y a través de él, se difunden unas guías sinuosas (0.1-0.2 mm) de material micrométrico formada

principalmente por óxidos de titanio semi-translucido (rutilo) y otros más amorfos. En esta fracción de la roca, en lo que se podría denominar “sílice parda (*cream silica*)”, aparecen algunos granitos micrométricos de electrum (identificados en la sección calcográfica) (Cornejo, 2017A).

Estas texturas de la “sílice parda (*cream silica*)” fina fluidal con rutilo, se han descrito en los cuerpos de diatremas mineralizadas (HS) del Yacimiento Lagunas Norte, en Perú y al parecer, en esta muestra, habría indicios de ese tipo de evento y, pudiéndose aplicar algún estudio futuro para conocer la relación entre los óxidos de titanio y la eventual presencia de metales preciosos.



Fotografía 8. Muestra C1703822A del Sector Atlas, correspondiente a Brecha freatomagmática fluidal, con fragmentos dacíticos de anfíbola lixiviados y matriz más riolítica con cuarzo volcanogénico.

4.1.3.3 Edad

Tal como se mencionó en el punto 12.4.1, esta unidad no había sido definida y, por ende, no posee dataciones, sin embargo, podemos realizar algunas relaciones de contacto con las dataciones realizadas en el sector:

- 21.1 ± 0.9 Ma, método K-Ar en alunita (Naranjo y Cornejo, 1992).
- 18.1 ± 0.8 Ma, método K-Ar en alunita (Naranjo y Cornejo, 1992).
- 19.86 ± 0.04 Ma, método ^{40}Ar - ^{39}Ar en alunita (Ross, 2014A).
- 17.08 ± 0.79 Ma, método ^{40}Ar - ^{39}Ar en alunita (Ross, 2014B).

Todas estas dataciones corresponden a la edad de la alteración argílica avanzada, específicamente de alunita, por lo tanto, representan la edad del evento mineralizador. La edad más joven posible queda con 17 Ma. Por otra parte, todas estas brechas están emplazadas en la Unidad Volcanes del Mioceno Inferior, por lo tanto, si consideramos que Naranjo y Cornejo (1992) asignaron un rango de edad de 23.7 a los 16.4 Ma para esta unidad; la edad relativa para las brechas freatomagmáticas puede considerarse con un rango de 23.7 a 17 Ma.

4.1.4 Unidad Brechas hidrotermales

4.1.4.1 Definición

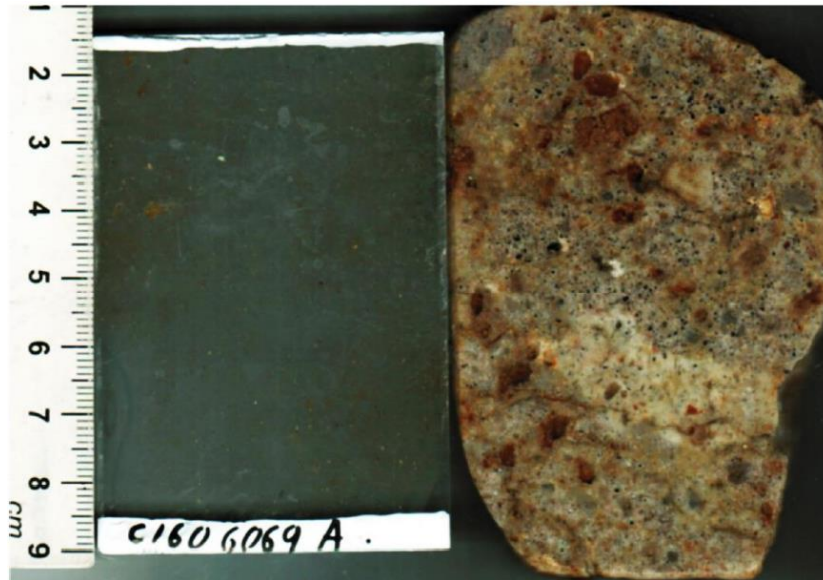
Aún no han sido definidas como unidad. En este trabajo se definen como un conjunto de brechas de origen hidrotermal con variada composición, usualmente, polimícticas y que en rocas andesíticas presentan una disposición tabular, mientras que en rocas fragmentales muestran una disposición más diseminada. Además, estas brechas pueden o no contener valores de Au y Ag.

4.1.4.2 Litología y/o petrografía

Existen variados tipos de brechas hidrotermales, todas ellas asociadas a una fuerte alteración hidrotermal (principalmente, *vuggy silica*), aunque conformadas por diferentes especies mineralógicas.

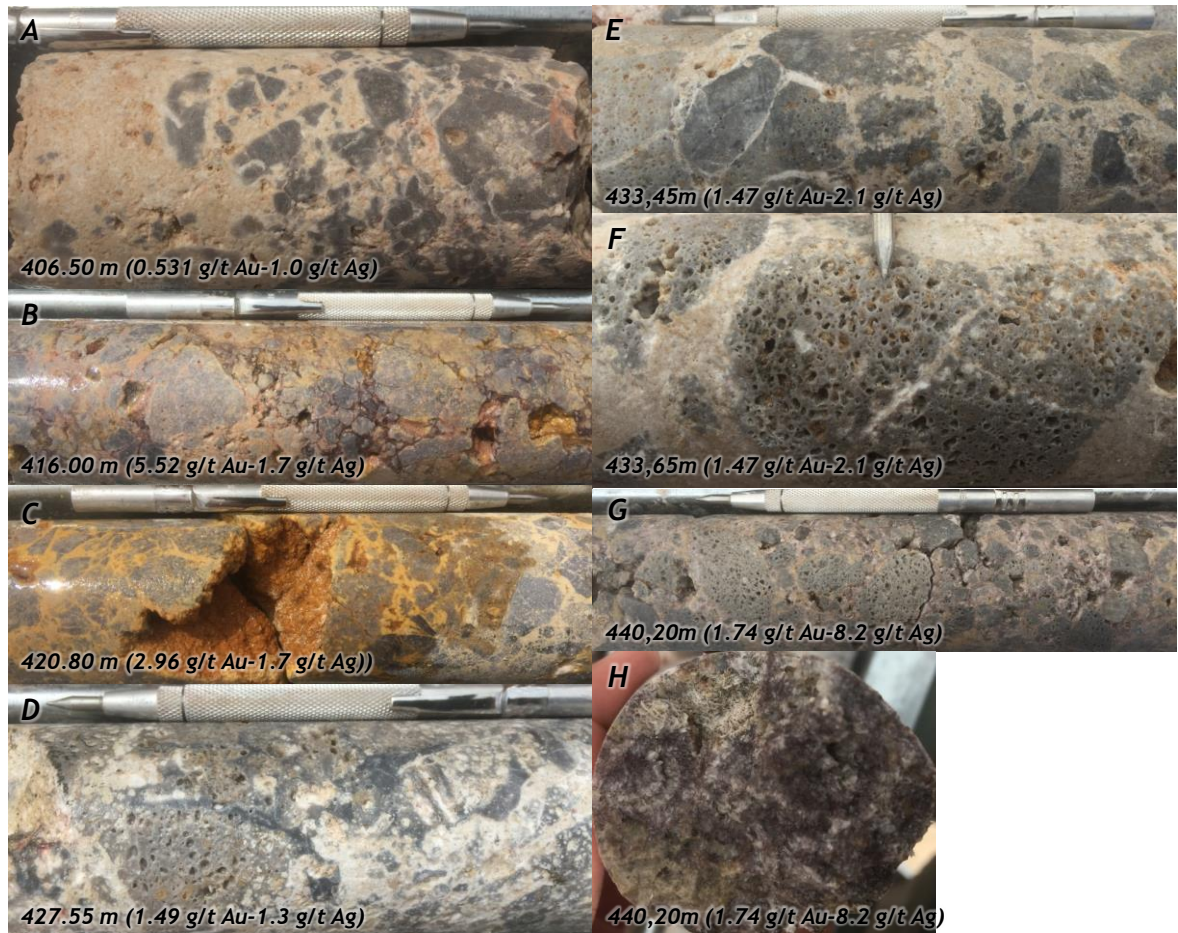
Como ejemplo de una brecha hidrotermal con *vuggy silica*, en la muestra C1606069A (Ver Fotografía 9) tenemos una roca de textura brechosa, afectada por intensa silicificación tanto de los fragmentos como de la matriz y también con un proceso de lixiviación que forma un “*vuggy silica*” oqueroso con abundante jarosita en las oquedades.

Al microscopio, la textura es matriz soportada, con siluetas difusas de diversos fragmentos líticos (1 a 8 mm), de rocas volcánicas silicificadas oscuras, con relictos tabulares gruesos (2 mm) de fenocristales de plagioclasa con un margen con cuarzo hialino y el núcleo del cristal lixiviado. La masa fundamental de estos fragmentos está silicificada a un agregado cristalino de cuarzo muy impuro, pero relativamente grueso (0.1-0.3 mm) con abundante jarosita cristalina intersticial, cristalina, amarilla (0.1 mm) (Cornejo, 2016).



Fotografía 9. Muestra C1606069A del Sector Atlas, correspondiente a brecha hidrotermal (“vuggy silica”), con líticos volcánicos silicificados y lixiviados con cuarzo y jarosita y una matriz sílicea jasperoidal.

En la fotografía 10 B y C, se logra observar un tipo de brecha hidrotermal de un tono amarillento, que ha cobrado especial importancia, ya que los estudios geoquímicos, están mostrando que esta brecha contiene una alta ley de Au dentro del sistema. En general, esta brecha “amarilla” se caracteriza por tener clastos completamente silicificados (sílice grisácea), en ocasiones con *vuggy silica* y matriz de qz-alunita-jarosita y, posiblemente, oropimente. Además, existen cavidades centimétricas en donde se alojan cristales de baritina que contienen granos de Au.



Fotografía 10. Sondaje CLATDH0015, mostrando varias profundidades desde los 400 m. A) Brecha hidrotermal con matriz de qz-alu y clastos silicificados. B) y C) Brecha hidrotermal “amarilla”, con matriz de qz-jar-alu-natroalunita-baritina. Las cavidades muestran cristales de natroalunita y baritina semi-translúcida con trazas de Au nativo. D), E), F) y G) Brecha hidrotermal con matriz de qz-alu y clastos de andesita con vuggy silica intenso. H) Corte de testigo con cristales de alunita cristalina de alta T°.

4.1.4.3 Edad

Esta unidad aún no cuenta con dataciones, sin embargo, se está en proceso de datación por método ^{40}Ar - ^{39}Ar en alunita. No obstante, de acuerdo a las dataciones de Naranjo y Cornejo (1992), y Ross (2014A), las cuales fueron hechas en alunita con métodos K-Ar y ^{40}Ar - ^{39}Ar , respectivamente, podemos inferir una edad de 21 a 18 Ma para la formación de estas brechas.

4.1.5 Unidad Volcánica del Mioceno Inferior a Medio.

4.1.5.1 Definición

Se agrupa en esta unidad a un conjunto de estratovolcanes medianamente erosionados, lavas y brechas que presentan morfologías superficiales (cordones y bancos laterales) parcialmente preservadas que fue definida por Naranjo y Cornejo (1992) como Conjunto Volcánico II. En ella se distinguen cráteres, ocasionalmente calderas y depósitos de avalancha volcánica. Estos volcanes y lavas sobreyacen a las ignimbritas del grupo Río Frío y, en forma local, están cubiertos claramente por lavas de los conjuntos volcánicos subsecuentes (Naranjo *et al.*, 2013).

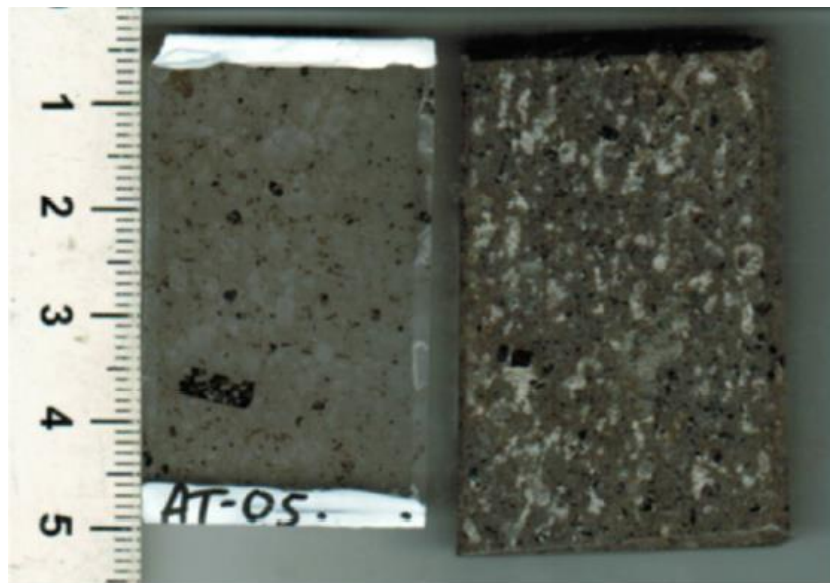
4.1.5.2 Litología y/o petrografía

Dentro del área de estudio, se tiene como la mayor expresión de esta unidad al Domo dacítico tardío del sector *Falda Zone*.

El estudio petrográfico (Muestra AT-05: Dacita porfídica) (Ver Fotografía 11) muestra una roca volcánica de color gris levemente rosáceo con abundantes formas de cristales blanquecinos de plagioclasa y, también, formas oscuras de cristales de minerales máficos (anfíboles y biotita). Esta roca es bastante compacta y no presenta porosidades primarias mayores.

Al microscopio, la textura es porfídica, rica en fenocristales y la masa fundamental tiene aspecto viscoso y, localmente, vítreo intersticial, con rasgos de flujo irregular, que indica que corresponde a un magma viscoso, probablemente relacionado a un cuerpo de domo. No se observa fragmentación de los cristales, que es más bien característica de flujos piroclásticos. Está compuesta por fenocristales y glomero-cristales de plagioclasa (Andesina) (20%) (1 a 3 mm) con maclas polisintéticas, rasgos de zonación y algunos cristales con diferentes texturas cribadas, en los núcleos o en los anillos de zonación. Los minerales máficos corresponden principalmente a hornblenda (8%) de color pardo anaranjado (1 a 2 mm de largo) y algunos megacristales de 6 mm. La mayoría muestra rasgos de reabsorción magmática, con texturas acanaladas y esqueletales, ocupadas por cristales de plagioclasa, clinopiroxeno. También se reconocen cristales hojosos de biotita magmática (4%) (0.5-2 mm) de color café oscuro con rasgos de reabsorción magmática y coronas de reacción, con

plagioclasas pequeñas y magnetita. La masa fundamental contiene microcristales parcialmente corroídos (0.1-0.3 mm) de plagioclasas, anfíboles pequeños con un borde opacítico, abundantes granos de titanomagnetita con inclusiones de apatito y circones. El material intersticial era de origen vítreo (hialopílitico) de color beige y presenta efecto menor de desvitrificación criptofelsítica, con agujitas de plagioclasa y abundantes granulitos opacos (Cornejo, 2016).



Fotografía 11. Muestra AT-05 del Sector *Falda Zone* (Atlas), correspondiente a una Dacita porfídica rica en cristales de hornblenda y biotita, con rasgos de reabsorción magmática.

4.1.5.3 Edad

Naranjo y Cornejo (1992) realizan 5 dataciones K-Ar en roca total y alunitas que permiten caracterizar la edad de esta unidad. Estas se distribuyen en el intervalo desde 16,5 a 15,6 Ma. Este conjunto de volcanes es contemporáneo con los productos de la denudación de relieves generados por el alzamiento Andino (Gravas de Atacama) del Mioceno inferior a medio (Naranjo *et al.*, 2013).

4.1.6 Ignimbritas Pajonales

4.1.6.1 Definición

Si bien en el área de estudio, no se ha reconocido en forma detallada esta unidad, Naranjo *et al.* (2013) argumentan que esta unidad corresponde a un conjunto de unidades de flujo ignimbrítico distribuidas en el sector occidental del mapa del área Salar de Pajonales y Cerro Moño. Aunque son notablemente menos extensos que los de las ignimbritas Río Frío, sus afloramientos se han reconocido vastamente sobre el sector. Las Ignimbritas Pajonales sobreyacen a las lavas de los volcanes miocenos, a las ignimbritas Río Frío, y engranan con lavas y estructuras de los volcanes del Mioceno inferior a medio.

Dentro del área de estudio, en el sector denominado Atlas Sur, se reconocen ignimbritas que pueden ser asignadas a esta unidad.

Si bien las relaciones de contacto no permiten definir cuál de las unidades es más antigua, pareciera que la Unidad Volcánica del Mioceno inferior a medio y las Ignimbritas Pajonales son contemporáneas en su formación.

4.1.6.2 Litología y/o petrografía

Hasta ahora no se tienen estudios petrográficos de esta unidad para el área, sin embargo, las observaciones de terreno permiten describir esta unidad como un flujo ignimbrítico de cristales y pómez. Los espesores observados en el área de Atlas Sur no sobrepasan los 5 m y presenta un tono rosáceo y grisáceo, con desarrollo de “*fiammes*” de hasta 8 cm, que son más pequeñas hacia arriba. La matriz incluye líticos accidentales con abundante biotita fresca y anfíboles, y, localmente, presenta alteración argílica supérgena (Ver Fotografía 12).



Fotografía 12. Muestras de afloramientos del sector Atlas Sur, de Unidad Ignimbritas Pajonales.

4.1.6.3 Edad

Dos dataciones radiométricas K-Ar en biotita y roca total, obtenidas por Naranjo y Cornejo (1992) en muestras de las ignimbritas Pajonales, arrojaron edades de 16.0 ± 0.8 Ma y 15.6 ± 2.5 Ma. Adicionalmente, Naranjo *et al.*, (2013) realizaron otros dos análisis $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita, con valores de 16.55 ± 0.05 Ma y 15.6 ± 1.1 Ma, las que confirman las edades previamente obtenidas.

4.1.7 Depósitos aluviales y coluviales modernos.

Se distribuyen a través de toda el área del mapa y corresponden a depósitos heterogéneos de bloques, gravas, arenas y limos producidos por la denudación e incisión de las unidades pre-existentes. En general, no se reconoce estratificación en los componentes más gruesos, pero se detecta con mayor desarrollo en los sedimentos más finos (Naranjo *et al.*, 2013).

Los depósitos aluviales corresponden a materiales que han descendido por quebradas en forma de corrientes de barro o inundaciones de llanos, producidas por lluvias torrenciales, muy esporádicas, generando abanicos aluvionales al extenderse a sectores abiertos no encajonados. Los depósitos coluviales corresponden a materiales producidos, principalmente por procesos gravitacionales. Su distribución está controlada por la presencia de faldeos abruptos de escarpes, quebradas y cerros. Generalmente, son monomícticos y angulosos, gradando lateralmente a depósitos aluviales transportados por flujos

torrenciales, que, en coalescencia, forman llanuras o planicies aluviales (Naranjo *et al.*, 2013).

Los procesos de denudación del paisaje que han formado estos depósitos se han desarrollado desde el Mioceno. Sin embargo, se ha extendido la edad hasta el Cuaternario en consideración a que, localmente, éstos se mantienen activos, aunque en forma disminuida (Naranjo *et al.*, 2013).

4.2 ALTERACIÓN HIDROTHERMAL SECTOR ATLAS

4.2.1 Generalidades

Las asociaciones minerales observadas en el Sector Atlas, permiten indicar que nos encontramos frente a una zona de alteración hidrotermal fuerte, visible incluso desde imágenes satelitales y/o aéreas. Más específicamente, la mineralogía estudiada, puede ser clasificada dentro de un ambiente epidermal de alta sulfuración (Lindgren, 1933; Hedenquist, 1987; Hedenquist *et al.*, 2000; Sillitoe y Hedenquist, 2003).

Dentro del sector Atlas existe una serie de bloques con distintos niveles de exposición, los que pueden ser correlacionados entre sí para generar un modelo empírico. No obstante, existe un sector denominado *Steam Heated Zone* (SHZ) en donde se tiene un bloque completamente preservado en el cual se reconocen todos los tipos de alteraciones asociadas a sistemas epidermales de alta sulfuración, incluyendo, la zona de alta ley de Au.

Debido a la alta presencia de arcillas en el sistema, ha sido necesario utilizar, además de las observaciones en terreno, métodos más cuantitativos. Es por esto que se ha utilizado la espectrometría como herramienta para la detección de los minerales de alteración. En un primer momento, se utilizó el equipo TerraSpec para identificar los minerales de las muestras de superficie y, posteriormente, para los sondajes se enviaron muestras c/20 m a laboratorio ALS en Australia (Ver metodología en Punto 1.4.4). Dentro de este estudio cobra mucha importancia la lectura del tipo de alunita encontrada, ya que nos puede entregar información respecto a la temperatura de formación de ésta y, por ende, podemos conocer cuán cerca estamos de nuestra fuente mineralizadora. En este sentido, es importante obtener el dato de longitud de onda de las alunitas, que representa el rango de absorción que presenta cualquier molécula al ser

sometida al efecto de radiación, en este caso, un haz de luz. Esta longitud de onda se mide en nanómetros y tiene directa relación con la composición química de la molécula analizada. Para el caso de la alunita, el valor de absorción representado por la longitud de onda, está relacionado con la razón $Na/(Na+K)$ (Ver Gráfico 1A). Las variaciones de la composición de las alunitas se ven reflejadas en el desplazamiento del rasgo de absorción ubicado a los 1480 nm desde ~1461 nm en caso de contener el ion amonio (NH_4^+), a ~1478 nm para la alunita, ~1496 nm para la natroalunita y ~1510 nm para las variedades cálcicas (Ver Gráfico 2; Thompson *et al.*, 1999; Hauff, 2005; Chang *et al.*, 2011; Carrasco *et al.*, 2015). Es importante mencionar que el contenido de sodio de las alunitas está relacionado a una mayor temperatura de formación, permitiendo que este rasgo de absorción sea un buen vector para identificar sectores donde la mineralogía se formó a una mayor temperatura (Stoffregen y Cygan, 1990; Chang *et al.*, 2011; Carrasco *et al.*, 2015).

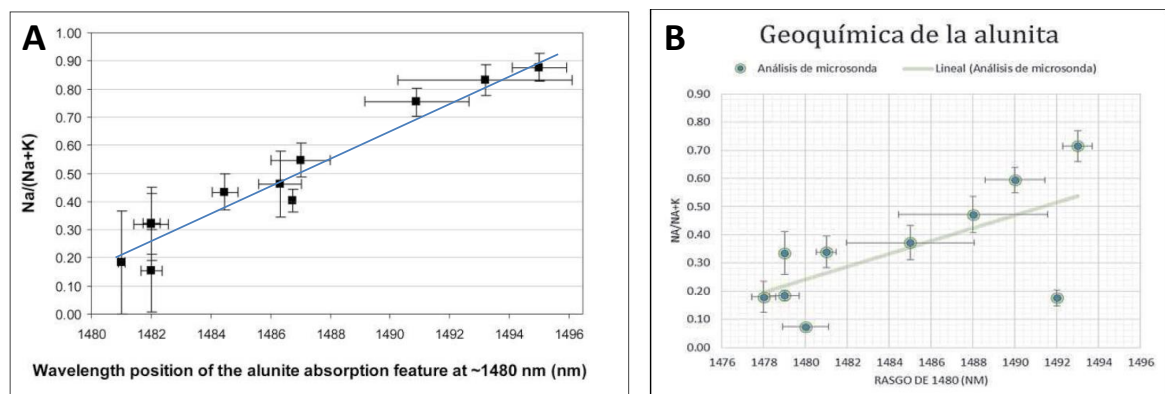


Gráfico 1. Gráficos de relación $Na/(Na+K)$ vs longitud de onda de las alunitas para A) Distrito Mankayan, Luzon, Filipinas (Chang *et al.*, 2011) and B) Distrito Centinela, Chile (Carrasco *et al.*, 2015).

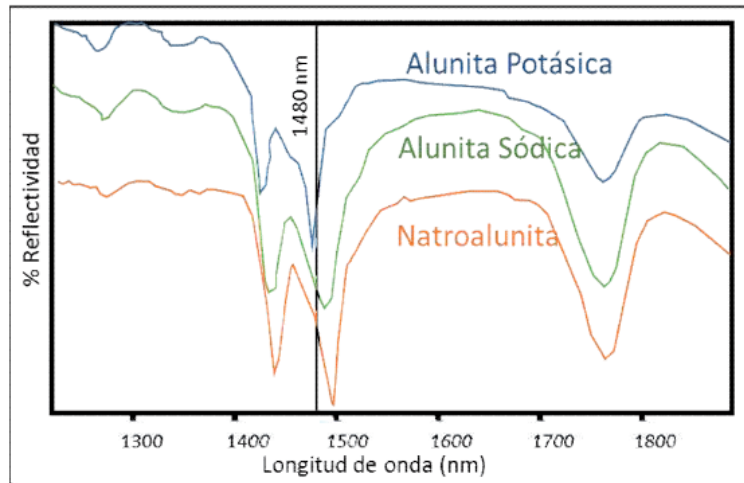


Gráfico 2. Espectros infrarrojos para distintos tipos de alunitas. La línea negra indica la posición de los 1480 nm (Carrasco *et al.*, 2015).

Con toda esta información se pudo crear un modelo empírico que relaciona todas las zonas de alteración como se ve en la Figura 24.

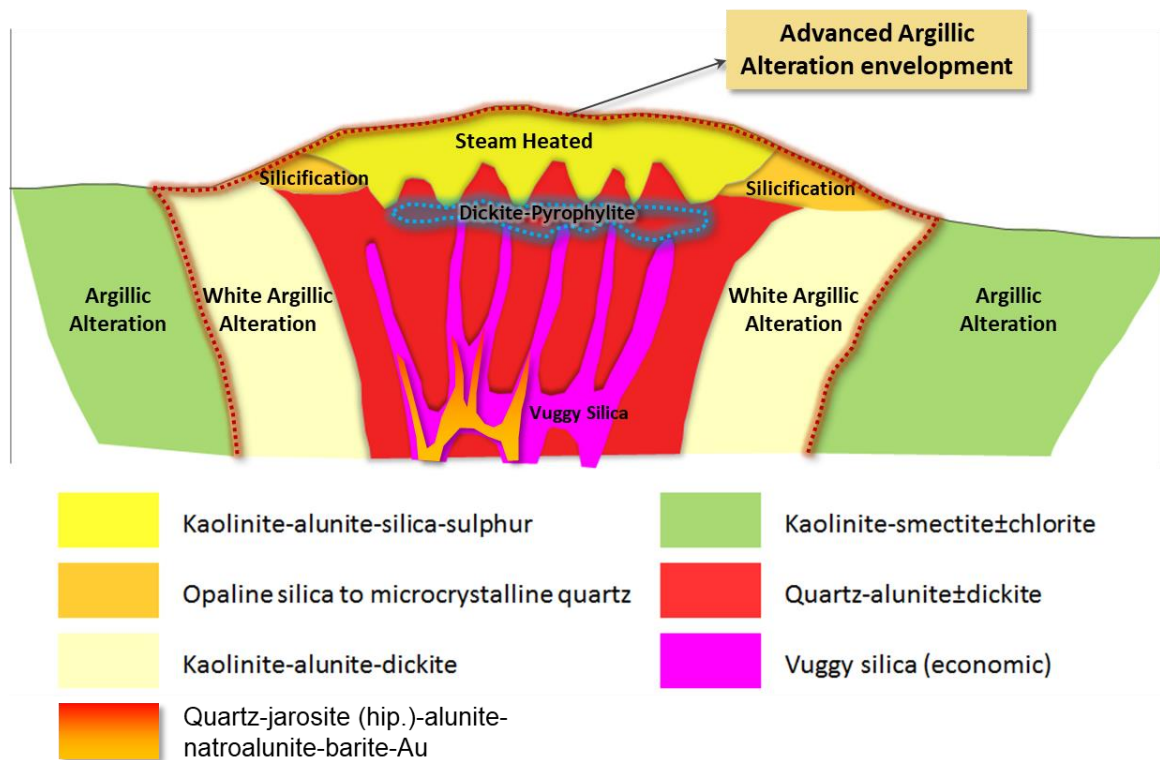


Figura 24. Modelo de alteraciones para Sector Atlas.

Las zonas de alteración definidas para el sector son (Ver Figura 24):

- Alteración tipo *Steam Heated* – Caolinita-Alunita-Sílice-Azufre.
- Silicificación – Sílice opalino-Cuarzo microcristalino.
- Alteración Argílica – Caolinita-Smectita-Clorita.
- Alteración Argílica blanca – Caolinita-Alunita-Dickita.
- Alteración Dickita-Pirofilita.
- Alteración Cuarzo-Alunita-Dickita.
- Alteración *Vuggy Silica* – Cuarzo vuggy-Alunita.
- Alteración “Amarilla” – Cuarzo (*vuggy*)-Jarosita-Alunita-Natroalunita-¿Baritina?

4.2.1.1 Alteración tipo *Steam Heated*

Este tipo de alteración representa la zona de interacción entre el vapor condensado rico en H₂S y agua localizada sobre la denominada zona vadosa que se ubica sobre el nivel de aguas subterráneas. Esta interacción provoca la formación de alteración argílica avanzada, usualmente, bajo condiciones de pH~2-3 (Sillitoe, 2015).



Fotografía 13. Zona de *Steam Heated* en plataforma de sondajes CLATDH0007 y CLATDH0010.



Fotografía 14. Zona de *Steam Heated* con laminación de azufre (ASZ).

Para el Sector de Atlas, esta alteración está presente en superficie en *SHZ*, *Central-East Breccia* y *Atlas Silver Zone*. La asociación mineral viene dada por Caolinita-Alunita-Sílice-Azufre, en donde la principal característica es la presencia de material argílico disgregado (Ver Fotografía 13), a menudo formando especie de capas, en donde es muy difícil reconocer la roca original, debido a que existe un reemplazo casi total. La principal arcilla es la Caolinita, que presenta un color blanco brillante, la alunita muestra longitudes de onda bajas (~1472-1478 nm) por lo que se estima una baja T° de formación (Según la razón $Na/(Na+K)$, los valores de Na son casi nulos, por lo que sería mayormente potásica), con composiciones más potásicas; el sílice es opalino a calcedónico (¿cristobalita?) y aparece en todas las pseudo-capas. Por último, el azufre de color amarillo a amarillo verdoso aparece en forma local y forma laminaciones menores (Ver Fotografía 14). Existen otros tipos de arcillas que aparecen en las lecturas de espectrometría (TerraSpec) como la illita, sin embargo, no representan una importancia mayor.

Otra característica para esta alteración es el alto contenido de elementos volátiles como As (>100 ppm), Hg (>2ppm) y Sb (>15ppm). En esta zona no se observan leyes importantes de Au ni Ag.

4.2.1.2 Silicificación

Este tipo de alteración representa un evento tardío dentro del sistema que se caracteriza por emplazarse hacia el borde de la zona de *steam heated* y como un sellado de fallas reactivadas (*Central-East Breccia*). La principal característica de esta zona es la presencia de sílice de baja temperatura de tipo opalino (Ver Fotografía 15) a calcedónico, prácticamente sin valores anómalos de ningún elemento. En algunos sectores se observa una débil brechización de la roca de caja (Ver Fotografía 16).



Fotografía 15. Afloramiento de sílice opalino en Sector *Central-East Breccia*.



Fotografía 16. Brecha hidrotermal con matriz de sílice calcedónico y clastos de andesita porfídica a 63 m de profundidad en Sector Central-East Breccia (Sondaje CLATDH0019).

Otra característica fundamental de este tipo de alteración es la ausencia total de valores anómalos de Au-Ag y también de elementos volátiles como As, Hg y Sb, por lo tanto, representa una porción tardía y estéril del sistema epitermal.

4.2.1.3 Alteración Argílica (caolinita-smectita-clorita)

Esta zona se posiciona de forma periférica al núcleo de mayor temperatura y está caracterizada por mostrar un tono grisáceo, débilmente, verdoso. Esta alteración está representada por la presencia de la asociación caolinita-smectita-clorita, además, en algunos sondajes, se reconoció por espectrometría (TerraSpec) montmorillonita en forma local.



Fotografía 17. Andesita porfídica con alteración argílica, principalmente, selectiva en plagioclasas, y vetilleo variable de cuarzo calcedónico, *Steam Heated Zone* (Sondaje CLATDH0016, Prof: 110.10 m).

Esta alteración, usualmente, se manifiesta de manera selectiva, afectando en mayor forma a los cristales de plagioclasas (en andesitas porfídicas, ver Fotografía 17) y, en menor medida, a la masa fundamental de las rocas volcánicas.

Este tipo de alteración no representa importancia económica, ya que se encuentra en una posición mucho más distal del núcleo mineralizado.

4.2.1.4 Alteración caolinita-alunita-dickita (Alteración Argílica blanca)

Esta asociación mineral está representada por una argilización de color blanco a gris claro, usualmente, no disgrega la roca y, como se puede ver en la Fotografía 18, en ocasiones es posible reconocer la roca original. Generalmente, de acuerdo al modelo del apartado 4.2.1 (Ver Figura 24) esta alteración afecta a las brechas freatomagmáticas que no alojan *vuggy silica*, sin embargo, una pequeña porción puede afectar a los horizontes volcánicos.

La principal diferencia macroscópica entre este tipo de alteración con la alteración tipo *steam heated* es que esta última oblitera casi en su totalidad la roca original, dando como resultado un agregado semi-consolidado o disgregado, a diferencia de la alteración blanca que puede afectar la roca completa, sin embargo, ésta no pierde su cohesión y se reconocen algunas características de la roca original (Ver Fotografía 18).



Fotografía 18. Brecha freatomagmática con alteración blanca – Caolinita-(Sondaje CLATDH0019).

Esta alteración se caracteriza por la asociación Caolinita-Alunita-Dickita, en donde la alunita muestra valores de longitud de onda (espectrometría por TerraSpec) entre 1475-1481 nm, con valores máximos de hasta 1483 nm. Estos valores indican que la composición de las alunitas según la razón $Na/(Na+K)$, es aún potásica, pero con algunos contenidos sódicos. Si bien es prematuro hablar

de temperaturas sin un estudio más específico, se puede indicar que esta zona muestra temperaturas de formación moderadas.

4.2.1.5 Alteración Dickita-Pirofilita

Este tipo de alteración no se había detectado hasta la llegada de los resultados de espectrometría. Si bien aún se tienen pocos datos, esta asociación aparece en la base de la zona de *Steam Heated* (Ver Figura 24) y representa una zona de mayor T° (300-350°C) de formación (Hemley y Hunt, 1992; Hedenquist y Richards, 1998) en comparación a la zona de *Steam Heated*. En esta misma asociación se reportó la presencia de muscovita, pero no se tienen mayores antecedentes respecto a esta especie, la que podría ser sericita, sin embargo, sólo estudios futuros podrán demostrar estas suposiciones.

Además, también existe presencia muy baja de alunita, pero las longitudes de onda no pasan los 1480 nm, por lo que en general se estima que existe poca cantidad de alunitas potásicas (baja temperatura) y nula de alunitas sódicas.

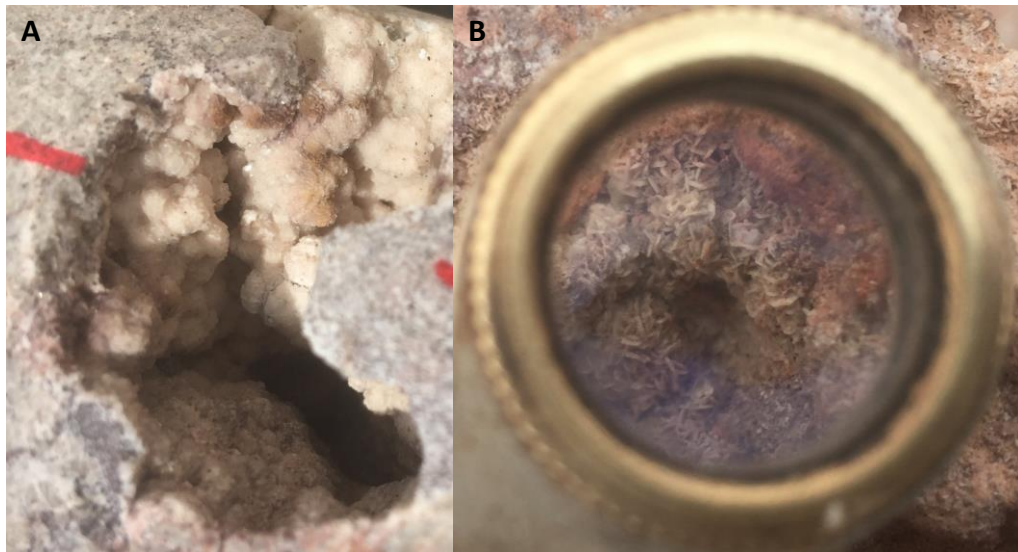
Por otra parte, a pesar que los contenidos de mercurio en la zona de *steam heated* ya son elevados (> 2 ppm), esta zona Dickita-Pirofilita coincide con un brusco aumento en el contenido de Hg (> 10 ppm). Las razones de este aumento aún no se han encontrado, pero macroscópicamente, no se logran ver especies minerales con Hg.

4.2.1.6 Alteración Cuarzo-Alunita-Dickita

Esta asociación mineral tiene una gran importancia dentro del sistema epitermal, ya que es receptora de la mineralización de Au-Ag. La principal característica es tener la asociación cuarzo-alunita-dickita, en donde la alunita es gruesa con tonalidades rosáceas a blancas, es reconocible a simple vista o por medio de lupa con aumento 10x (Ver Fotografía 19), mostrando valores de longitud de onda desde 1480 a 1485 nm (mostrando una mayor temperatura y reflejando una composición potásica-sódica). El cuarzo-sílice se puede presentar de varias formas, normalmente, de forma cristalina, semitranslúcida; sin embargo, también se observa en tonos grisáceos e incluso de un tono pardo a crema, usualmente denominado "*Cream Silica*" o "Sílice parda" (Ver Fotografía

20). Este último tipo de sílice, en otros yacimientos representa las zonas de alta ley, sin embargo, hasta ahora en Atlas, aún no se evidencia una relación directa con la mineralización. Según Cornejo (Com. Oral; Cornejo, 2017B), el *cream silica* representa un intercrecimiento de sílice con rutilo (TiO_2), lo que significa que debe existir una fuente muy caliente y con la suficiente acidez para transportar titanio. Esta observación puede representar una importante guía de exploración, sobre todo, porque entre los 140-300 m del pozo CLATDH0015, se tiene un tramo con importante presencia de *cream silica*.

Si bien esta zona está relacionada con la mineralización, no está directamente asociada con altas leyes. Esta zona se caracteriza por mostrar leyes de Au bajas a estériles (<0.5 g/t Au) y sin presencia importante de Ag.



Fotografía 19. Zona de alteración con cavidades rellenas con alteración cuarzo-alunite (Sondaje CLATDH0015: A) 196.90 m y B) 197.95 m).



Fotografía 20. Zona de alteración Cuarzo-alunita, específicamente con relleno de matriz con *cream silica* (Sondaje CLATDH0015: 141.10 m).

4.2.1.7 Alteración *Vuggy Silica*

Esta alteración representa la asociación cuarzo-alunita (Cuarzo >>alunita), donde la principal característica es la presencia de cuarzo oqueroso o *vuggy silica*, provocado por la lixiviación de la roca original, debido a la acción de fluidos hidrotermales ácidos (pH~2-3). Este tipo de alteración se puede dividir según su importancia en: *Vuggy silica* sin relleno (Usualmente estéril, ver Fotografía 21) y *vuggy silica* con relleno en oquedades (de óxidos de Fe, alunita, sílice, etc.; asociado a zonas con valores de Au<1.5 g/t, ver Fotografía 22).



Fotografía 21. Zona de alteración *vuggy silica* sin relleno (afloramiento sector *Apollo Breccia*).



Fotografía 22. Zona de alteración *vuggy silica* con relleno de alunita y óx. Fe (Sondaje CLATDH0015: 433.55 m, Sector *Steam Heated Zone*).

El estudio petrográfico (microscopio) de la muestra C1703815B evidencia que los rasgos de la textura son porfídicos, que probablemente representan un cuerpo de lava, con siluetas tabulares suborientadas de cristales de plagioclasa (1 a 3 mm), totalmente lixiviadas con cristalitas finos de alunita acicular (0.1-0.2 mm), adosados al borde y dispuestos hacia el centro de la cavidad, que es un rasgo característico de los procesos de "*vuggy silica*".

Los relictos de minerales máficos son más pequeños (1 a 1.5 mm) y parecen corresponder en su mayoría a anfíboles oscuros, reemplazados totalmente por cuarzo fino con alunita entre material residual con limonitas y óxidos de titanio inmóviles. En la periferia, aparecen relictos de titanomagnetita (0.2-0.5 mm) oxidados, donde aún se preservan inclusiones de zircones magmáticos y apatito.

La masa fundamental de la roca está pervasivamente reemplazada por un agregado micrométrico de cuarzo (0.01 a 0.03 mm), con alunita y abundantes partículas oscuras que corresponden a limonitas de color terroso y diversos

óxidos de titanio amorfos de color castaño y, también, se observan limonitas hematíticas rojizas.

4.2.1.8 Alteración cuarzo-jarosita-alunita-natroalunita-baritina (Alteración “Amarilla”)

Esta alteración fue reconocida en la última campaña de sondajes, en donde los sondajes CLATDH0015 y CLATDH0016 (Ver fotografías 23 y 24) interceptaron esta asociación compuesta por cuarzo-jarosita-alunita-natroalunita y, posiblemente, baritina (Ver fotografías 23 y 24). El estudio petrográfico y calcográfico muestra principalmente, la asociación cuarzo-alunita-jarosita, en donde ésta última, por ser tan cristalina, se infiere que puede ser de origen hipógeno. Esto último, explicaría la forma de emplazamiento de estas brechas como un último evento de mineralización. Con respecto a la natroalunita (Cornejo, 2017B), esta es una especie altamente sódica y que, inicialmente, fue confundida con baritina, no obstante, aún se cree que existe presencia de baritina, pero en cantidades menores. La importancia de este tipo de alteración es que está directamente relacionada con las altas leyes de Au (hasta 5 g/t en SHZ) y valores moderados de Ag (hasta 26 g/t en SHZ). Todo indica que esta alteración representa un evento posterior que corta todos los demás y que trae una alta concentración de Au.

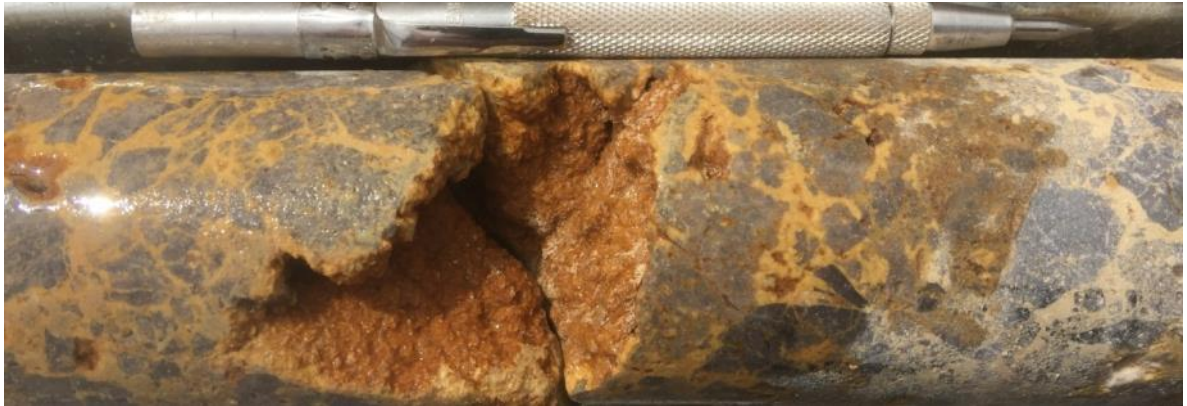
Con respecto a la alunita y natroalunita, la espectroscopía muestra un contenido sódico con valores de longitud de onda de 1485 a 1493 nm, por lo tanto, indican una formación a alta temperatura. Usualmente, se observa alunita gruesa, con tonalidades rosáceas a blancas.



Fotografía 23. Zona de alteración *amarilla* con clastos de *vuggy silica* y matriz de alunita-jarosita (Sondaje CLATDH0015: 400 m)

Existen cavidades importantes (Ver Fotografía 24) que usualmente están rellenas con alunita y, en menor medida, de natroalunita (\pm baritina)

semitranslúcida de tono pardo. Estas cavidades usualmente están relacionadas a la presencia de Au en el sistema.



Fotografía 24. Zona de alteración *amarilla* con clastos de sílice y matriz de alunita, jarosita, natroalunita y menor baritina (Sondaje CLATDH0015: 420.80 m).

4.3 MINERALIZACIÓN Y TIPO DE DEPÓSITO SECTOR ATLAS

Durante las campañas anteriores, tanto los levantamientos geológicos de superficie como las campañas de sondajes, entregaron algunos antecedentes respecto al tipo y forma de la mineralización que se tenía en Atlas y Titán. Lo primero es afirmar que la alteración y mineralización presente en el sector permite ratificar un depósito epitermal de alta sulfuración (*HS*), faltando dilucidar si la mineralización permitirá tener un depósito económico.

La segunda campaña de mapeo de superficie y de sondajes realizada entre octubre de 2016 a mayo de 2017, permitió definir de manera más detallada los modelos tanto de superficie como en 3D. El sector de *Steam Heated Zone* (SHZ), debe corresponder a un bloque preservado, lo que ha permitido entender en forma casi íntegra el comportamiento del sistema epitermal, desde la zona de *steam heated* estéril hasta las brechas de alta ley.

La Figura 24 muestra el modelo de alteraciones para el sector y la Figura 25 muestra un esquema litológico de cómo se distribuye la mineralización en el sector *Steam Heated Zone* (Ver Figura 2) que representa la zona que contiene la columna completa del depósito. En ambas figuras se puede observar la importancia de las brechas y de la alteración cuarzo-alunita. Con respecto a las brechas, los cuerpos freatomagmáticos representan la roca de caja ideal, por

tener la componente fragmental idónea que tiene la porosidad necesaria para recibir la mineralización. Con respecto a la alteración cuarzo-alunita, ésta nos marca la cercanía al núcleo mineralizador de alta T° y bajo pH representado por la presencia de alunitas potásico-sódicas (longitudes de onda entre 1.480-1.485) e íntegramente sódicas con longitudes de onda entre 1485 a 1493 nm.

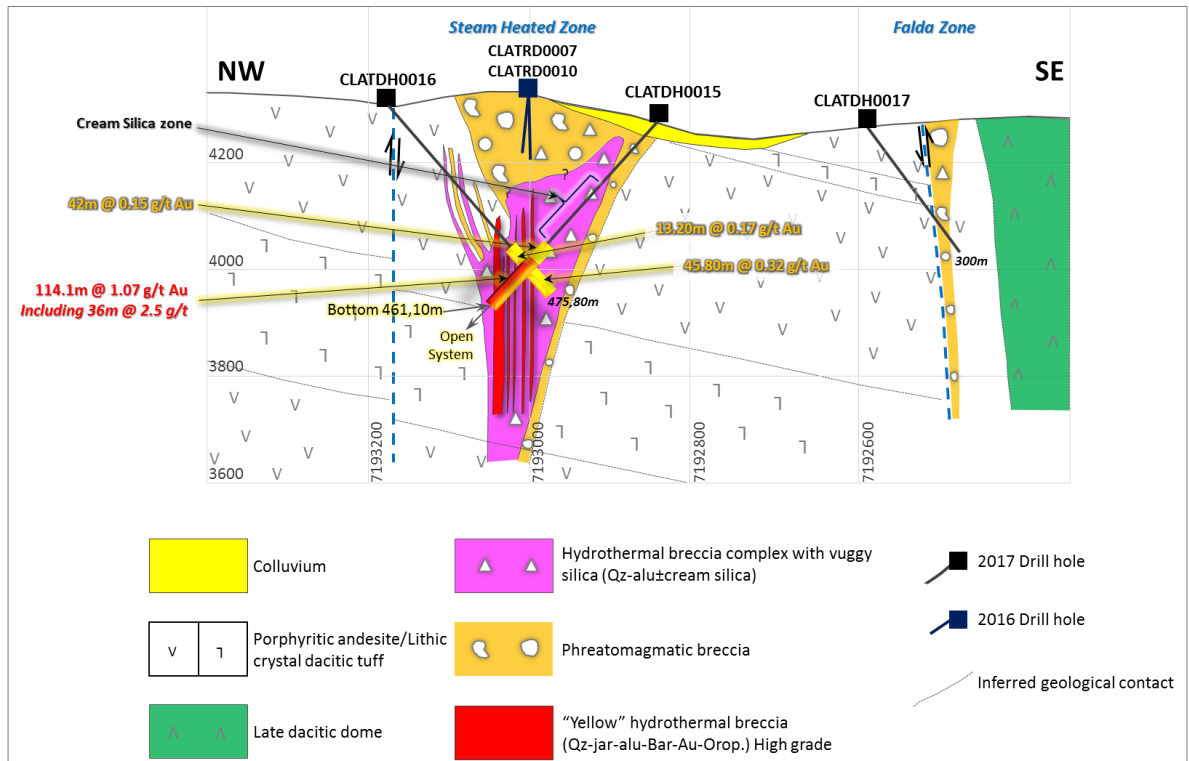


Figura 25. Sección esquemática para el sector *Steam Heated Zone* (Sector Atlas).

Cuando se tiene esta unión de elementos (Brecha + alteración qz-alunita) estamos en presencia de un sistema epitermal en donde es posible que exista mineralización económica. Además, durante la última campaña de sondajes, específicamente los sondajes CLATDH0015 y CLATDH0016, permitieron encontrar la alteración “amarilla”, que hasta ahora no estaba reconocida, que contiene la asociación cuarzo-jarosita-alunita-natroalunita-¿baritina?, que está entregando la mayor ley de Au en el sistema (Hasta 5 g/t). La Fotografía 25 muestra la presencia de oro visible, alojado en las cavidades mencionadas en apartado 4.2.1.8. Estudios calcográficos reconocen, además, trazas de electrum en la zona mineralizada. En la Fotografía 25 se puede ver un buen mecanismo para aumentar la ley en el sistema, ya que el Au se aloja en los clivajes de la natroalunita y baritina semitranslúcida, al igual como se ha visto en otros

depósitos del Distrito El Indio. Existe otro tipo de baritina de tono blanquecino, pero de aspecto lechoso (Ver Fotografía 26), que usualmente, está en niveles similares, pero más alejada de los núcleos mineralizados (normalmente, estéril).

La Figura 26 muestra la forma en que se produjo la mineralización del sector Atlas, en donde los fluidos calientes y ácidos (HCl y SO₂) provenientes de una fuente magmática migran hasta interactuar con el nivel de agua freática, en donde formarán ácido sulfúrico capaz de lixiviar prácticamente toda la roca original dejando una textura oquerosa, denominada *vuggy silica* (Sillitoe, 1993; Hedenquist *et al.*, 2000). Posteriormente, el CO₂ y H₂S (vapor hervido) se condensan en la zona vadosa (sobre el nivel de agua) generando sílice opalino, caolinita y alunita; dando origen a lo que denominamos *Steam Heated* (Ver apartado 4.2.1.1).

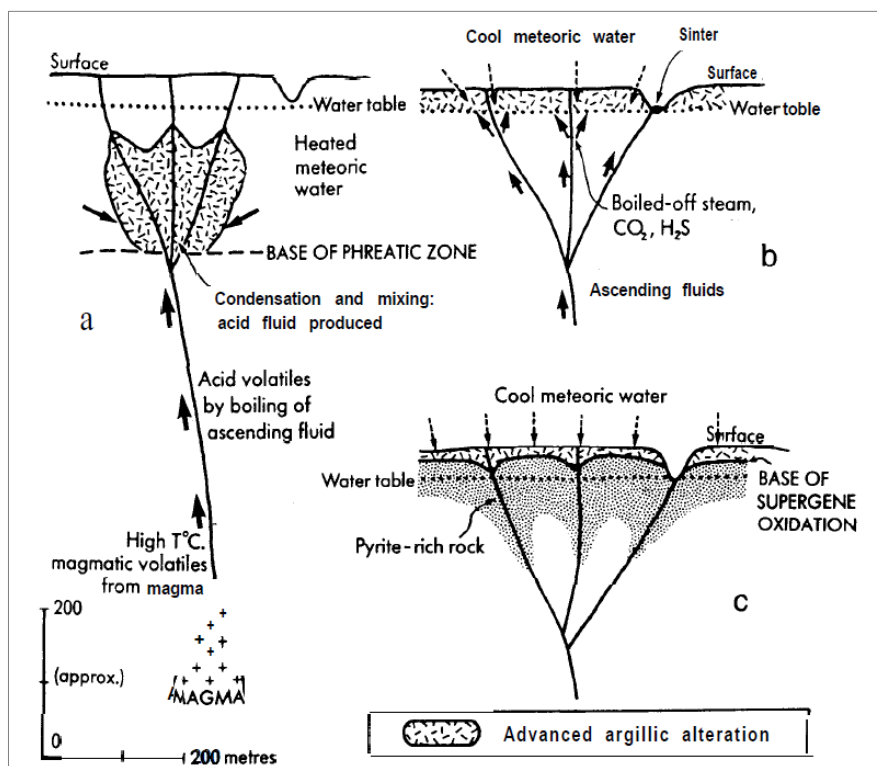
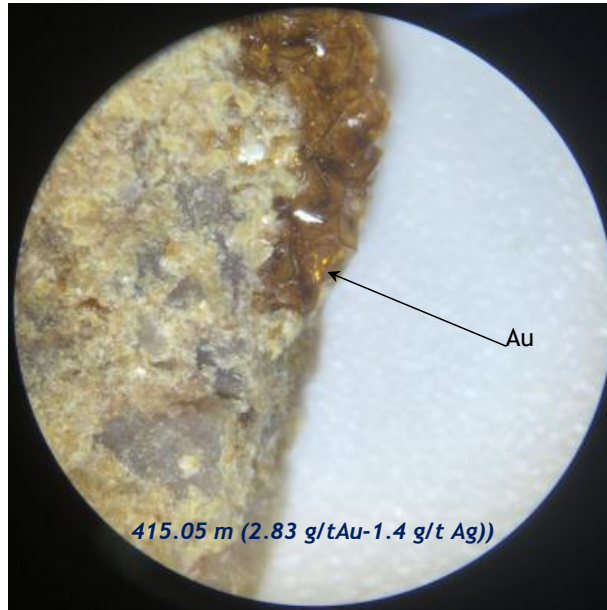


Figura 26. Ilustración esquemática del ambiente de formación de los tres tipos de fluidos ácidos: hipógenos, *steam-heated* y supérgenos (Schoen *et al.*, 1974; Giggenbach, 1992; Sillitoe, 1993). En a) la acidez deriva del ascenso y enfriamiento de HCl y SO₂, éste último ha sido condensado en agua y ha formado ácido sulfúrico. En b) la acidez deriva de la oxidación de H₂S gaseoso que se condensa dentro de la zona vadosa. En contraste, en c) la acidez deriva de la oxidación post-hidrotermal de pirita dentro de la zona vadosa (Sillitoe, 1993).



Fotografía 25. Zona de alteración *amarilla* con oro visible en clivaje de baritina (Pozo CLATDH0015: 415.05 m)



Fotografía 26. Afloramiento de estructura rellena con cristales de baritina blanquecina de aspecto lechoso con relleno de cavidades por Óx. Fe y Mn (*Sector Atlas Gold Zone*).

Si bien aún falta por conocer mejor la naturaleza de esta alteración “amarilla” (sobre todo lo que respecta a la jarosita hipógena), preliminarmente, se

puede señalar que ésta se emplaza en la zona de *vuggy silica*, bajo el nivel 4080, siendo la brecha freatomagmática una excelente roca de caja; al contrario de la andesita, tal como se observa en el pozo CLATDH0016, en donde esta alteración alcanza los niveles andesíticos sin producir mineralización de interés.

Cabe señalar que los estudios calcográficos realizados en la brecha de *Steam Heated Zone* en Atlas, muestran trazas de otras especies minerales como titanomagnetita (¿Fuente del rutilo?), rutilo (no en *cream silica*), enargita, electrum y silvanita, los cuales, en la actualidad, no representan una importancia en las definiciones de la mineralización.

Si bien el estudio se basa, mayormente, en el estudio del comportamiento del Au, cabe destacar que también existen zonas con valores de Ag; sin embargo, se produce una relación inversamente proporcional entre ambos elementos, cuando aumenta el Au, la Ag es baja y cuando aumenta la Ag, prácticamente, desaparece el Au. Los sectores de AGZ, Apollo Breccia y la periferia de SHZ son zonas con marcado contenido de Ag (Hasta 300 g/t en Apollo Breccia), las que según los estudios calcográficos estarían relacionadas a la presencia de minerales argentíferos como silvanita y electrum (Reconocidos por calcografía).

En cuanto a la edad de mineralización, los antecedentes que se tienen son los siguientes:

- 21.1±0.9 Ma, método K-Ar en alunita (Naranjo y Cornejo, 1992), Sector Portezuelo (Atlas, ver figuras 40 y 85).
- 18.1±0.8 Ma, método K-Ar en alunita (Naranjo y Cornejo, 1992), Sector *Atlas Gold Zone* (Atlas, ver figuras 40 y 85).
- 19.86 ± 0.04 Ma, método ^{40}Ar - ^{39}Ar en alunita (Ross, 2014A), Sector *Atlas Gold Zone* (Atlas, ver figuras 40 y 85).
- 17.08 ±0.79 Ma, método ^{40}Ar - ^{39}Ar en alunita (Ross, 2014B), Sector Titán (Ver figuras 3 y 7).

La mineralización de los sectores Atlas y Titán, se encuentran relacionados, directamente, a la presencia de alunita, por lo que la edad estimada para ambos, está en el rango 21.1-17.08 Ma. Esta mineralización es correlacionable con el Distrito La Coipa, en donde se tiene una edad entre 20-16 Ma para los eventos epitermales con una edad del *steam heated blanket* de (20-19 Ma) (Gamonal, 2015). Además, existe otro evento magmático-hidrotermal dentro del Distrito Casale, representado por el clúster de pórfidos Au-Cu Eva-Román-Águila con rango de 20-17 Ma (Cáceres, 2015).

CAPÍTULO V: INTERPRETACIÓN DE DATOS Y MODELO 3D

5.1 Generalidades

Durante los trabajos para definir *targets* de exploración, principalmente, en el Sector Atlas, se han utilizado una serie de herramientas que acompañadas de la geología clásica (Mapas litológicos de afloramientos, de alteraciones y estructuras) han servido para acotar los blancos y entender cómo se ha desarrollado el sistema epitermal.

Los principales elementos utilizados en esta investigación son la geoquímica de elementos trazas más que Au-Ag, geofísica existente (IP resistividad y cargabilidad) y espectrometría (uso de TerraSpec) que nos ha permitido identificar las arcillas y conocer, cuando ha sido posible, si estamos en niveles más someros o más profundos del sistema.

Todos los antecedentes recopilados con estas herramientas y el conocimiento adquirido, se han llevado a plantas y secciones geológicas, y, posteriormente, a un modelo 3D de manera que pueda ser utilizado en otras zonas dentro del distrito. Para llevar a cabo este trabajo se ha utilizado el software *ArcGis 10.4.1* (Esri) y el complemento de *Target 3D* (Geosoft).

5.2 Interpretación Geoquímica

Si bien los trabajos de modelamiento geoquímico en depósitos epitermales de alta sulfuración son escasos, en la Figura 27 se presenta un modelo empírico que muestra la transición desde un ambiente de pórfido Cu, hasta el ambiente epitermal con alteración argílica avanzada. En este modelo se puede ver la distribución de las alteraciones y el *footprint* de metales (elementos) que mejor representa cada nivel del sistema. Si bien este modelo está realizado para ambientes epitermales con desarrollo de lithocaps (Sillitoe, 1995), el modelo se puede aplicar al ambiente epitermal HS, donde el Au-Ag-Cu se ubican centrales a los núcleos mineralizadores, los volátiles como Hg, As y Sb están más y mejor desarrollados en la zona de *Steam heated* y el Pb se encuentra con valores altos (>100 ppm) a mayor temperatura.

De acuerdo a todas estas observaciones se realizó una interpretación de las diferentes anomalías de Au, Hg, Sb y Pb con muestras de superficie (rocas, *floats* y suelos) del Sector Atlas (ver detalle de sectores en Figura 2), ya que

fueron estos elementos trazas los que mostraron un mejor y más razonable comportamiento dentro del sistema.

Geoquímica del Au

En este caso, la Figura 28 muestra un set de cinco anomalías, separadas entre las de primer orden (> 1 ppm en rocas y *floats*; y >0.075 ppm en suelos) y segundo orden (entre 0.1 a 1 ppm en rocas y *floats*; y entre 0.05 a 0.075 ppm en suelos). En la misma figura se puede ver que la anomalía de primer orden se encuentra, íntegramente, en el sector de *Atlas Gold Zone (AGZ)* en donde se tiene un grupo de trincheras con brechas de cuarzo-alunita en andesitas. Inmediatamente, al norte, en la misma anomalía se tiene el sector de *Phoenix Breccia* donde continúan los valores altos de Au.

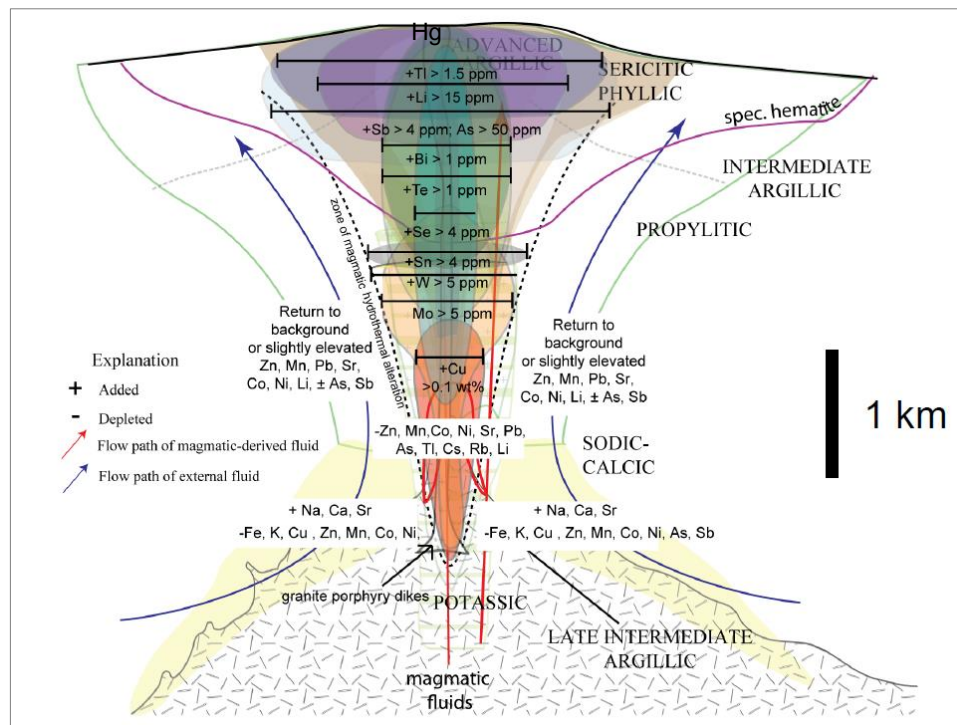


Figura 27. Zonación vertical de un sistema hidrotermal desde pórfido a epitermal, mostrando distribución de alteraciones y *footprint* de metales (Modificado de Halley *et al.*, 2015).

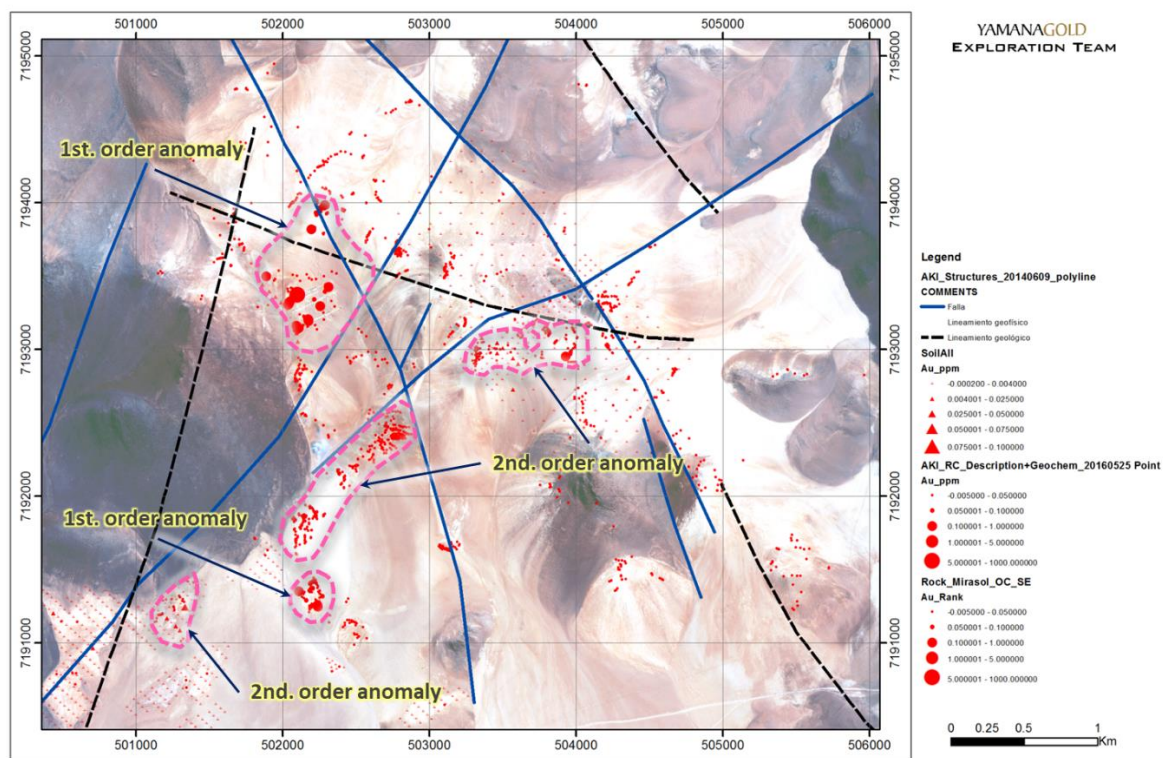


Figura 28. Mapa con muestras geoquímicas de Au para el Sector Atlas.

Las anomalías de segundo orden se encuentran alineadas a la estructura principal NE (Traza de Falla Vaquillas) de SW a NE viene desde *Pampa Zone*, pasa por *Atlas Silver Zone (ASZ)*, sigue por *Apollo Breccia* y llega a *Steam Heated Zone (SHZ)*. Estas anomalías se encuentran asociadas a la zona de *steam heated* como en SHZ y a *vuggy silica* sin relleno como en *Apollo Breccia*. Casi todas estas zonas ya fueron perforadas y, en general, muestran que en AGZ se está más cerca de los núcleos mineralizados y la zona alineada a la falla NE está en una posición más distal de la mineralización.

Geoquímica del Hg

El mercurio, históricamente, ha sido, en general, descartado de los elementos *pathfinders* en las etapas de exploración, ante todo por la alta movilidad que tiene; sin embargo, en los últimos dos descubrimientos de Au realizados en Chile: *Alturas (Barrick Gold)* y *Salares Norte (Goldfields)*, se tuvo, desde los inicios una excelente correlación entre Au y Hg, lo que sirvió como una poderosa herramienta en los descubrimientos finales. Se debe tener especial cuidado con el uso de los datos en este aspecto, porque existen anomalías

definidas para otro tipo de depósitos que si se aplicaran en este no mostrarían nada relevante.

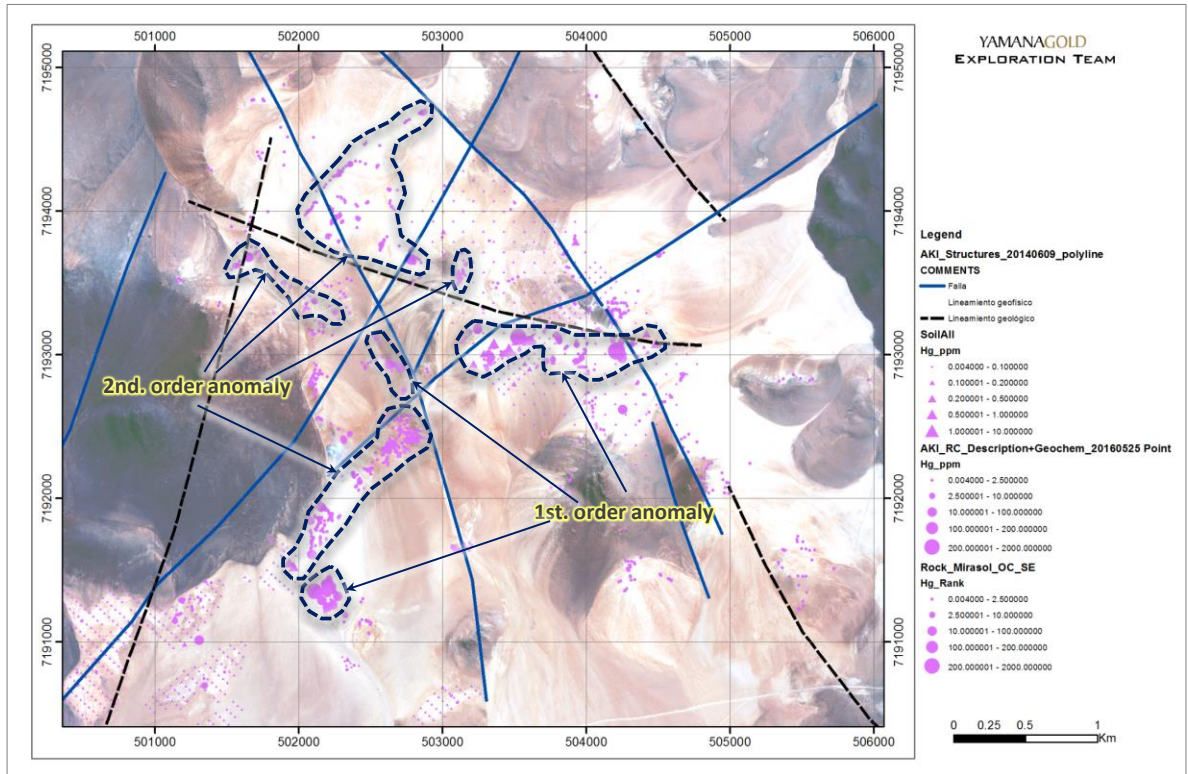


Figura 29. Mapa con muestras geoquímicas de Hg para el Sector Atlas.

En la Figura 29 se observan dos tipos de anomalías, las de primer y segundo orden. Las de primer orden vienen dadas por valores >10 ppm en rocas y *floats*; y >1 ppm para suelos. Las anomalías de segundo orden se definen según los valores entre 2.5 a 10 ppm en rocas y *floats*; y entre 0.5 y 1 ppm para suelos. En este caso, es bueno mencionar que valores de $Hg > 10$ ppm podrían ser catalogados como muy altos en otros depósitos (ej. *Low sulphidation*), sin embargo, en este depósito EHS con valores de hasta 2000 ppm, resultan ser moderado-altos.

Las anomalías de primer orden están muy relacionadas a las zonas mayores y más pequeñas con alteración tipo *steam heated*, mientras que las de segundo orden se encuentran bien marcadas entre la zona de *ASZ-Apollo Breccia*; y menos evidentes en *AGZ-Phoenix Breccia*.

Preliminarmente, podríamos señalar que los altos contenidos de Hg se encuentran en una zona distal a la mineralización (*steam heated*), y los valores moderados-altos están más cerca de los núcleos mineralizados; sin embargo, más adelante, en el punto de Modelo 3D integrado para Atlas veremos que esta idea muestra ciertas variaciones en profundidad.

Geoquímica del Sb

En la Figura 30 se pueden observar las anomalías de Sb para el Sector Atlas, en donde las anomalías de primer orden son aquellas con valores > 50 ppm en rocas y *floats*; mientras que las anomalías de segundo orden se encuentran entre los valores de 20 a 50 ppm para rocas y *floats*.

En el modelo geoquímico de la Figura 27 se observa que el Sb aparece en el ambiente epitermal con concentraciones de interés en la parte baja de la zona argílica avanzada.

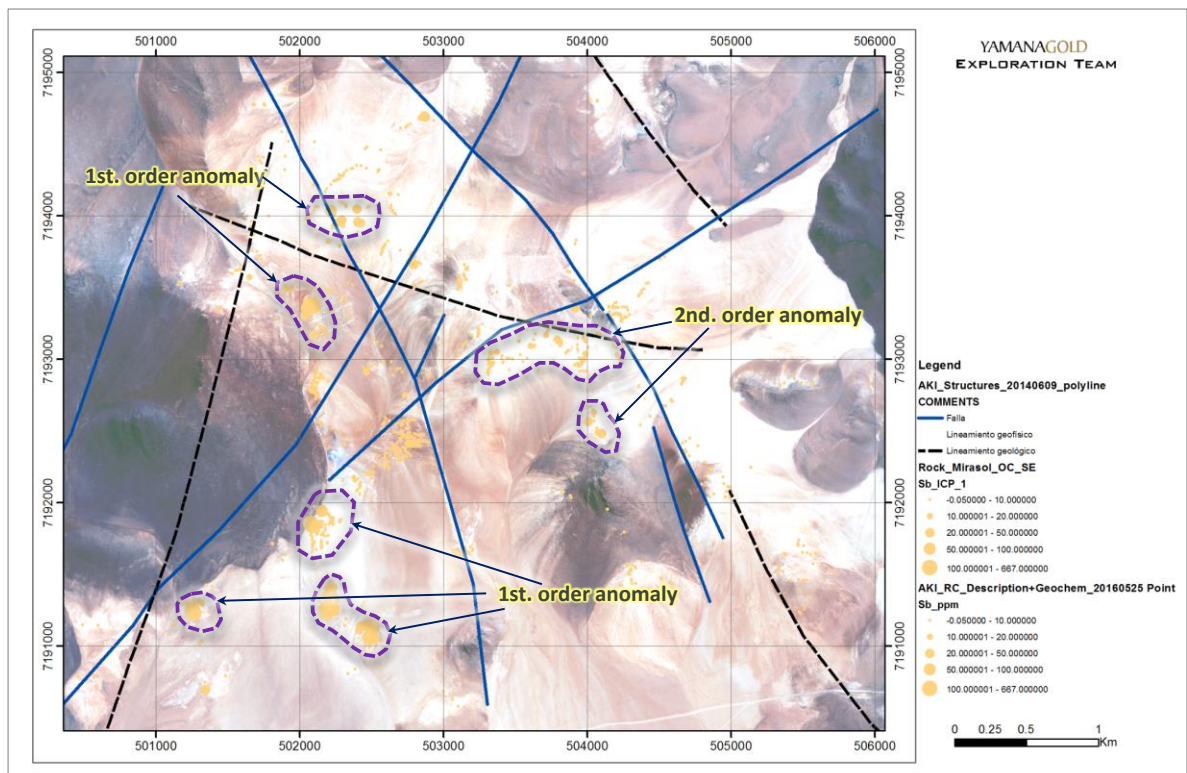


Figura 30. Mapa con muestras geoquímicas de Sb para el Sector Atlas.

Por otra parte, el Hg se observa con mayores concentraciones hacia el techo del sistema. En ambos casos, se observa, en general, una relación

inversamente proporcional entre ambos elementos, por lo tanto, en las anomalías de primer orden de Hg tenemos anomalías de segundo orden de Sb; y en las anomalías de primer orden de Sb, tenemos anomalías de segundo orden de Hg. Esta relación coincide con el modelo visto en la Figura 27, por lo que en los sectores de AGZ y ASZ estaríamos en niveles más profundos del sistema y, en el sector de SHZ estamos en niveles superiores del sistema epitermal, lo que se puede corroborar geológicamente.

Geoquímica del Pb

El comportamiento del Pb en los sistemas hidrotermales, en general, indica mayor profundidad a medida que aumenta el contenido y, en caso de los pórfidos, muestra envoltentes alrededor de los núcleos mineralizados (Ver Figura 27).

Para el caso de Atlas, se ha visto una buena correlación entre el Pb y el complejo de brechas, sin importar si tiene alta o baja concentración de Au-Ag, es decir, se observa una buena correspondencia con el sistema hidrotermal.

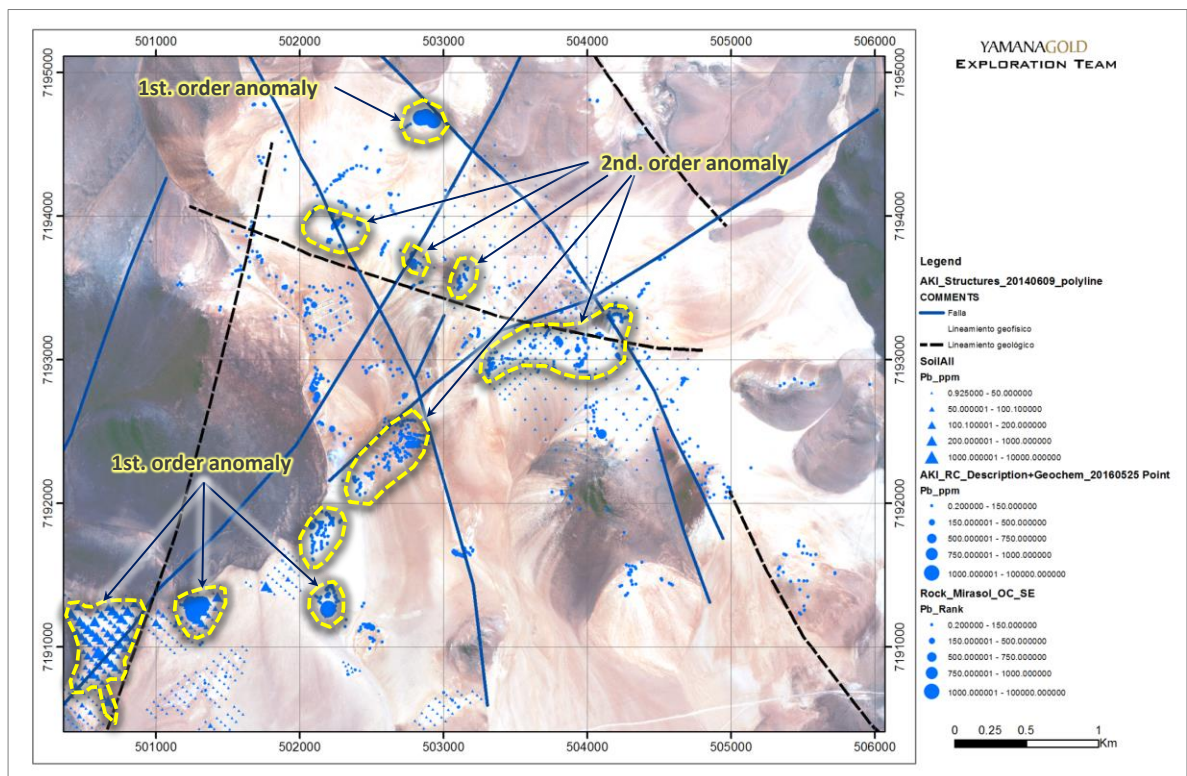


Figura 31. Mapa con muestras geoquímicas de Pb para el Sector Atlas.

Las anomalías que se ven en la Figura 31 se dividen en anomalías de primer orden, con contenidos > 500 ppm en rocas y *floats*, y > 200 ppm en suelos; y las anomalías de segundo orden se encuentran entre los valores 150-500 ppm para rocas y *floats*; y entre 50-150 ppm para suelos.

En general, todas las anomalías se encuentran bastante alineadas a las fallas y lineamientos NE y NW. Las anomalías de primer orden se encuentran tanto en el extremo norte como en el extremo SW, mostrando un nivel más profundo del sistema, el que se puede explicar por una posición más baja, debido a que ambos sectores se encuentran en cotas más bajas del área. La zona de *steam heated* se correlaciona bien con anomalías de segundo orden. Además, Cornejo (*Com. oral*) indica que el Pb puede ingresar en la estructura interna de algunos tipos de alunitas, esto falta ser documentado en un futuro.

5.3 Interpretación de espectrometría (TerraSpec)

En los apartados 1.4.4 y 4.2.1 de este trabajo, se trata en forma preliminar, la teoría y metodología de la espectrometría; y la aplicación como herramienta de exploración en sistemas epitermales ricos en arcillas, respectivamente.

Como se ha mencionado anteriormente, el instrumento TerraSpec sirve para medir la ocurrencia relativa de los minerales de alteración que sean capaces de reflejar y refractar la luz transmitida. Debido a esto es que este instrumento tiene su mejor aplicación en la detección de arcillas, y con la literatura que se dispone hoy en día, se puede correlacionar la temperatura de formación de cada especie mineralógica y por ende la profundidad de formación dentro del sistema hidrotermal.

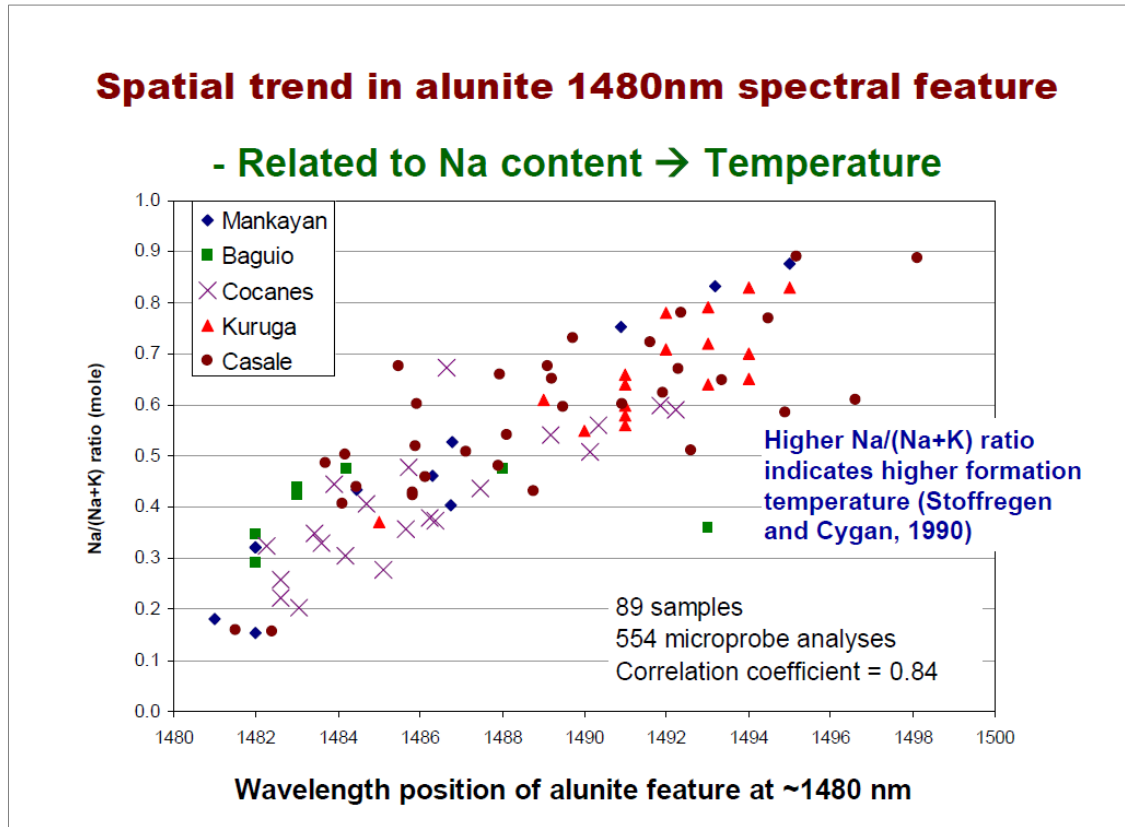


Gráfico 3. Correlación entre razón $Na/(Na+K)$ y longitud de onda de alunitas (Stoffregen y Cygan, 1990; Chang *et al.*, 2011).

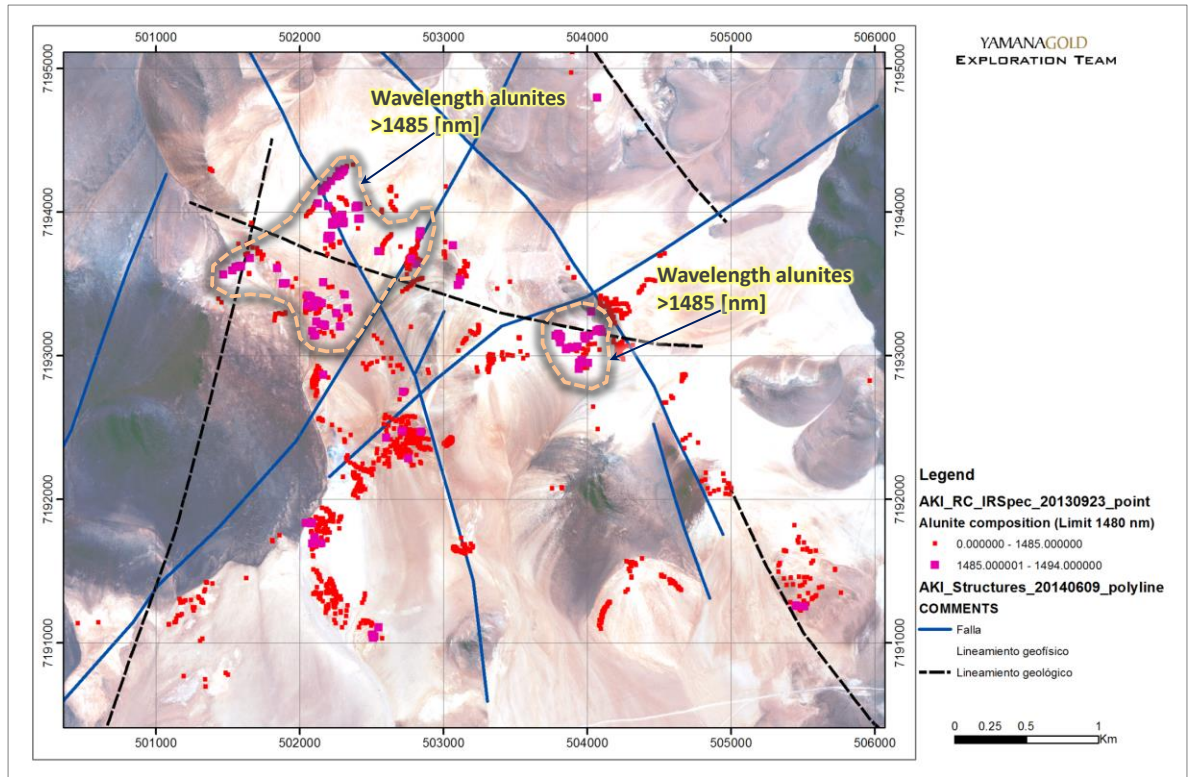


Figura 32. Mapa con lecturas de longitudes de onda (nm) para alunitas en el Sector Atlas.

En el Gráfico 3 se puede ver la relación directa entre la razón $Na/(Na+K)$ y las longitudes de onda de las alunitas. Desde este punto de vista, cuando la razón se hace menor, por lo tanto, más potásica ($<1,480$ nm), se estima una temperatura de formación menor; mientras que cuando la razón se hace mayor, se estima una composición más sódica ($>1,480$ nm) y, por ende, una temperatura de formación mayor (Stoffregen y Cygan, 1990). Este último grupo, las alunitas formadas a altas temperaturas están asociadas a los núcleos mineralizadores de alta ley de Au-Ag en los depósitos epitermales de alta sulfuración.

Para el caso de Atlas, tenemos la comparación de los resultados del pozo CLATDH0015 (Gráfico 4), en donde se observa una correlación directa entre las altas leyes de Au-Ag, con las altas longitudes de onda de alunitas. Es así como entre los 300 a 400 m se tienen inyecciones intermitentes de alunita de alta T° , lo que se correlaciona con las leyes de ese tramo, en donde existen contenidos erráticos de Au y Ag. Por otra parte, a partir de los 400 m, comienza un ascenso paulatino en la longitud de onda de alunitas hasta alcanzar el *peak* 1,493 nm.

Desde los 400 hasta los 461.10 m se tienen las más altas leyes, manteniendo una continuidad en el tramo.

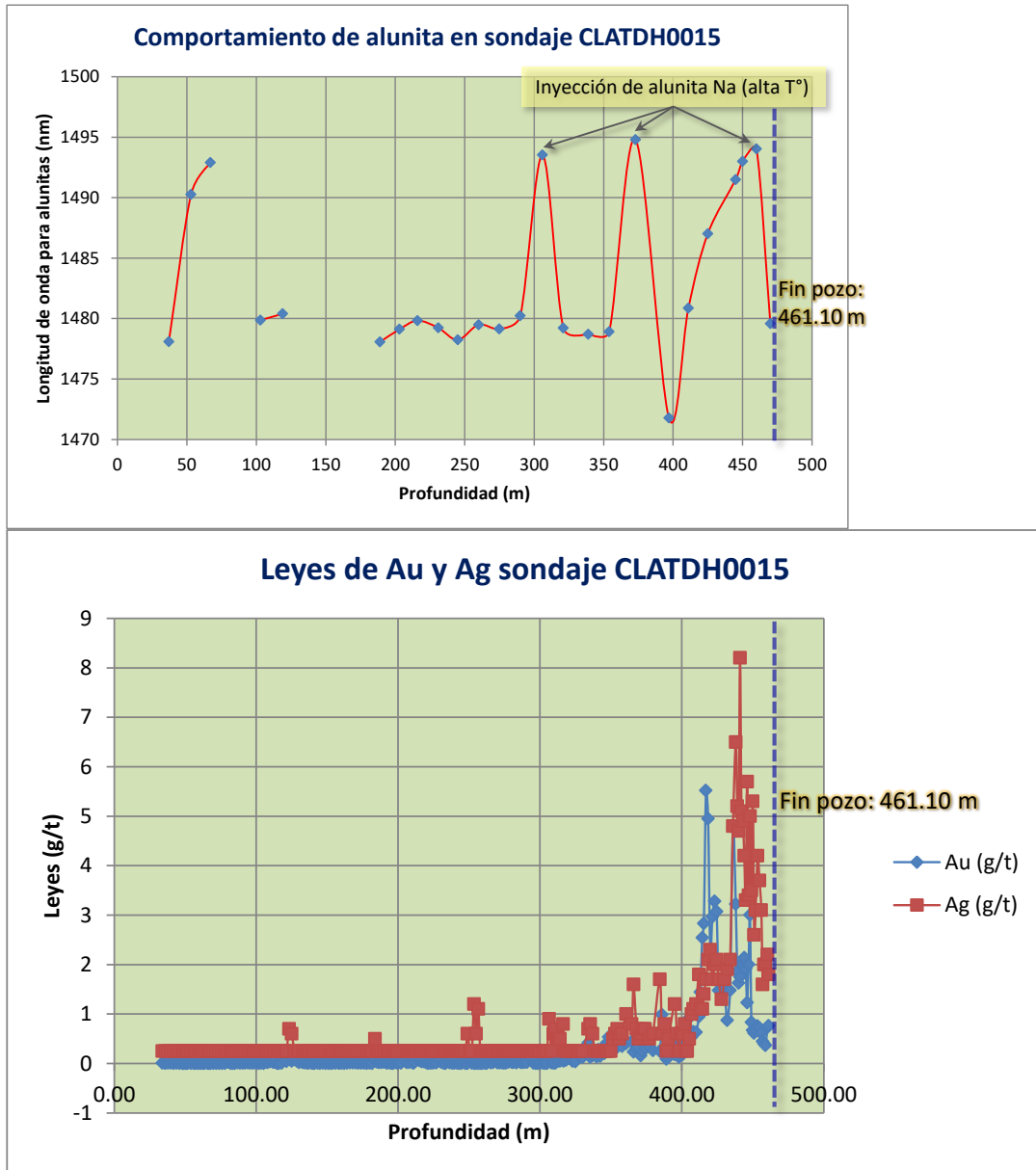


Gráfico 4. Correlación entre gráficos de longitud de onda para alunitas (arriba) y leyes de Au-Ag para pozo CLATDH0015 (*Steam Heated Zone*).

Con toda esta explicación, se confeccionó el mapa de la Figura 32, en el cual se plotearon todas las muestras de superficie con valores de longitudes de

onda de alunitas. La separación se hizo con tramos $< 1,485$ nm y $>1,485$, entregando como resultado dos zonas de interés con alunitas de alta temperatura: el bloque formado por la zona entre *Atlas Gold Zone* y *Phoenix Breccia*; y la zona NE de *Steam Heated Zone*. En ambos casos existen altas posibilidades de encontrar una mineralización como la encontrada en el pozo CLATDH0015, sin embargo, es esperable que ésta se encuentre a menor profundidad (a unos 100 m).

5.4 Modelo 3D Integrado

La integración de los datos de litología, alteración, geoquímica, espectrometría y geofísica han permitido generar modelos en plantas, sin embargo, con la perforación de sondajes RC y DDH en las dos campañas realizadas en el sector, se logró integrar desde el punto de vista tridimensional toda la información.

Para trabajar en 3D se utilizó el software *TARGET for ARCGIS* de Geosoft, el que permite realizar y desplegar modelos de bloque rápidos (llamados *voxels*) para visualizar las características de cada herramienta utilizada. La técnica utilizada para generar los *voxels*, fue una variografía simple en base a los sondajes.

En la Figura 33 se observan los valores de Au y los polígonos del *steam heated* (principalmente, en brecha) más el complejo de brecha mayormente con alteración cuarzo-alunita. La idea con las siguientes figuras es conocer la relación espacial entre las diferentes características trabajadas en tres dimensiones. En este caso, las herramientas que se utilizaron debido a la mejor correlación fueron: Modelo bloques de Au, Modelo de bloques de Hg, Modelo de bloques de Pb, despliegue de longitud de onda de alunitas (c/20m) y modelo 3D de resistividad.

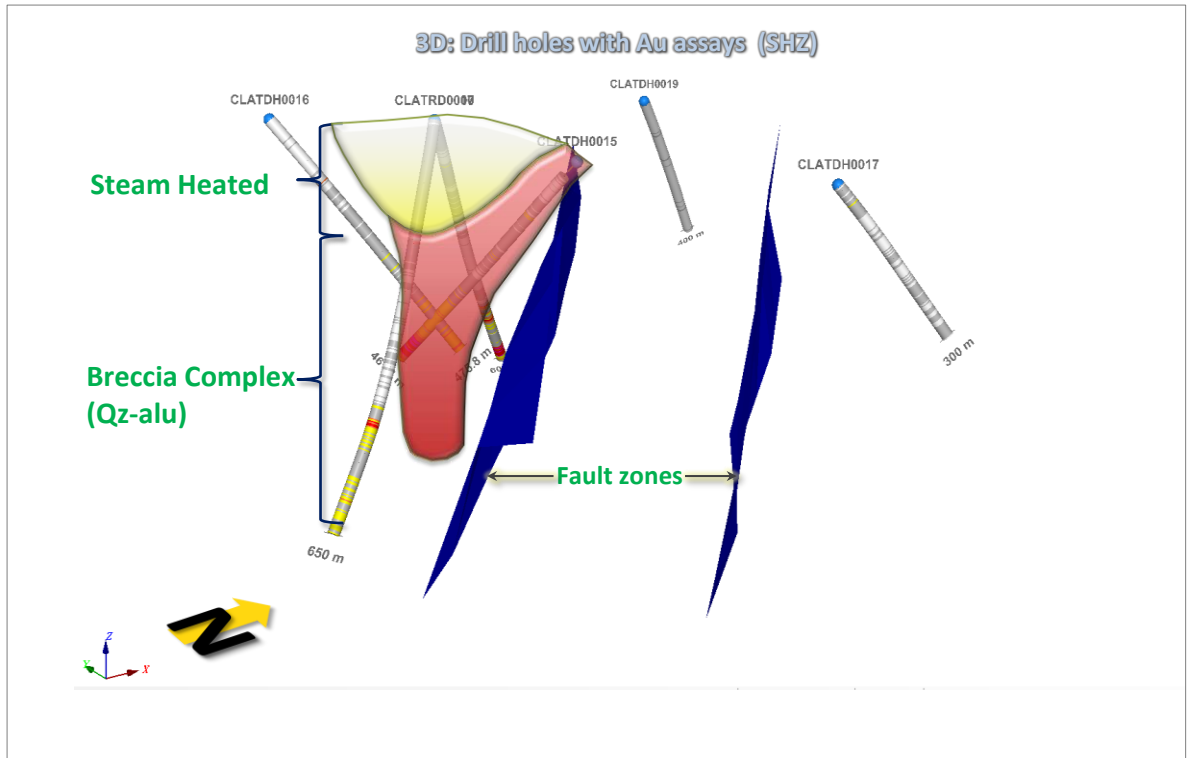


Figura 33. Vista 3D del sector *Steam Heated Zone* (Atlas) mostrado leyes de Au de sondajes y litologías.

Con respecto al Au (Figura 34), aunque pareciera muy prematuro entregar modelos con apenas 4 sondajes, el modelo de bloques preliminar está mostrando una tendencia N40-45°E. Con lo poco que se conoce aún del cuerpo de brecha mineralizado, se puede estimar unas dimensiones de 650 m de largo por 120 m de ancho y 250 m de altura. Esta dirección mencionada seguiría los patrones estructurales vistos en superficie.

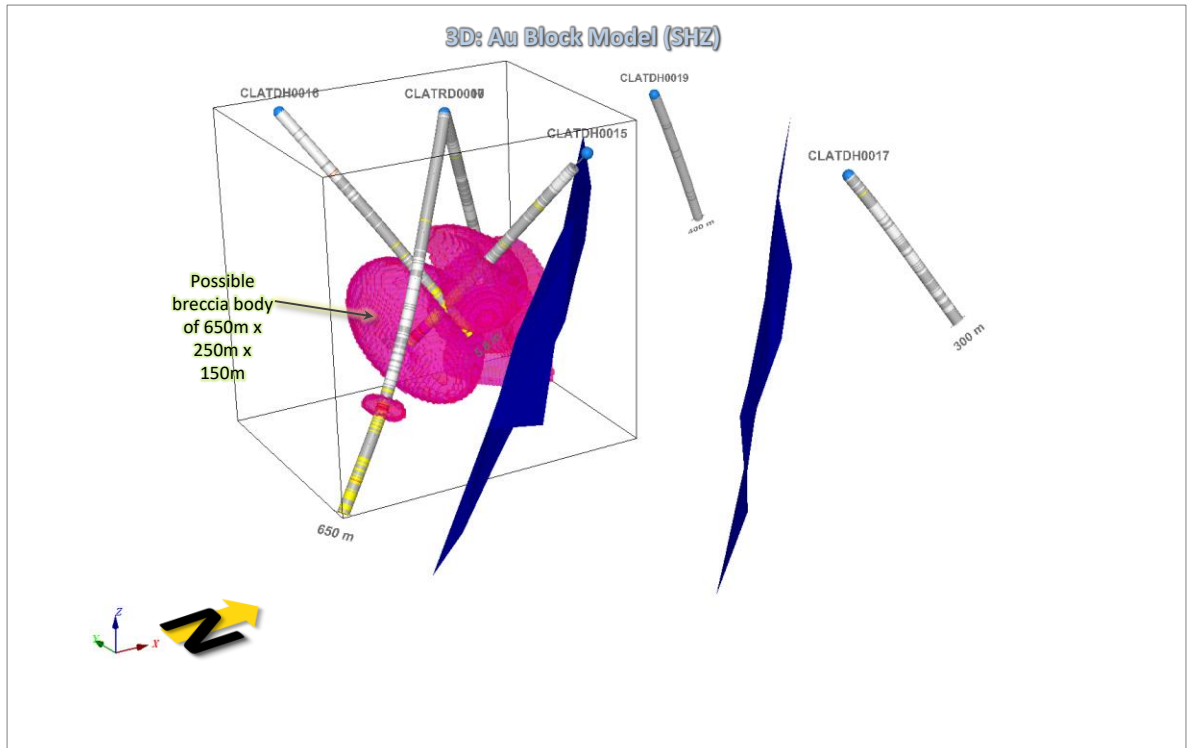


Figura 34. Vista 3D del sector *Steam Heated Zone* (Atlas) mostrando leyes de Au de sondajes y modelo de bloques preliminar de Au (Voxel).

Por otra parte, como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, el Hg ha cobrado mayor relevancia en los últimos descubrimientos de los Depósitos Alturas (Barrick, 2017; Astorga *et al.*, 2017) y Salares Norte (Azevedo *et al.*, 2015). En el caso de *Steam Heated Zone* en Atlas (Ver Figura 33), se observan dos anomalías importantes mayores a 2 ppm. La primera se encuentra en la mitad inferior de la zona de alteración tipo *Steam Heated* (Ver figuras 33 y 35), mientras que la segunda está directamente relacionada a la zona de altas leyes en las brechas “*amarillas*” descritas con anterioridad. Para el segundo caso, es muy probable que estemos frente a algún mineral con importante cantidad de Hg (bloques incluso >10 ppm). Esto se conocerá más adelante, ya que se está a la espera de los resultados de estudios calcográficos.

Otro elemento que ha cobrado una gran relevancia dentro de las interpretaciones hechas en Atlas, es el Pb. Al comparar las figuras 33 y 36, podemos ver que el Pb no muestra correlación con la zona de alteración tipo *steam heated*, sin embargo, muestra una excelente correlación con el complejo

de brechas con alteración cuarzo-alunita. En efecto, los valores más altos de Pb, también se correlacionan bien con las altas leyes de Au en las denominadas Brechas "amarillas".

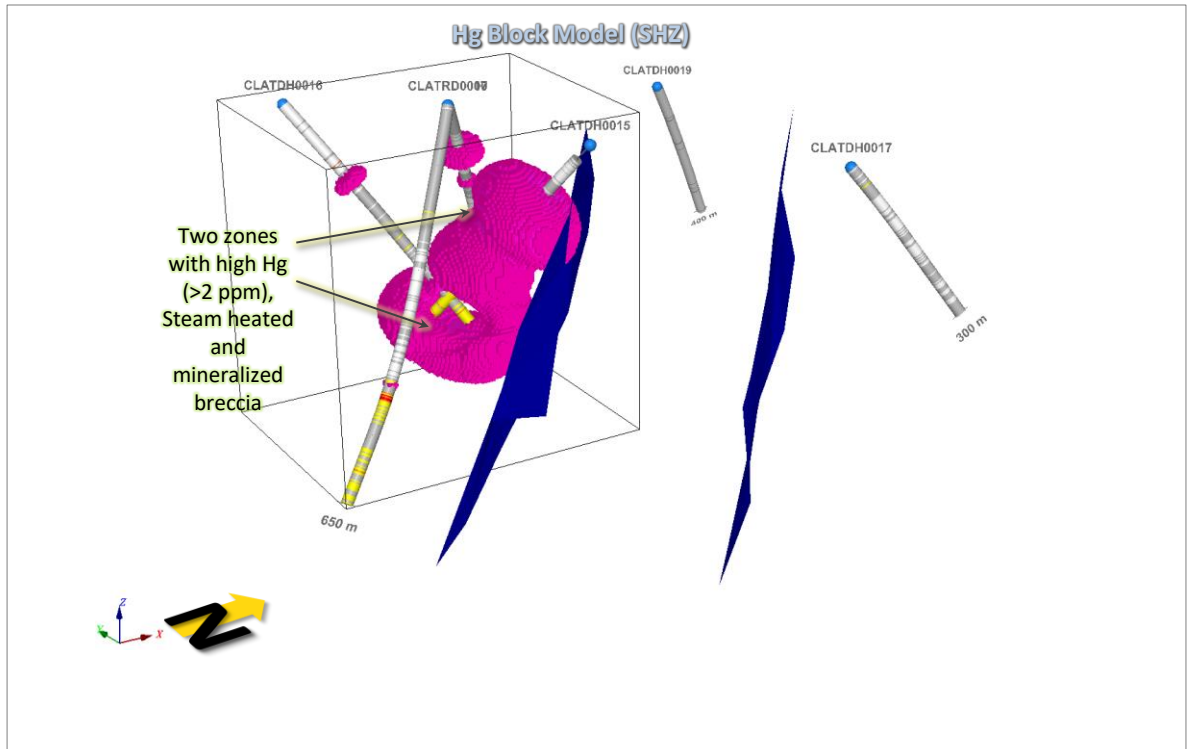


Figura 35. Vista 3D del sector *Steam Heated Zone* (Atlas) mostrando leyes de Au de sondajes y modelo de bloques preliminar de Hg (Voxel).

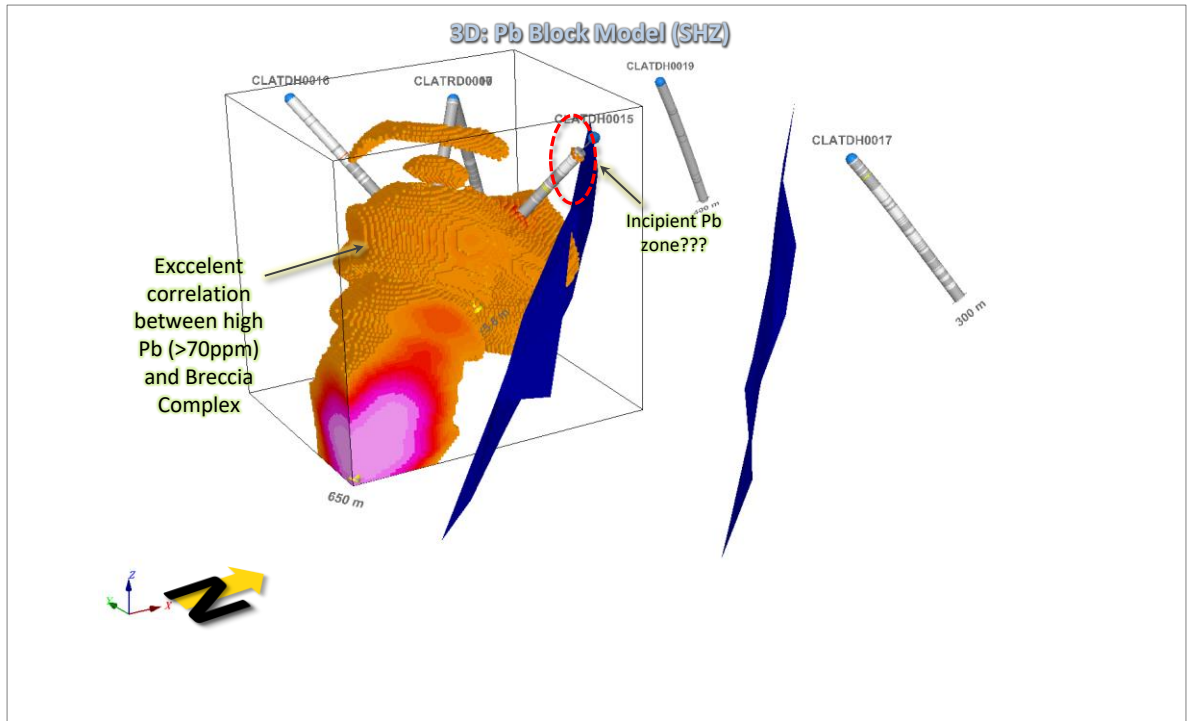


Figura 36. Vista 3D del sector *Steam Heated Zone* (Atlas) mostrando leyes de Au de sondajes y modelo de bloques preliminar de Pb (Voxel).

Al observar las figuras 33 y 36, se logra identificar una excelente correlación entre casi todo el cuerpo de brecha con alteración cuarzo-alunita y los bloques de Pb > 70 ppm. Se puede suponer que el Pb resulta un gran "mapeador" del cuerpo de brecha (Freatomagmáticas e hidrotermales), ya que prácticamente desaparecen las anomalías en las lavas andesíticas.

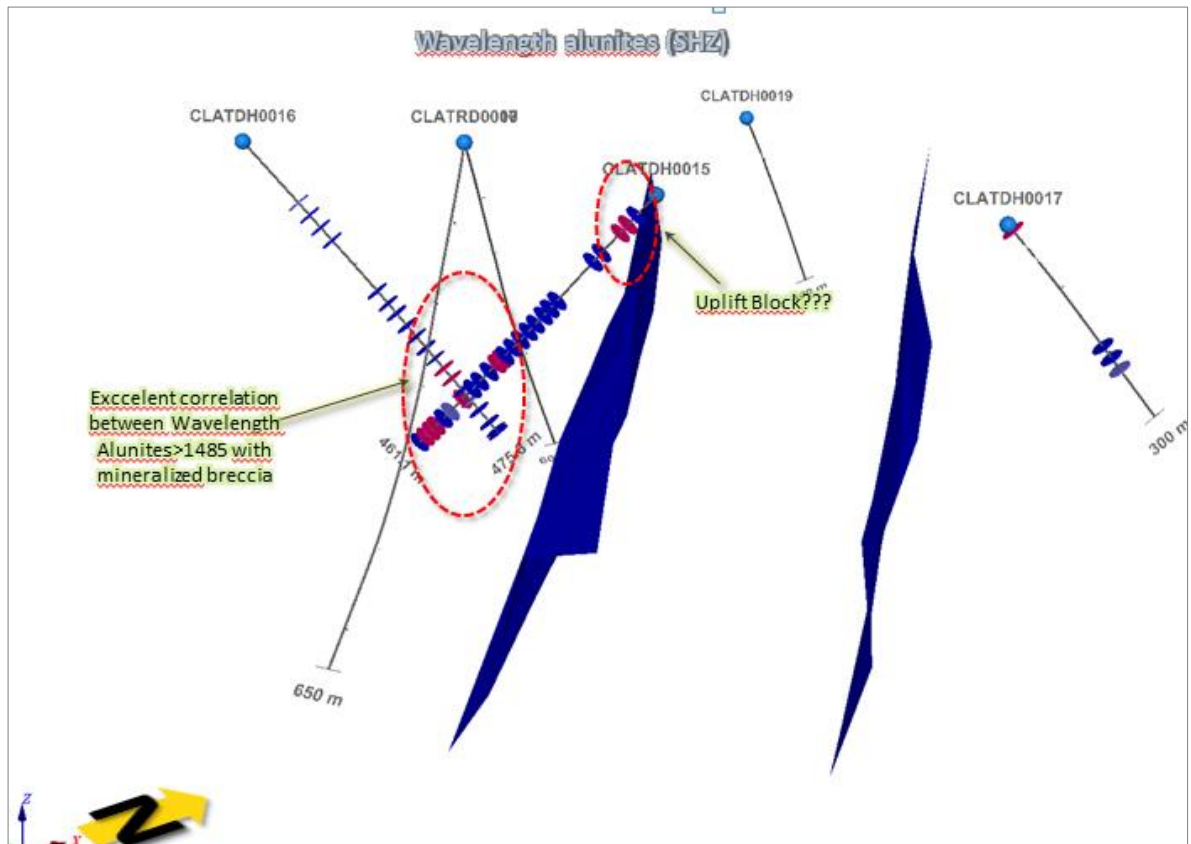


Figura 37. Vista 3D del sector *Steam Heated Zone* (Atlas) mostrando leyes de Au de sondajes y valores de longitud de onda para alunitas ($c/20$ m).

Una de las características más mencionadas en este informe es la importancia de reconocer las alunitas y su composición, utilizando espectrometría (TerraSpec) para ello. En el caso de la Figura 37, se puede ver la distribución de las alunitas en los sondajes CLATDH0015 y CLATDH0016. La principal característica observada es que las alunitas con longitudes de onda > 1485 nm (de composición sódica) de alta T° de formación, están correlacionadas con la mineralización de Au-Ag (Ver figuras 33 y 37). Además, en la parte alta del pozo CLATDH0015, se logra observar una zona con alunitas sódicas, las que están relacionadas a la zona de falla modelada. Esto permite suponer que existe una posibilidad de tener mineralización más somera, en un bloque alzado, hacia el NE.

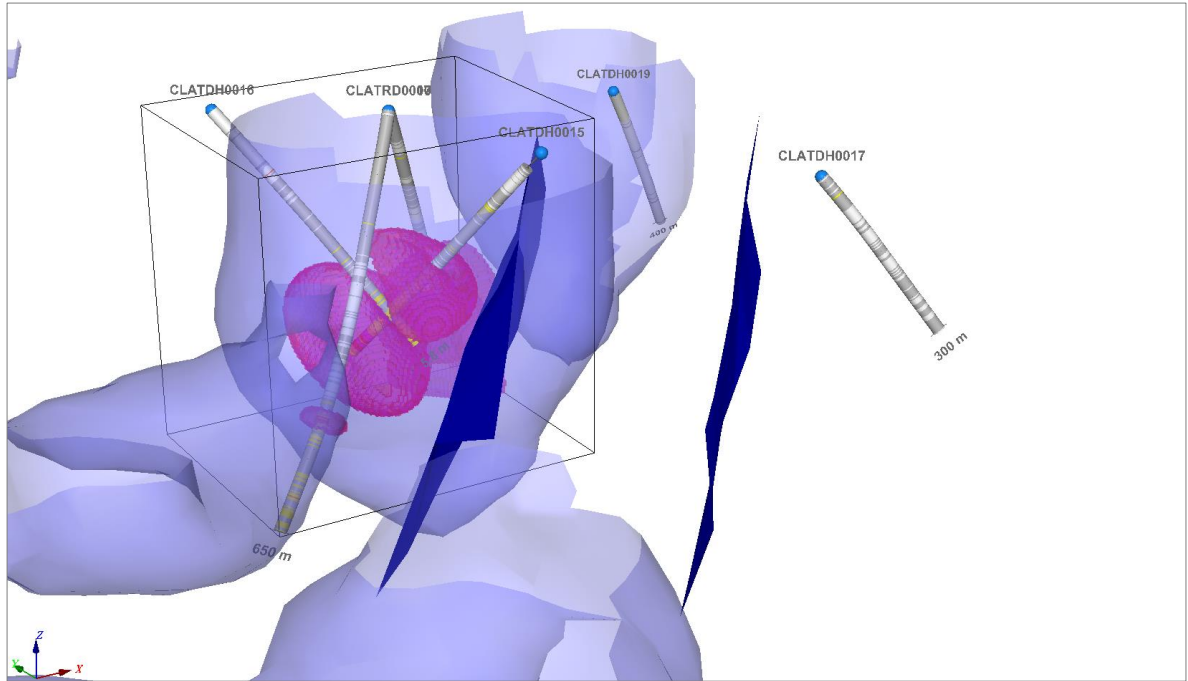


Figura 38. Vista 3D del sector *Steam Heated Zone* (Atlas) mostrado leyes de Au de sondajes, modelo de bloques de Au (Voxel) y modelo 3D de anomalías IP resistivas.

Por último, los sólidos modelados en la Figura 35, corresponden a las anomalías de altos resistivos obtenidas de la geofísica de IP. Como se puede ver, la envolvente mayor se correlaciona bastante bien con toda la zona de alteración, incluyendo el complejo de brechas de *Steam Heated Zone*.

El uso de todas estas características en 3D, ha permitido crear un modelo que puede ser replicado en otros sectores del área, con el fin de definir *targets* con mineralización mucho más cercana a la superficie.

CAPÍTULO VI: GEOCRONOLOGÍA

6.1 Generalidades

Las edades obtenidas para la franja miocena de Chile se pueden dividir en dos grupos: las realizadas durante las décadas de 1980 y 1990's, usando el método K-Ar; y las dataciones realizadas a partir del año 2000 usando el método ^{40}Ar - ^{39}Ar . En ambos casos, los métodos se han aplicado a varias especies minerales, siendo el uso en alunita hipógena el mejor indicador de la edad de mineralización de un depósito epitermal de alta sulfuración (EHS).

Este método salió a la luz en Berkeley en el laboratorio de John Reynolds (Merrihue y Turner, 1966), pero fue sobre todo el producto del trabajo de Grenville Turner (1968) en la Universidad de Sheffield en Inglaterra. En resumen: primero se irradia la muestra de prueba por una corriente de neutrones. Una reacción nuclear transforma los ^{39}K en ^{39}Ar . Esta es una reacción neutrón-protón (n, p). Una vez realizada esta operación, la muestra de prueba es calentada por etapas de temperatura y se mide la relación $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ en cada paso o etapa (Figura 39).

Naturalmente, al mismo tiempo que la muestra estudiada, se irradia otra muestra de control que contiene una cantidad conocida de K cuyo contenido de ^{39}Ar debe analizarse. La relación $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ es equivalente a una relación de $^{40}\text{Ar} / ^{40}\text{K}$ y así se le puede aplicar la fórmula de datación. Por lo tanto, obtenemos un rango de edades (aparentes) que dependen de la temperatura de desgasificación (Allègre, 2008).

La idea que sustenta el método es que, como el ^{40}Ar se difunde fácilmente, se filtra de los sitios cristalográficos más vulnerables (usualmente, los bordes del cristal) en el transcurso del tiempo geológico, pero se ha mantenido en los sitios más resistentes (usualmente, centro del cristal). Mediante el calentamiento paso a paso, se expulsa sucesivamente las fracciones de argón ubicadas en sitios cada vez más retentivos, y, finalmente, se consigue desde sitios "cerrados" (Allègre, 2008).

Por último, se obtiene un gráfico en el cual se logra observar una tendencia denominada "*Plateau*" (Ver Figura 39), la cual indica la mejor edad en que el sistema hizo cristalizar el mineral estudiado. Sin embargo, los resultados siempre deben ser analizados desde el punto de vista geológico, ya que, a menudo, existen errores, contaminaciones del sistema y reapertura del sistema por recalentamiento de la roca.

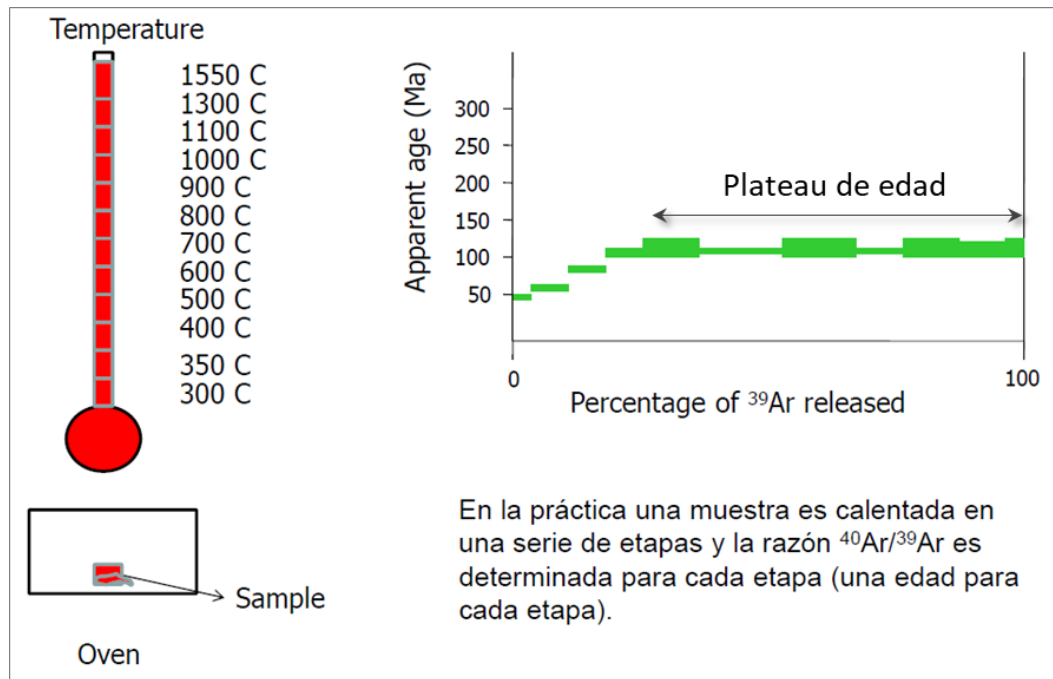


Figura 39. Ejemplo de las etapas de calentamiento a la que es sometida una muestra mineral.

Por otra parte, a partir de un mismo estudio se puede obtener una relación entre $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ y $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$, con lo que se obtendrá un gráfico con puntos que deben estar alineados. Estos puntos formarán una línea recta en donde se obtiene la relación:

$$t = (1/\lambda) * \ln [(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}) * J + 1]$$

Donde:

t= vida media

λ = decaimiento total de ^{40}K

J= parámetro calculado

Casi todas las variables se miden durante todo el proceso de calentamiento de las muestras. Los valores de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se mide con espectrómetro de masas y el parámetro J puede ser determinado irradiando una muestra de edad conocida junta con otra de edad desconocida (Faure, 1986).

Este método se llama Isócrona Inversa y la condición es que el espectro de edades asume que el Ar no-radiogénico es de composición atmosférica.

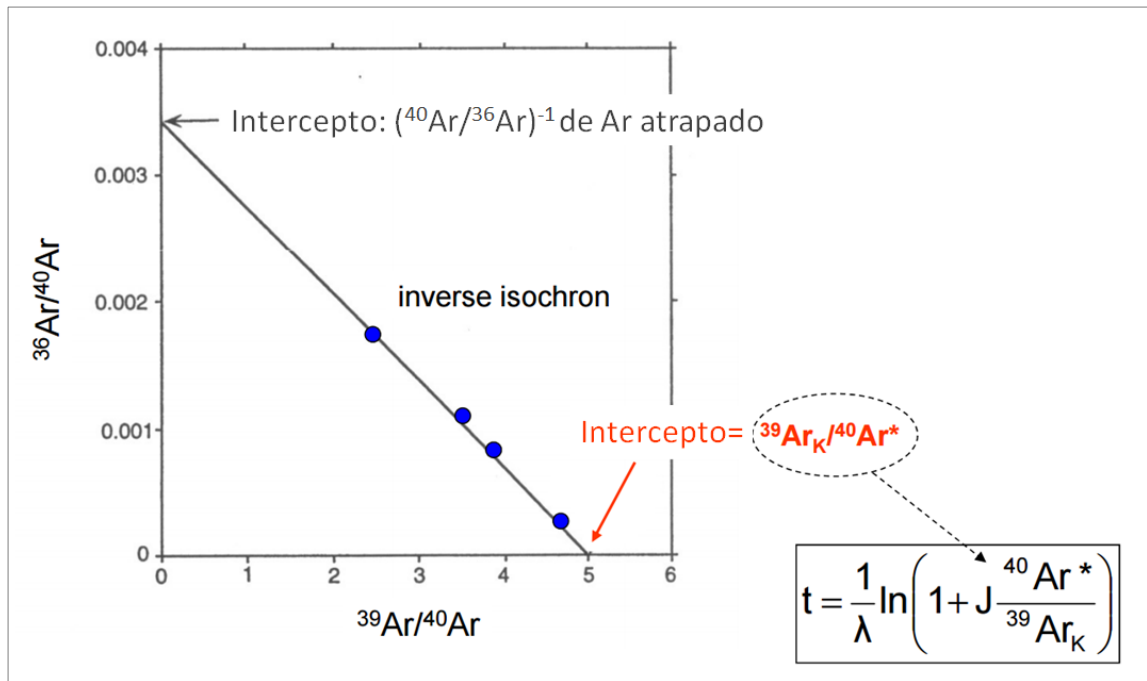


Figura 40. Explicación gráfica de los componentes calculados en el método de isócrona inversa.

Finalmente, la edad calculada con isócrona inversa varía de la edad calculada con *plateau* de edad, sin embargo, el método de isócrona es muy útil para muestras con importantes contaminaciones y/o aperturas del sistema, ya que gráficamente, se pueden llegar a separar los distintos eventos.

6.2 Edades de la Franja Gorbea (Trabajos anteriores)

La Franja de Gorbea y, en general, la Franja miocena de Chile, presenta una serie de edificios volcánicos con edades variables, mostrando una continuidad en la actividad volcánica.

La mayoría de las dataciones mostradas se realizaron con el método K-Ar, en donde los grados de contaminación pueden influir en la edad calculada, junto con el error (hasta ± 2 Ma de error). No obstante, lo anterior, los antecedentes geocronológicos para la franja, permiten reconocer eventos volcánicos y de mineralización epitermal entre los ~ 15 y ~ 21 Ma (Ver Tabla 2), en donde se observa una continuidad en la actividad volcánica, con el desarrollo de a lo menos, tres eventos mineralizadores, casi exclusivamente con formación de depósitos de Au-Ag EHS.

Tabla 2. Recopilación de dataciones radiométricas para la Franja de Gorbea.

Sector	Roca	Tipo y material datado	Edad absoluta (Ma)	Referencia
Atlas	Andesita alterada	K-Ar Alunita	21,1±0,9	Naranjo y Cornejo (1992)
Atlas	Brecha hidrotermal	Ar-Ar Alunita	19,86±0,04	Ross (2014A)
Atlas	Lava alterada	K-Ar Alunita	18,1±0,8	Naranjo y Cornejo (1992)
Atlas	Lava Andesítica	K-Ar Biotita	17,6±0,6	Naranjo y Cornejo (1992)
Titán	Brecha hidrotermal	Ar-Ar Alunita	17,08±0,79	Ross (2014B)
Vn Chaco	Andesita	K-Ar Roca Total	16,5±1,2	Naranjo y Cornejo (1989)
Titán	Lava	K-Ar Roca Total	16,2±1,5	Naranjo y Cornejo (1992)
Vaquillas Altas	Andesita	K-Ar Roca Total	16,2±1,5	Naranjo y Cornejo (1989)
Vn Chaco	Andesita	K-Ar Roca Total	15,6±1,9	Naranjo y Cornejo (1989)
Vaquillas Altas	Brecha hidrotermal	K-Ar Alunita	15,6±0,7	Naranjo y Cornejo (1989)

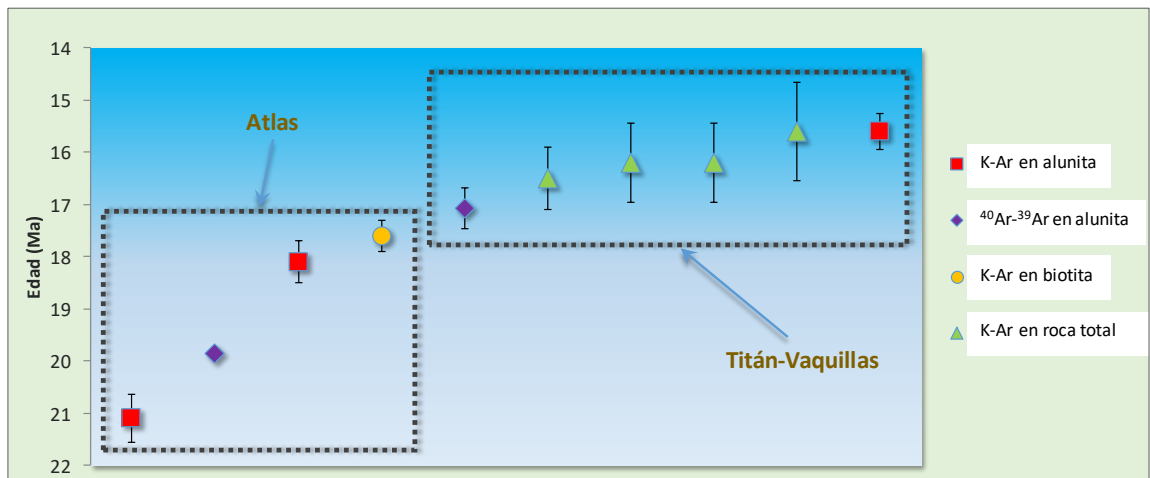


Figura 41. Representación gráfica con edades (Ma) calculadas para la Franja de Gorbea.

Si consideramos las edades expuestas sin un prejuicio por su naturaleza o método utilizado, se puede señalar que existe un evento volcánico entre los ~18 – 15 Ma (todas las mediciones en K-Ar) que corresponde a la Unidad Volcanes del Mioceno Inferior definida en el Capítulo IV de esta Tesis.

Además, se observan dos eventos mineralizadores alojados en las rocas volcánicas mencionadas. El primero se produce al inicio del evento volcánico (Ver Tabla 2 y Figura 41) con edad absoluta de $15,6 \pm 0,7$ Ma (K-Ar en alunita). Esta muestra se encuentra a unos 2 km al SW de Atlas, en el Sector Vaquillas Altas y se encuentran relacionados, ya que las brechas hidrotermales están en el mismo corredor formado por el Sistema de Fallas Vaquillas. El segundo evento (Ver Tabla 2 y Figura 41) se desarrolló entre los ~21-17 Ma con la mayoría de las muestras tomadas de los sectores Atlas y Titán. De todas las muestras asignadas a este evento, la muestra de Atlas con $19,86 \pm 0,04$ Ma representa la medida más confiable, ya que fue realizada en alunita gruesa de carácter sódico directamente relacionada a la alteración hidrotermal del sector.

6.3 Edades calculadas para Sector Atlas (Este estudio)

Uno de los objetivos de este trabajo fue realizar dos dataciones radiométricas en alunita con el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, con el fin de ratificar las edades de los eventos mineralizadores y conocer posibles variaciones en el complejo de brechas encontrado en *Steam Heated Zone*.

Por consiguiente, se enviaron dos muestras de alunita hipógena gruesa a datar con método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, según la ubicación que se indica en la Tabla 3 (ver Figura 2):

Tabla 3. Localización de muestras datadas del sector Atlas.

Muestra	Sector	Este (*)	Norte (*)	Cota	Azimut (**)	Dip (**)	Mt.	Observación
AT-27B	Atlas Gold Zone	502.215	7.193.389	4.315	NA	NA	NA	Muestra superficie
CLATDH0015-439.43	Steam Heated Zone	503.678	7.192.839	4.317	310°	-48°	439.43	Muestra de sondaje.

(*) Datum: Provisional Sudamericano de 1956 (Zona 19 Sur).

(**) Relacionada a sondaje DDH.

En general, los datos reportados por el laboratorio indican que ambas muestras cumplen con los estándares para ser datadas (Ver anexos para detalles).

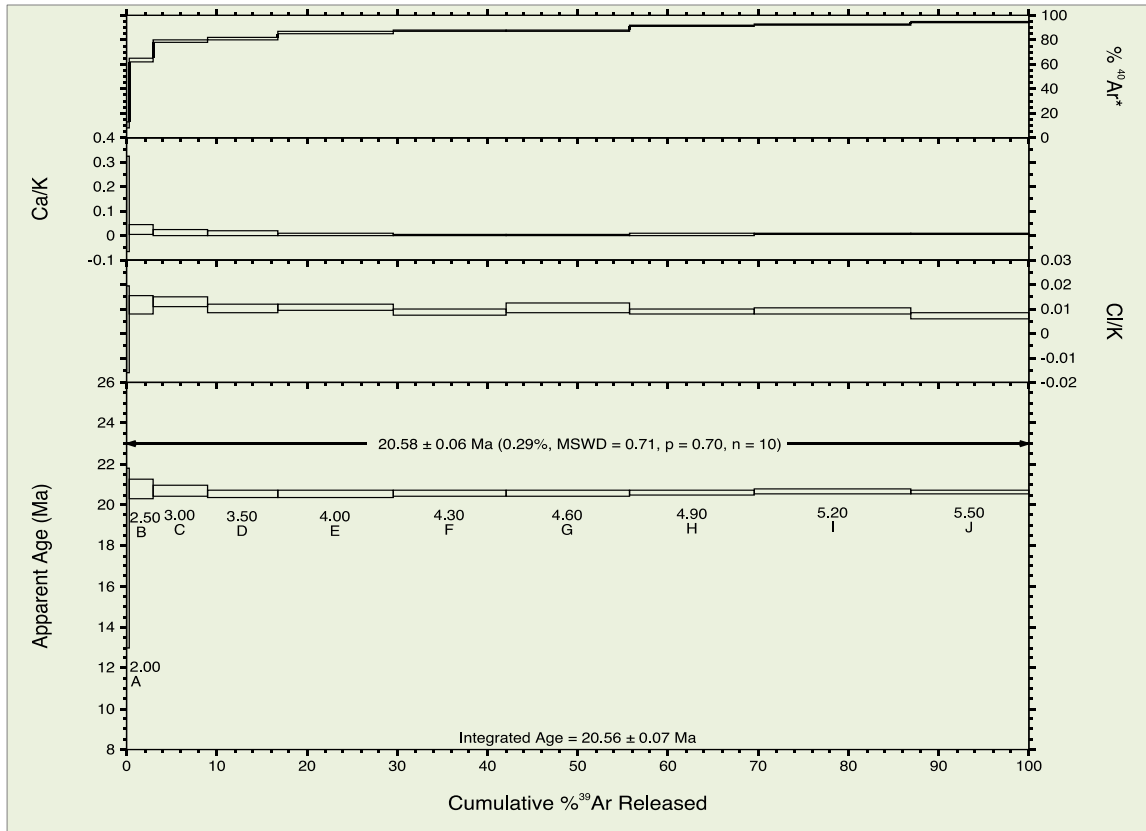


Figura 42. Espectro *Step-Heating* $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ para muestra de alunita AT-27B.

La Figura 42 muestra el gráfico de espectro de *step-heating* (calentamiento por etapas) para la muestra AT-27B. La parte superior muestra el porcentaje de ^{40}Ar liberado, observándose un *plateau* concordante y sin registro de exceso de Ar en el sistema. Posteriormente, las razones Ca/K y Cl/K muestran niveles casi sin variaciones, lo que indica que no hubo inyección de Ca ni Cl al sistema, por lo que el contenido de K se mantuvo, relativamente, constante. Finalmente, el *plateau* de edad aparente, entrega una edad de 20.58 ± 0.06 Ma, la que luego de sufrir correcciones matemáticas, fue fijada con una edad de 20.56 ± 0.07 Ma para la muestra AT-27B (Ver Figura 42).

Además, se construyó el diagrama de isócrona inversa para la muestra AT-27B (Ver Figura 43), en donde se obtuvo una edad de 20.61 ± 0.07 Ma; sin embargo, los datos entregados por el laboratorio indican que la mejor edad para

esta muestra es aquella entregada por el *plateau* de edad aparente (20.56 ± 0.07 Ma).

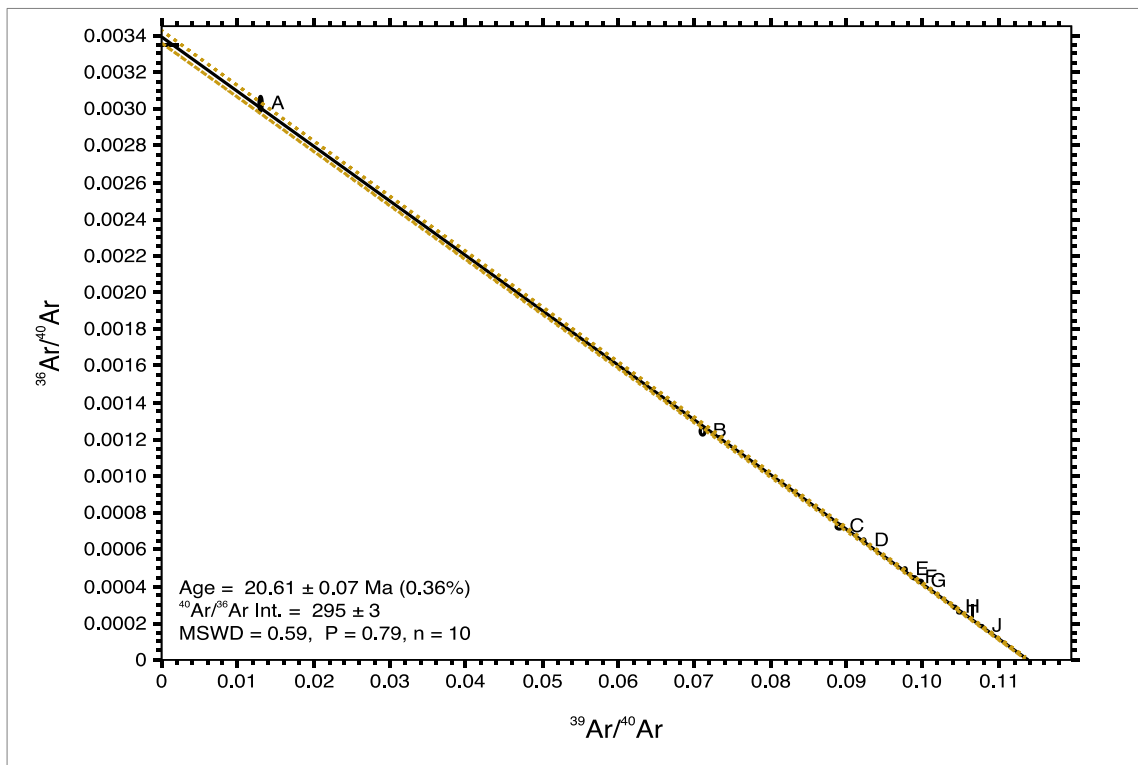


Figura 43. Diagrama de isócrona inversa para muestra de alunita AT-27B.

La Figura 44 muestra el gráfico de espectro de *step-heating* (calentamiento por etapas) para la muestra CLATDH0015-439.43. En general, se observa una pequeña contaminación en la etapa inicial (~2%), de más baja temperatura, en donde, como primera observación se aprecia una liberación menor de ^{40}Ar , además de un aumento en la razón Ca/K y una disminución en la razón Cl/K. Si bien esta “contaminación” del sistema es muy insignificante, el ligero aumento de la razón Ca/K podría ser explicada por algún residuo de bentonita en el testigo (aditivo de perforación a base de calcio) y, para el caso de la disminución de la razón Cl/K, esta se puede explicar, ya que en las cercanías del tramo del sondaje era posible encontrar jarosita hipógena, la cual puede haber estado como trazas en la muestra, lo que provocó un aumento del contenido de K. No obstante, la selección de esta muestra fue realizada con el suficiente cuidado para evitar una contaminación mayor. A pesar de las observaciones comentadas, el *plateau* de edad aparente es consistente y entrega una edad de 20.6 ± 0.2 Ma, la que luego

de sufrir correcciones matemáticas, fue fijada con una edad de 20.6 ± 0.3 Ma para la muestra CLATDH0015-439.43 (Ver Figura 44).

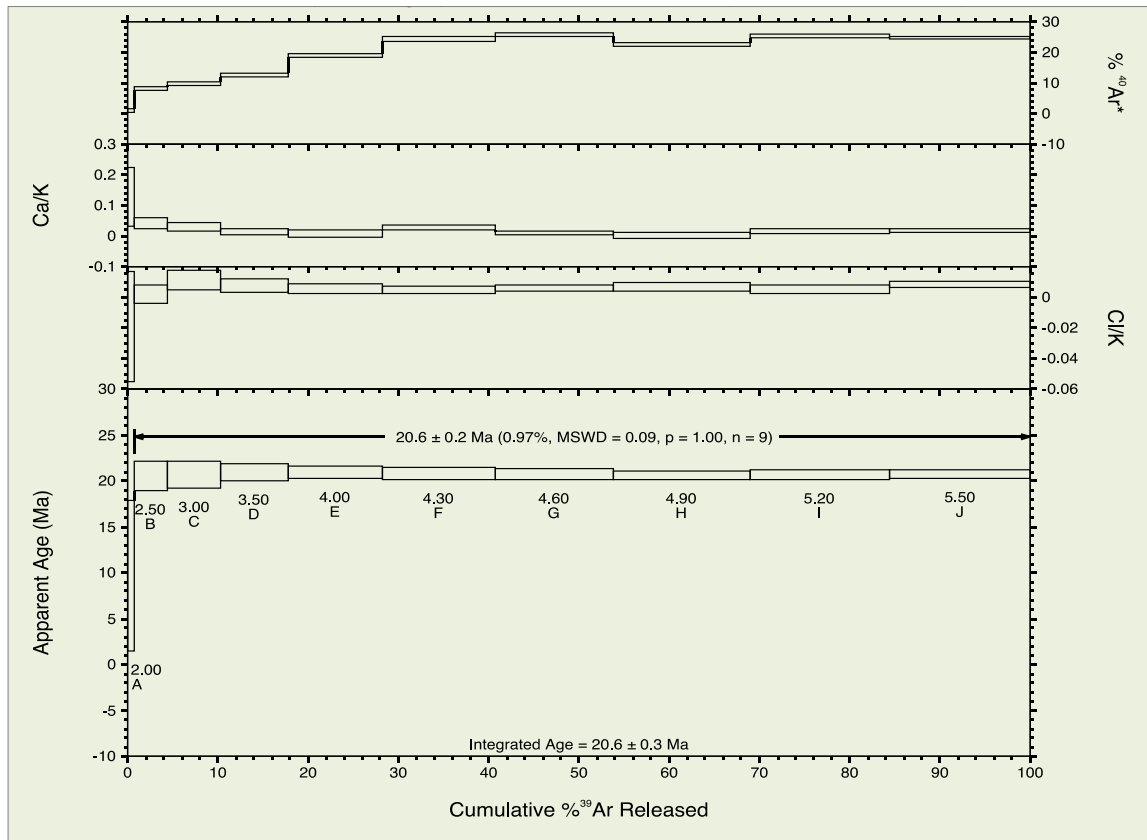


Figura 44. Espectro *Step-Heating* $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ para muestra de alunita CLATDH0015-439.43.

Por último, el diagrama de isócrona inversa para la muestra CLATDH0015-439.43 (Ver Figura 45), entrega una edad de 20.9 ± 0.4 Ma; aunque al igual que la muestra anterior, la recomendación es utilizar la edad del *plateau* de edad aparente (20.6 ± 0.3 Ma).

En definitiva, la edad de 20.6 ± 0.3 Ma, representa la edad más cercana al evento de mineralización principal del complejo de brechas hidrotermales (Brecha amarilla) interceptado en el sector SHZ con el pozo CLATDH0015.

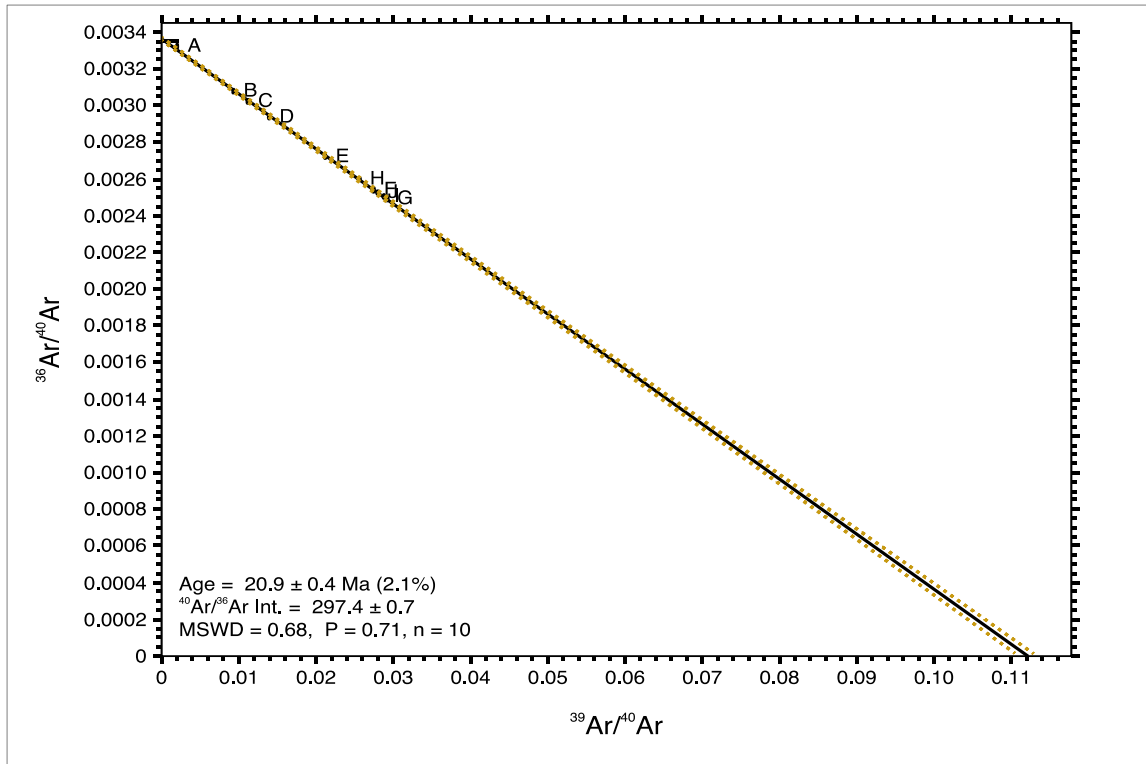


Figura 45. Diagrama de isócrona inversa para muestra de alunita CLATDH0015-439.43.

6.4 Edades y correlaciones en la Franja Miocena de Chile

Los antecedentes y trabajos geocronológicos reportados de la Franja del Mioceno de Chile (y Argentina) son escasos, poco claros y, muchas veces desconocidos, ya que muchos de ellos no han sido publicados por lo que quedan guardados en archivos de las diferentes empresas mineras y de exploraciones.

En este apartado se intenta realizar una recopilación de las edades disponibles de los depósitos epitermales de alta sulfuración del Mioceno (Para Chile y se incluye Veladero de Argentina), siguiendo como prioridad, en primer lugar, la datación disponible y, en segundo lugar, si se dispone de más de una datación, usar aquella que más se acerque al principal evento de mineralización aurífera.

Las primeras dataciones se realizaron en la década de los 80's en el Distrito El Indio. La principal datación en una muestra tomada de la Mina El Indio fue reportada en el trabajo de Walthier *et al.* (1985), sin embargo, debido al conocimiento de la época, es posible que la observación del material datado no corresponda a la realidad, ya que se reporta una edad de $8,6\pm 0,4$ Ma por método K-Ar en sericita (Ver Tabla 4 y Figura 46), lo cual, a lo menos resulta contradictorio para un clásico depósito epitermal de alta sulfuración alojado en estructuras.

Wörner *et al.* (1988) realiza una serie de dataciones en el sector Nevados de Payachata (XV Región de Chile) en donde se incluyó una edad de $6,60\pm 0,20$ Ma (Método K-Ar en roca total) para las rocas volcánicas de Choquelimpie (Ver Tabla 4 y Figura 46). El trabajo de Gröpper *et al.* (1991), le asigna la importancia a esta datación, asignándola como la edad máxima de la mineralización del Depósito Au-Ag Choquelimpie.

Posteriormente, Martin *et al.* (1995) entregan un trabajo realizado en conjunto entre el Sernageomín y la Cía. Minera San José, en donde aportan con una serie de dataciones para la franja. De este trabajo se extrae la edad de $7,2\pm 0,6$ Ma (Método K-Ar en Alunita-Jarosita) para el Depósito Sancarrón (Ver Tabla 4 y Figura 46).

El trabajo de Clavero *et al.* (1998) entregan una serie de dataciones para los sectores cercanos al Depósito Au-Ag Salares Norte. Naranjo *et al.* (2016) define la roca de caja de este depósito como Volcanes del Mioceno Medio a Superior con una edad de 14.2 a 10 Ma y en su trabajo aporta con una edad de 10.58 ± 0.11 Ma (^{40}Ar - ^{39}Ar en masa fundamental de filón andesítico). A pesar que, en la actualidad se conoce, extraoficialmente, que la edad de mineralización de Salares Norte rondaría los 6-5 Ma, se toma como una edad máxima los 10.0 ± 0.4 Ma obtenida por método K-Ar en roca total andesítica (Clavero *et al.*, 1998).

Jannas *et al.* (1999) aportan con varias edades para el Distrito El Indio, siendo la más útil para este trabajo, los 6.94 ± 0.16 Ma (^{40}Ar - ^{39}Ar en alunita) para el Depósito Tambo.

Tabla 4. Recopilación de dataciones radiométricas para la Franja del Mioceno de Chile (y Argentina).

Sector	Roca	Tipo y material datado	Edad absoluta (Ma)	Referencia
Choquelimpie	Andesita (Roca de caja)	K-Ar Roca Total	6,60±0,20	Wörner <i>et al.</i> (1988)/Gröpper <i>et al.</i> (1991)
Atlas (1)	Brecha hidrotermal	Ar-Ar Alunita	19,86±0,04	Ross (2014A)
Atlas (2)	Brecha hidrotermal	Ar-Ar Alunita	20,6±0,3	Este estudio
Titán	Brecha hidrotermal	Ar-Ar Alunita	17,08±0,79	Ross (2014B)
Salares Norte	Roca Total (Roca de caja)	K-Ar Roca Total	10,00±0,4	Clavero <i>et al.</i> (1998)
Can-Can	Vetilla alunita-qz	Ar-Ar Alunita	17,47±0,32	Gamonal (2015)/Gamonal <i>et al.</i> (2015)
Purén	Alunita steam heated	Ar-Ar Alunita	18,01±0,57	Gamonal (2015)/Gamonal <i>et al.</i> (2015)
Coipa Norte (Coipa)	Vetilla alunita-qz	Ar-Ar Alunita	13,76±0,27	Gamonal (2015)/Gamonal <i>et al.</i> (2015)
Brecha Norte (Coipa)	Alunita gruesa	Ar-Ar Alunita	14,64±0,7	Gamonal (2015)/Gamonal <i>et al.</i> (2015)
Pascua	Alunita	Ar-Ar Alunita	8,76±0,21	Bissig <i>et al.</i> (2001)
Lama	Alunita	Ar-Ar Alunita	9.4±0.2	Bissig <i>et al.</i> (2001)
Tambo (1)	Alunita	Ar-Ar Alunita	6.94±0.16	Jannas <i>et al.</i> (1999)
Tambo (2)	Alunita	Ar-Ar Alunita	8,71±0,21	Deyell <i>et al.</i> (2005)
El Indio (1)	Roca Total (Qz-Ser)	K-Ar Sericita	8,6±0,4	Walthier <i>et al.</i> (1985)
El Indio (2)	Alunita	Ar-Ar-Alunita	6.2±0.3	Bissig <i>et al.</i> (2001)
Sancarrón (1)	Alu-Jar	K-Ar Alunita-Jarosita	7,2±0,6	Martin <i>et al.</i> (1995)
Sancarrón (2)	Alunita	Ar-Ar Alunita	7,9±0,2	Bissig <i>et al.</i> (2001)
Fabiana (1) (Veladero)	Alunita	Ar-Ar Alunita	10,4±0,1	Bissig <i>et al.</i> (2001)
Fabiana (2) (Veladero)	Alunita	Ar-Ar Alunita	10,09±0,08	Holley <i>et al.</i> (2016)
Amable (Veladero) pit	Jarosita	Ar-Ar Jarosita	11,8±0,3	Holley (2012)
Filo Federico (Veladero)	Alunita	Ar-Ar Alunita	11.5±0.12	Holley <i>et al.</i> (2016)
Argenta (Veladero)	Alunita	Ar-Ar Alunita	13.2±0.18	Holley <i>et al.</i> (2016)

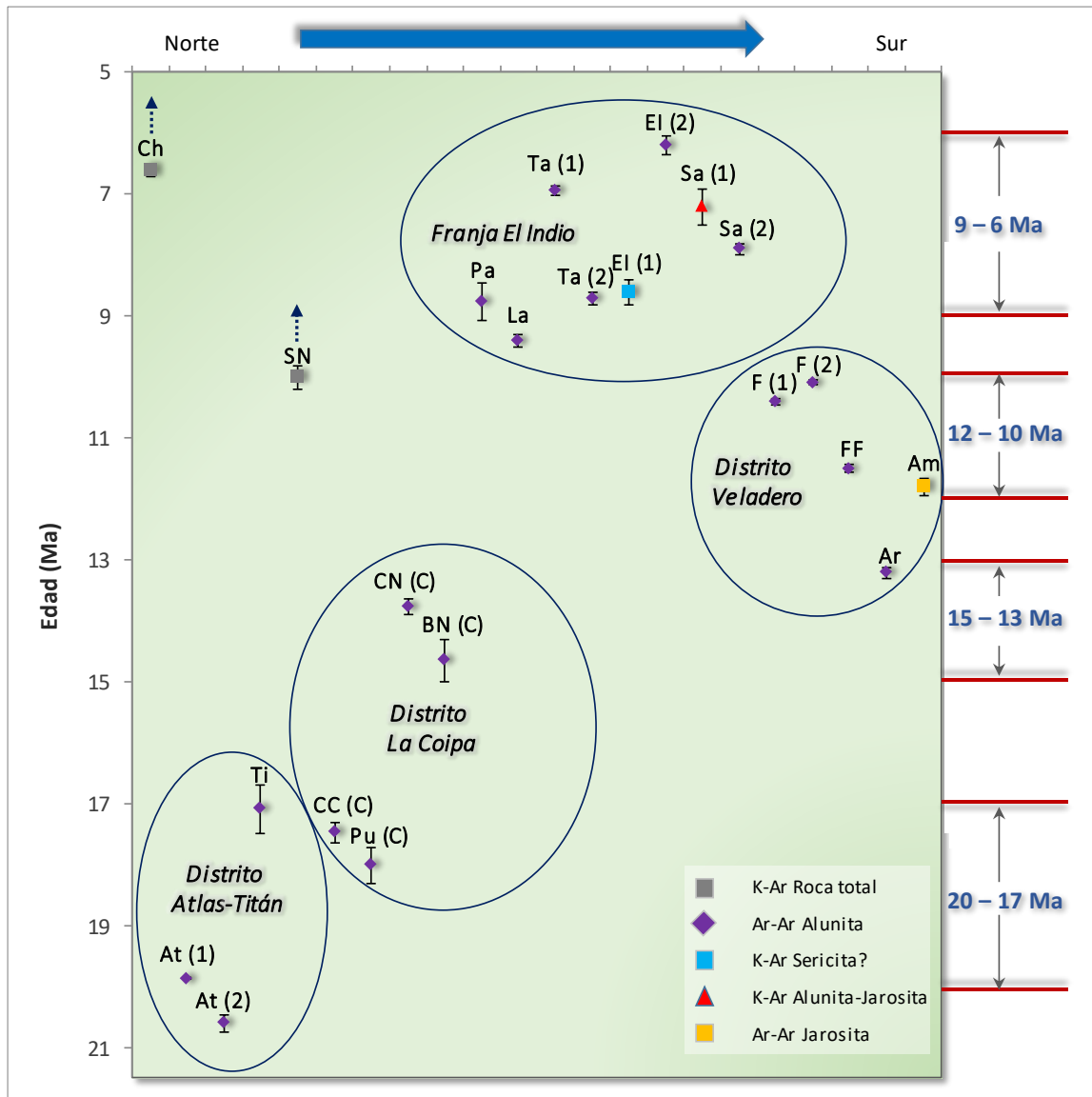


Figura 46. Representación gráfica de edades (Ma) calculadas para la Franja Au-Ag del Mioceno de Chile (y Argentina). Abreviaciones, A: Amable pit (Veladero); Ar: Argenta (Veladero); At: Atlas; BN: Brecha Norte (Coipa); CC: Can-Can (Coipa); CN: Coipa Norte; Ch: Choquelimpie; El: El Indio; F: Fabiana (Veladero); FF: Filo Federico (Veladero); La: Lama; Pa: Pascua; Pu: Purén (Coipa); Sa: Sancarrón; SN: Salares Norte; Ti: Titán; Ta: Tambo. Nota: Las flechas segmentadas para Choquelimpie y Salares Norte, indican que la datación representa la edad máxima del depósito, por lo que la edad de mineralización puede ser más joven. Ver referencias en Tabla 3.

A partir del año 2000, se tiene una serie de dataciones con método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, principalmente, en alunita hipógena, relacionada al principal evento mineralizador para cada depósito (Ver resumen en Tabla 4 y Figura 46).

Si bien los depósitos epitermales de alta sulfuración se encuentran en un amplio espectro de edades, en la Figura 46 se puede observar algunos periodos con mejor desarrollo de estos depósitos, así podemos subdividir en: 20-17 Ma, 15-13 Ma, 12-10 Ma, y 9-6 Ma.

Además, en la Figura 47, se puede observar que existe un periodo más productivo para depósitos o distritos de >3.0 Moz Au (incluso depósitos *World Class*) y que comprende el intervalo entre los 12 a los 7 Ma, en donde se tiene Salares Norte aún en etapa de proyecto, con 3.1 Moz de Au en categoría de recursos (Azevedo *et al.*, 2015); Pascua-Lama con 14.05 Moz Au (Astorga *et al.*, 2017) en etapa de evaluación; Distrito El Indio con 6.0 Moz Au sin considerar Sancarrón (Astorga *et al.*, 2017) en etapa de cierre; y el Distrito Veladero con 6.7 Moz Au actualmente, en producción desde 2005.

Por otra parte, los depósitos fuera de este intervalo (12-7 Ma) (Ver Figura 47) si bien fueron económicos, representan recursos y/o reservas de Au mucho menores como Choquelimpie con 1.1 Moz Au en calidad de recursos (Abogabir *et al.*, 2013) y Distrito La Coipa con 1.5 Moz Au como reservas minadas (Kinross, 2017) repartidas con 0.85 Moz Au en La Coipa y 0.65 Moz Au en Purén.

Para el caso de Atlas (20-19 Ma), y, en general, para la Franja de Gorbea (20-17 Ma), a pesar que aún se debe probar que existe mineralización económica dentro del sector; se puede afirmar que, en relación, específicamente, a la edad estaríamos en una zona donde se pueden desarrollar depósitos económicos de Au-Ag, pero de tamaños más reducidos, probablemente <2.0 Moz Au, lejano a los tamaños de depósitos mayores y con muy pocas probabilidades de tener depósitos del tipo *World Class* en el área.

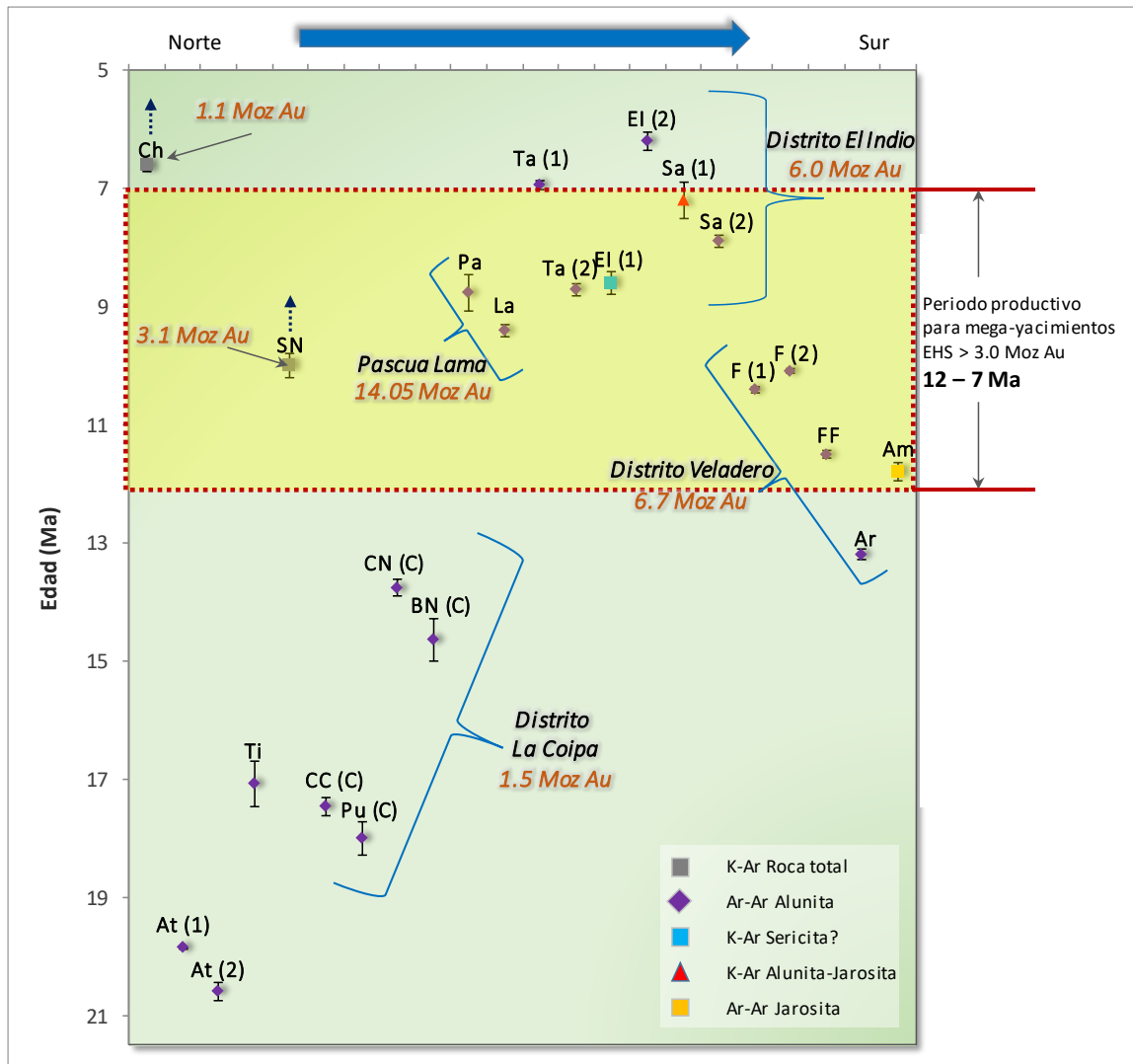


Figura 47. Representación gráfica de edades (Ma) calculadas para la Franja Au-Ag del Mioceno de Chile (y Argentina), mostrando cantidad de onzas de Au por depósito y destacando el mejor periodo productivo. Abreviaciones, A: Amable pit (Veladero); Ar: Argenta (Veladero); At: Atlas; BN: Brecha Norte (Coipa); CC: Can-Can (Coipa); CN: Coipa Norte; Ch: Choquelimpie; El: El Indio; F: Fabiana (Veladero); FF: Filo Federico (Veladero); La: Lama; Pa: Pascua; Pu: Purén (Coipa); Sa: Sancarrón; SN: Salares Norte; Ti: Titán; Ta: Tambo. Nota: Las flechas segmentadas para Choquelimpie y Salares Norte, indican que la datación representa la edad máxima del depósito, por lo que la edad de mineralización puede ser más joven. Ver referencias en Tabla 3.

CAPÍTULO VII: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los diferentes temas tratados en esta Tesis, han permitido definir variadas herramientas para la búsqueda de mineralización Au-Ag, en el Sector Atlas.

Las dos campañas de perforación en Atlas y Titán, si bien aún no confirman el descubrimiento de un depósito de Au-Ag, han permitido definir modelos que pueden ser replicados en variadas zonas de alteración de la Franja de Gorbea y/o la Franja del Mioceno del Norte de Chile.

Las observaciones realizadas tanto en terreno, estudios analíticos y trabajos de gabinete, permiten concluir lo siguiente:

La mineralización y alteración de los sectores Atlas y Titán, permite asegurar que corresponden a depósitos del tipo epitermales de alta sulfuración de Au-Ag (según clasificación de Hedenquist, 1987; Hedenquist *et al.*, 2000; Sillitoe y Hedenquist, 2003).

Si bien existen registros menores de mineralización vetiforme o emplazada en estructuras, los principales depósitos del área corresponden a yacimientos alojados en brechas, similares a los últimos descubrimientos realizados en Chile como Alturas (*Barrick Gold*) y Salares Norte (*Gold Fields*).

Existen dos sistemas de fallas que resultan importantes en el emplazamiento de los depósitos en Atlas y la franja en general, el primero es el Sistema de Falla Vaquillas con dirección NE que controla tanto la brecha de Steam Heated Zone en Atlas como la brecha de Vaquillas Altas (hacia el SW), y el segundo son las trazas correspondientes al Lineamiento Culampajá con dirección NW y que viene desde Argentina (Salfity, 1985; Richards *et al.*, 2001). Si bien en cada una de las trazas de estos sistemas de fallas se pueden emplazar cuerpos de brecha mineralizados, todo indica que el cruce entre ambos sistemas proporciona una zona ideal para la formación de brechas y la evolución del sistema epitermal.

La roca de caja principal que aloja la mineralización es la brecha freatomagmática, que representa la roca con la porosidad ideal para incorporar los fluidos mineralizadores. Esta se encuentra emplazada en la Unidad Volcanes del Mioceno Inferior (Andesitas y rocas volcanoclásticas).

Las zonas de alteración definidas son: Alteración tipo *Steam Heated* (caolinita-alunita-sílice-azufre), Silicificación (sílice opalino-cuarzo

microcristalino), Alteración Argílica (caolinita-smectita-clorita), Alteración Argílica blanca (caolinita-alunita-dickita), Alteración dickita-pirofilita, Alteración cuarzo-alunita-dickita, Alteración *Vuggy Silica* (Cuarzo *vuggy*-alunita), Alteración “Amarilla” formada por cuarzo-jarosita-alunita-natroalunita y, en menor medida, baritina.

Hasta ahora se tienen algunos interceptos económicos, siendo el de mayor relevancia el tramo del pozo CLATDH0015 (2da. campaña) con 114.1 m @ 1.07 g/t Au, incluyendo 36 m @ 2.5 g/t Au). Dimensión probable del cuerpo de brecha: 650 x 120 x 250 m, con una dirección N40-45°E.

Las zonas de alteración que contienen a la mineralización de Au-Ag son, principalmente, *vuggy silica* con relleno de las oquedades (usualmente, sílice, alunita y jarosita), con leyes moderadas a marginales (~0.3 a 1.0 g/t Au); y la alteración “amarilla”, con leyes moderadas a altas (> 1.0 g/t Au).

La correlación de la mineralización Au-Ag con la alteración cuarzo-alunita es directa, sobre todo con las alunitas sódicas (Na), las que pueden ser detectadas midiendo la longitud de onda (nm) usando espectrometría (TerraSpec). En general, las alunitas menores a 1480 nm representan temperaturas de formación bajas, por lo tanto, tendrían una composición cercanamente potásica (K); mientras que los valores mayores a 1480 nm representan temperaturas altas (Stofregen y Cygan, 1990; Chang *et al.*, 2011) con composiciones que van desde una mezcla de K + Na a composiciones casi íntegramente sódicas (> 1485 nm) (natroalunita). Para el caso de Atlas, se observa una excelente correlación entre la mineralización y las alunitas sódicas mayores a 1485 nm de longitud de onda.

La presencia de *cream silica* o sílice parda representa una fuente de sílice con intercrecimiento de rutilo (TiO₂), lo que significa que existe un origen de alta temperatura y bajo pH, capaz de movilizar Ti en estos ambientes (Cornejo, com. oral).

La zona de alteración tipo *steam heated*, no muestra valores de Au-Ag importantes, pero sí de volátiles como Hg-Sb-As. En la parte baja de la zona de *steam heated* se observa un incremento de los valores de Hg, al igual que en las brechas “amarillas” con mineralización.

El Pb es un excelente trazador del Complejo de brechas (Brecha freatomagmática + Brechas hidrotermales), según el modelo 3D realizado para *Steam Heated Zone* (Atlas).

Por otra parte, los estudios petrográficos y calcográficos han permitido definir una secuencia paragenética mostrada en la Figura 48. En esta figura se logran ver las diferentes etapas del sistema epitermal separado en *vuggy silica I* que representa una asociación cuarzo-pirita-alunita±sílice gris con oquedades escasamente rellenas sin valores económicos de Au; en segundo lugar, tenemos *vuggy silica II* que se refiere a un mayor y mejor desarrollo de la alteración *vuggy silica* (con relleno) caracterizada por la asociación qz-alunita-pirita-cream silica-pirofilita con valores moderados a bajos de Au. Siguiendo, se encuentra el evento principal de mineralización con la asociación cuarzo-alunita-natroalunita-jarosita (hip)-baritina-oro-dickita con valores moderados a altos de Au. En la misma Figura 48 se puede observar la directa relación entre el evento mineralizador principal, los valores de Au y la longitud de onda de las alunitas.

A modo de discusión, se debe plantear la importancia de la asociación natroalunita-jarosita para la mineralización aurífera, ya que sólo cuando estas especies están presentes se produce un aumento en el contenido de Au. Los estudios petrográficos y calcográficos reportan la presencia de estas dos especies, sin embargo, si revisamos la Tabla 5, la clasificación hecha por Stoffregen *et al.* (2000) habla que el grupo de las alunitas se puede dividir en dos soluciones sólidas: alunite-natroalunita $[KAl_3(SO_4)_2(OH)_6 - NaAl_3(SO_4)_2(OH)_6]$ y jarosita-natrojarosita $[KFe_3(SO_4)_2(OH)_6 - NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6]$. La natroalunita ya se encuentra detectada, sin embargo, todo indica que el aumento de Na por sobre el K ocasiona la precipitación de ésta. Lo que queda por demostrar es si el sistema sólo contiene jarosita o es posible tener natrojarosita ($NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) ya que el aumento de Na indicaría que el sistema en Atlas es capaz de precipitar natroalunita con natrojarosita.

Por otra parte, existen especies en el grupo alunitas que contienen plomo (Pb). En la Tabla 5 se pueden ver algunas especies que tienen Pb en su fórmula, por lo que es posible que alguna(s) de estas especies también esté presente en el sistema mineralizado, lo que explicaría el contenido de Pb como un muy buen trazador del complejo de brechas.

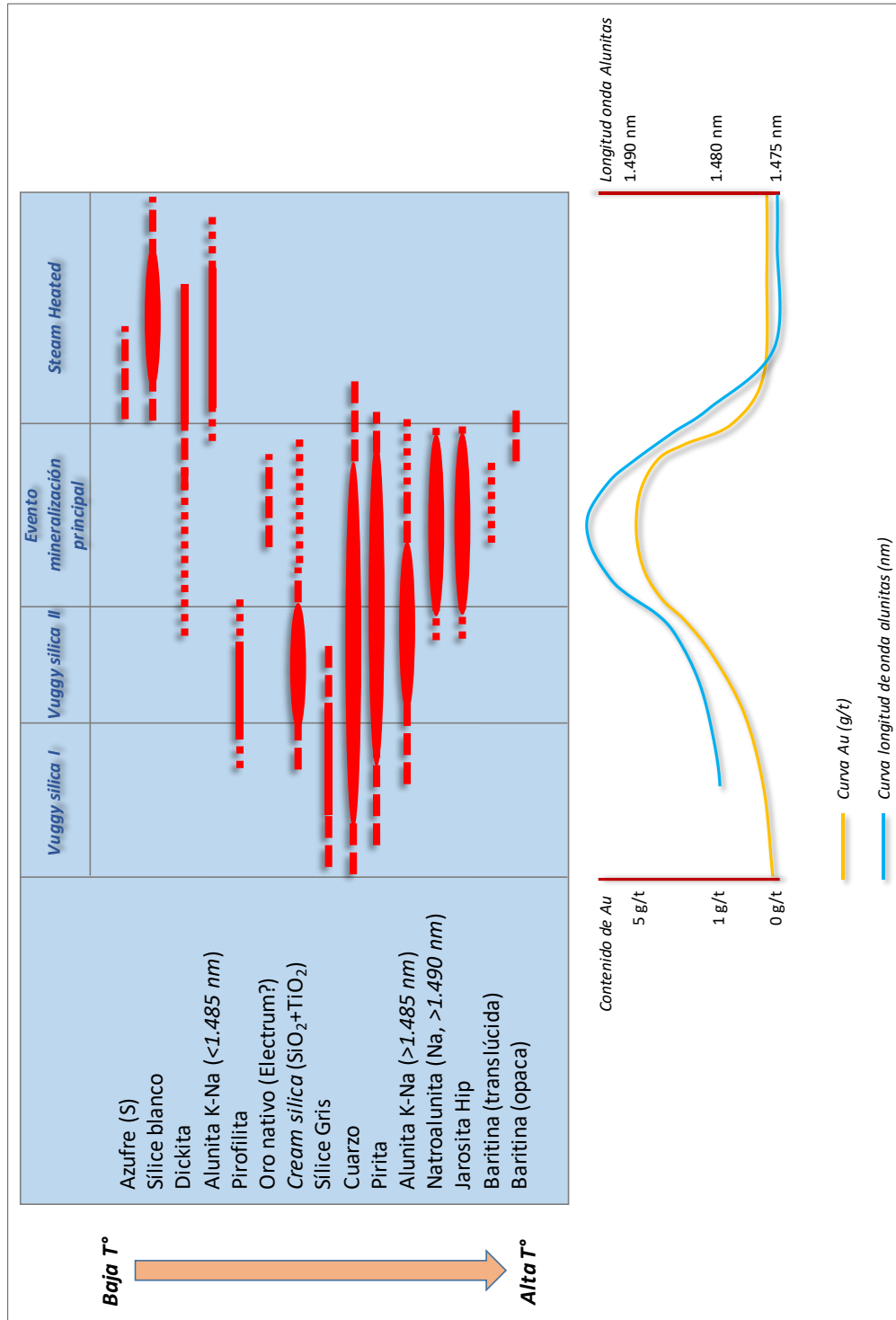


Figura 48. Diagrama paragenético del sector Atlas, mostrando la correlación de Au y con la longitud de onda de las alunitas.

Todo esto debe ser relacionado con la presencia de Au para entender el proceso hidrotermal en su totalidad. Aún quedan bastantes interrogantes que podrían ser resueltas con estudios de difracción de rayos X, *SEM*, *core scan*, *qemscan*, etc.

Tabla 5. Minerales del grupo de la alunita (Stoffregen *et al.*, 2000).

<i>Alunite Subgroup</i>		<i>Jarosite Subgroup</i>	
alunite	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$	jarosite	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
natroalunite	$NaAl_3(SO_4)_2(OH)_6$	natrojarosite	$NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
ammonioalunite	$(NH_4)_4Al_3(SO_4)_2(OH)_6$	ammoniojarosite	$(NH_4)Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$
schlossmacherite	$(H_3O,Ca)Al_3(SO_4)_2(OH,H_2O)_6$	hydronium jarosite	$(H_3O)Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$
—		argentojarosite	$AgFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
—		dorallcharite	$TlFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
osarizawaite	$Pb(Al,Cu)_3(SO_4)_2(OH,H_2O)_6$	beaverite	$Pb(Fe,Cu)_3(SO_4)_2(OH,H_2O)_6$
—		plumbojarosite	$PbFe_6(SO_4)_4(OH)_{12}$
minamite	$(Na,Ca)_2Al_6(SO_4)_4(OH,H_2O)_{12}$	—	
huangite	$CaAl_6(SO_4)_4(OH)_{12}$	—	
walthierite	$BaAl_6(SO_4)_4(OH)_{12}$	—	

Con respecto a las edades calculadas para el área de estudio, se debe ser cuidadoso, ya que muchas de éstas fueron realizadas usando método K-Ar, el cual puede ser muy alterado con cualquier tipo de contaminación o reapertura del sistema medido (Exceso de K en el sistema). Dicho esto, se ha estimado que la edad de mineralización para Atlas y Titán está en el rango de 21.1-17.08 Ma (Naranjo *et al.*, 1992; Ross, 2014A; Ross, 2014B; este estudio). La edad calculada para la mineralización económica en Atlas (SHZ Breccia) es de $20,60 \pm 0,3$ Ma medida por método ^{40}Ar - ^{39}Ar en alunita (Este trabajo). Estas edades son correlacionables con el *steam heated blanket* del Distrito La Coipa (Gamonal, 2015) y con el clúster de pórfidos Au-Cu Eva-Román-Águila del Distrito Casale con rango 20-17 Ma (Cáceres, 2015). Por otra parte, en este trabajo se ha propuesto que existe un periodo más productivo para depósitos o distritos de >3.0 Moz Au (incluso depósitos del tipo *World Class*) y que comprende el intervalo entre los 12 a los 7 Ma (Pascua Lama, El Indio, Salares Norte, etc.). Si seguimos esta observación, podemos afirmar que en Atlas y, también en Titán, podríamos esperar depósitos <2.0 Moz, en el rango de los tamaños del Distrito La Coipa. Existe mucha información de dataciones que no

ha sido publicada por las empresas mineras, la que podría ratificar o incluso, acotar, estas observaciones.

Todas las observaciones e interpretaciones entregadas en esta Tesis han sido plasmadas en el modelo 3D visto en el capítulo IV, en donde la litología, alteración, comportamiento de alunitas, geología estructural, geoquímica, etc. muestran una interrelación que describe la formación del depósito epitermal de Atlas. Este depósito nos permite caracterizar un típico yacimiento epitermal de alta sulfuración para la franja del Mioceno Inferior (Ver Figura 49). De acuerdo a sus características, se observan muchas similitudes con el Depósito Salares Norte, incluso en el aspecto de profundidad de la mineralización.

Todo lo estudiado y discutido en este trabajo se ha logrado resumir en el modelo geológico y de alteraciones que se encuentra en la Figura 50, lo que resulta en un modelo predictivo aplicable a zonas de alteración en brechas de la franja miocena inferior del norte de Chile (Ver Figura 49). Así, se logra ver la importancia del reconocimiento de las brechas freatomagmáticas, las cuales muestran una estructura ordenada, con un núcleo polimíctico y con fuerte redondeamiento de clastos hacia el centro del sistema; y, hacia los bordes, una brechización angulosa y monomíctica (Ver Figura 50). Estas características indican las zonas de mayor energía ocasionadas durante el contacto del cuerpo magmático con el nivel de aguas freáticas, en donde el centro del sistema (> energía destructiva) resulta ser la mejor roca hospedante para la mineralización. En general, pareciera que el evento freatomagmático con el posterior evento epitermal se encuentra muy relacionado entre sí, ya que la zona de brecha, prácticamente, se encuentra totalmente alterada. Esto ocasiona que la presencia de alunitas con Pb (>70 ppm) delinee muy bien el complejo de brechas (Ver Figura 50). Las condiciones de pH~2-3 ocasionan que los fluidos hidrotermales interaccionen con las rocas de caja y generen el *vuggy silica* que, en sectores extremos, logran incluso lixiviar clastos completos de la brecha original. Los dos eventos de *vuggy silica* (I y II) son responsables de las leyes de Au sub-económicas y económicas, respectivamente, a los que, posteriormente, se sobreimpone el evento principal con la asociación cuarzo-alunita-jarositana-troalunita-baritina, la cual representa la zona con mejores valores de Au (>1 ppm). En la Figura 50, se logra ver la relación directa entre la composición de las alunitas (K a Na), reflejadas en las longitudes de onda (1.480, 1.485 y 1.490 nm) que indican que a mayor T° de formación, se tendrá una composición más sódica y por ende con un aumento del contenido de Au (Ver Figura 50).

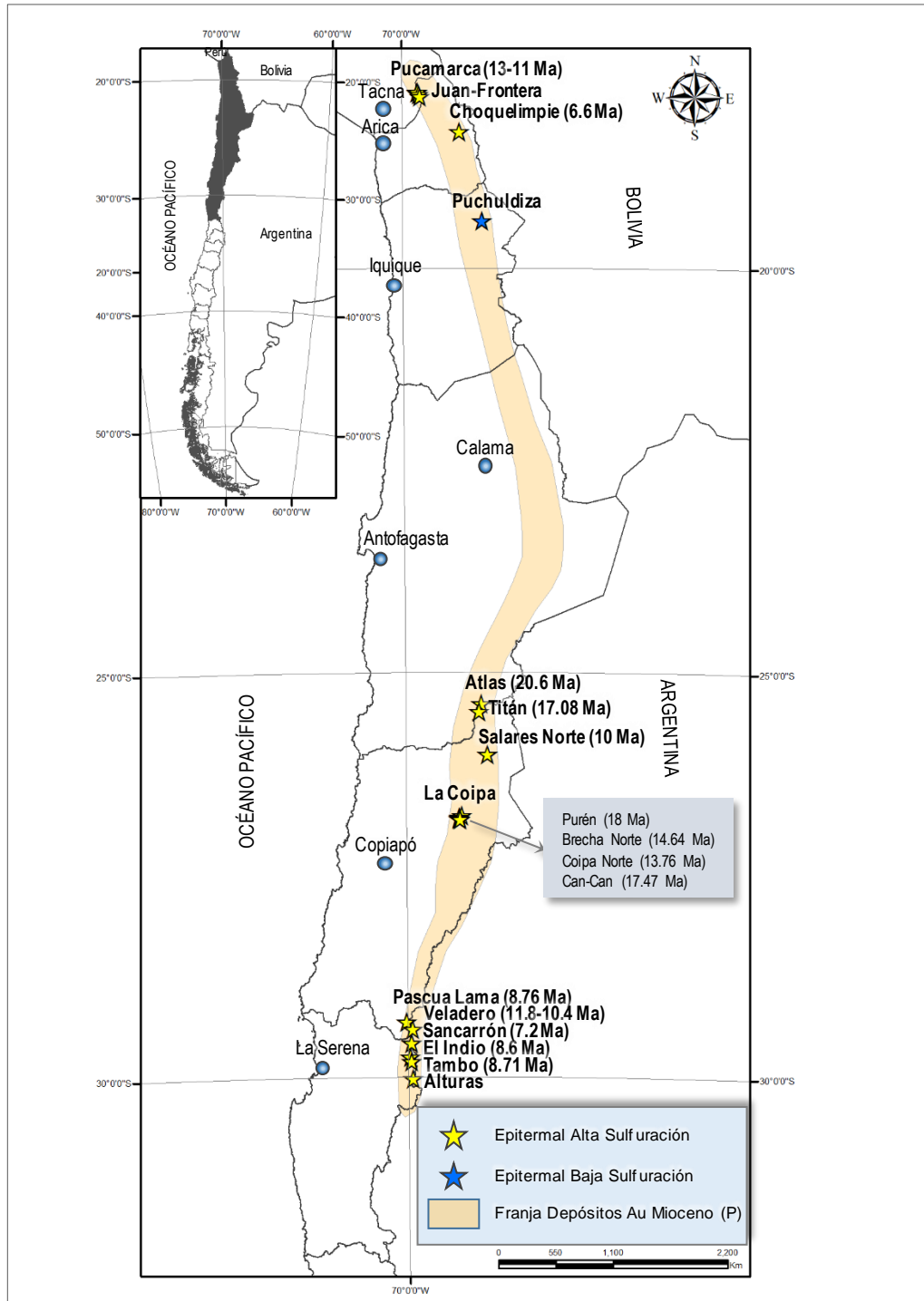


Figura 49. Franja de depósitos epitermales del Mioceno (Plioceno) de Chile.

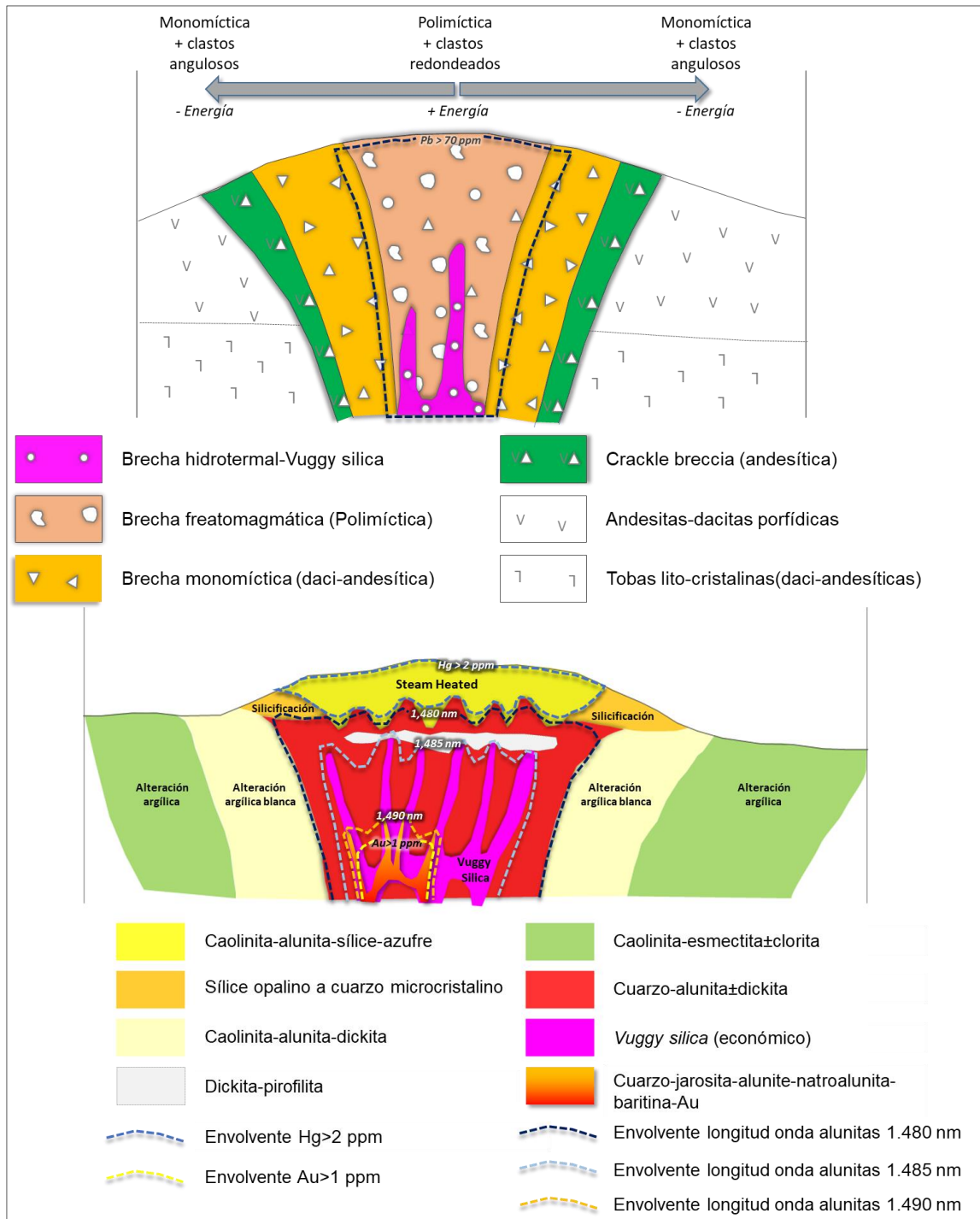


Figura 50. Modelo geológico y de alteraciones final para el Depósito Atlas.

REFERENCIAS

Abogabir, P., Vicente, F., Ugarte, I. 2013. Choquelimpie, Resumen Informativo. Informe privado preparado por BICE Inversiones (Sin publicar), 7 p.

Allègre, C. 2008. Isotope Geology. Cambridge University Press, 507 p.

Astorga, D., Griffiths, S., Crosato, S., Jorquera, C., Plasencia, C., 2017. Alturas: A Unique Discovery Within a Mature District Through Integrating Sound Geological Practices, Multidisciplinary Expertise and Leading Technology. In "Proceedings of Exploration 17: Sixth Decennial International Conference on Mineral Exploration" edited by V. Tschirhart and M.D. Thomas, 2017, p. 587–600.

Azevedo, F., Brewer, N., Huete, D., Santos, A., De Santos, L. R., Baumgartner, R., Trueman, A., Foley, A., 2015. The Discovery and Geology of the Salares Norte Epithermal Gold-Silver Deposit, Northern Chile. NewGenGold 2015, p. 145-157.

Barrick, 2017. Barrick Gold Corporation Operations and Technical Update, <http://barrick.q4cdn.com/808035602/files/presentation/2017/Barrick-2017-Operations-and-Technical-Update.pdf>.

Bissig, T., Lee, J., Clark, A.H., Heather, K., (2001). The Neogene history of volcanism and hydrothermal alteration in the Central Andean flat-slab region: new ^{40}Ar – ^{39}Ar constraints from the El Indio-Pascua Au (Ag, Cu) belt, III/IV Region, Chile, Provincia San Juan, Argentina. *Int Geol Rev* 43:312–340.

Cáceres, 2015. Nuevos antecedentes geocronológicos del Distrito Casale, sur de la Franja Maricunga, Región de Atacama, Chile. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, At 2, p. 44-47.

Carrasco, C., Hernández, L., Wong, L., 2015. Identificación de minerales de alteración argílica mediante espectrometría infrarroja en el Distrito Centinela, Sierra Gorda, Región de Antofagasta. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, At 2, p. 207-210.

Cerpa, L.M., Bissig, T., Kyser, K., McEwan, C., Macassi, A., Rios, H.W., 2013. Lithologic controls on mineralization at the Lagunas Norte high sulfidation epithermal gold deposit, northern Peru. *Mineral. Deposita* 48, p. 653–673.

Chang, Z.; Hedenquist, J.; White, N.; Cooke, D.; Roach, M.; Deyell, C.; García, J.; Gemmell, B.; Mcknight, S.; Liza, A. 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au District, Luzon, Philippines. *Economic Geology*. Vol. 106: p. 1365-1398.

Charchaflié, D., Tosdal, R.M., and Mortensen, J.K., 2007. Geologic framework of the Veladero high-sulfidation epithermal deposit area, Cordillera Frontal, Argentina. *Economic Geology*, v. 102, p. 171–192.

Chouinard, A., Williams-Jones, A.E., Leonardson, R.W., Hodgson, C.J., Silva, P., Tellez, C., Vega, J., Rojas, F., 2005. Geology and genesis of the multistage high-sulfidation epithermal Pascua Au–Ag–Cu deposit, Chile and Argentina. *Econ. Geol.* 100, p. 463–490.

Clavero, J., Gardeweg, M., Mpodozis, C. 1998. Mapa Geológico Preliminar del área de Salar de Piedra Parada, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, 1 mapa escala 1:1000.000, Santiago. Mapas Geológicos, Versión Preliminar (sin publicar).

Corbett, G. J., and Leach, T. M., 1998. Southwest Pacific rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization. *Society of Economic Geologists Special Publication 6*, 234 p.

Cornejo, P., 2016 A. Estudio petrográfico y calcográfico Sector Atlas, Yamana Chile. Muestras: AT 01; 03; 05; 07; C1606060B; C1606062; C1606065B; C1606069A; C1606075A; C1606076B; C1606082; C1606083. Informe interno Yamana Gold (sin publicar), 36 p.

Cornejo, P., 2017 A. Estudio petrográfico y calcográfico Sector Atlas, Yamana Chile. Muestras: AT-16, AT-34-A, AT-35-A, AT-36-A, C1606087, C1703813-A, C1703815-B y C1703822-A. Informe interno Yamana Gold (sin publicar), 22 p.

Cornejo, P., 2017 B. Estudio petrográfico y calcográfico Sector Atlas, Yamana Chile. Muestras CLATDH0015; CLATDH0019; CLATDH0020. Informe interno Yamana Gold (sin publicar), 29 p.

Davidson, J., Ramirez, C.F., Gardeweg, M., Herve, M., Brook, M., Pankhurst, R. 1985. Calderas del Paleozoico Superior – Triásico Inferior y mineralización asociada en la cordillera de Domeyko, Norte de Chile. *Comunicaciones 35*: 53-57.

Deyell, C., Rye, R., Landis, G., Bissig, T., 2005. Alunite and the role of magmatic fluids in the Tambo high-sulfidation deposit, El Indio–Pascua belt, Chile. *Chemical Geology* 215 (2005) p. 185– 218.

Faure, G.1986. Principles of isotope geology. 2 ed. New York, John Wiley & Sons. Stratton Noller, Jay; Sowers, Janet; Lettis William. 2000. Quaternary Geochronology: methods and applications.

Gamonal, S. 2015. Volcanic Stratigraphy and Epithermal Mineralization of the La Coipa District, Maricunga belt, Chile. The University of British Columbia, Vancouver. 289 p. (Unpublished MSc. Thesis).

Gamonal, S., Bissig, T., Fletcher, D., Schroer, G., Den Boer, D., Jemielita, R. 2015. Oligocene to Miocene volcanic and hydrothermal history and revised early to middle Miocene Ag-Au mineralization ages of the La Coipa district, Maricunga belt. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, St 5, p. 137-140.

García, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. *Simposium sobre el Geosinclinal Andino 1962*, Sociedad Geológica de Chile: 138 p. Santiago, Chile.

Giggenbach, W. 1992. Magma degassing and mineral deposition in hydrothermal systems along convergent plate boundaries. *Economic Geology*, v. 87, p. 1927-1944.

Gutiérrez, A., Osorio, P. 2017. Informe Geológico y campañas de sondajes 2015-2017 en Proyecto Atlas-Titán, Franja de Gorbea, Chile. Informe interno para el Grupo de Exploraciones Chile de *Yamana Gold*, 158 p. (Sin publicar).

Gröpper, H., Calvo, M., Crespo, H., Bisso, C., Cuadra, W., Dunkerley, P., Aguirre, E. 1991. The Epithermal Gold-Silver Deposit of Choquelimpie, Northern Chile. *Economic Geology* Vol. 86, 1991, p. 1206-1221.

Hauff, P. 2005. Espectrometría de reflectancia aplicada. Spectral International, INC: 382 p. Colorado.

Halley, S., Dilles, J.H., and Tosdal, R.M., 2015. Footprints—Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits: Society of Economic Geologists (SEG) Newsletter, v. 100, pp. 1–17.

Heather, K.B., Diaz, D., 2000. El Indio–Tambo District regional geological mapping program 1997–1999, Barrick Chile, Internal company report, 2 Vol., La Serena, Chile.

Hedenquist, J.W., 1987. Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the Circum-Pacific basin: Transactions of the Fourth Circum Pacific Conference on Energy and Mineral Resources Conference, Singapore, American Association of Petroleum Geologists, p. 513–524.

Hedenquist, J., Richards, J., 1998. The influence of Geochemical Techniques on the Development of Genetic Models for Porphyry Copper Deposits. In Richards, J.P., and Larson, P.B. (eds.), Techniques in Hydrothermal Ore Deposits Geology: Reviews in Economic Geology, v.10, Ch.10, p. 235-256.

Hedenquist, J. W., Arribas, A., Jr., and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In Hagemann, S. G., and Brown, P. E., eds., Gold in 2000: Reviews in Economic Geology, 13, Society of Economic Geologists, p. 245-277.

Hemley, J.J., and Hunt, J.P., 1992. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock buffered systems: II. Some general geologic applications: Economic Geology, v. 87, p. 23-43.

Holley, E.A., 2012. The Veladero High-sulfidation Epithermal Au–Ag deposit, Argentina: Volcanic Stratigraphy, Alteration, Mineralization, and Quartz Paragenesis. Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 226 p. (Unpublished PhD thesis).

Holley, E., Bissig, T., Monecke, T. 2016. The Veladero High-Sulfidation Epithermal Gold Deposit, El Indio-Pascua Belt, Argentina: Geochronology of Alunite and Jarosite. Economic Geology, v. 111, p. 311-330.

Jannas, R.R., Bowers, T.S., Petersen, U., Beane, R.E., 1999. High-sulfidation deposit types in the El Indio district, Chile: Society of Economic Geologists Special Publication 7, p. 219–266.

Kinross, 2017. 2017 Annual Mineral Reserve and Resource Statement.

Lindgren, W. 1933. Mineral Deposits, 4th edition, New York, McGraw-Hill, 930 p.

Martin, M., Clavero, J., Mpodozis, C., Cuitiño, L. 1995. Estudio Geológico Regional de La Franja El Indio, Cordillera de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería; Compañía Minera San José. 238 p.

Mirasol Resources. 2014. News release: Mirasol Expands Targets at Atlas High-sulphidation Silver-gold Project in the Gorbea Belt, Chile.

<http://mirasolresources.com/mirasol-expands-targets-atlas-high-sulphidation-silver-gold-project-gorbea-belt-chile/> . Acceso 26 de febrero de 2014.

Merrihue, C. and Turner, G. (1966). Potassium - argon dating by activation with fast neutrons. *J. Geophysical Research*, 71, 2852 - 7.

Montero, M.C., Hongn, F., Seggiaro, R., Brod, J.A., Marret, R. 2010. Estratigrafía y geoquímica del volcanismo de composición intermedia (Mioceno Superior-Plioceno) en el extremo oriental de la Cordillera de San Buenaventura (Puna Austral). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67 (1), p. 112 – 129.

Mpodozis, C., Kay, S. M. 1990. Provincias magmáticas ácidas y evolución tectónica de Gondwana: andes Chilenos (28°-31° S). *Revista Geológica de Chile* 17: 153-180.

Mpodozis, C., Kay, S., Gardeweg, M. y Coira, B. 1996. Geología de la región de Ojos del Salado (Andes Centrales, 27° S): Implicancias de la migración hacia el este del frente volcánico Cenozoico Superior. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: p. 539-548, Buenos Aires.

Naranjo, J.A.; Cornejo, P. 1989. Avalanchas múltiples del volcán Chaco en el norte de Chile: un mecanismo de degradación de volcanes compuestos miocenos. *Revista Geológica de Chile* 16 (1): p. 61-72.

Naranjo, J.A.; Cornejo, P. 1992. Hoja Salar de la Isla. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 72, escala 1:250.000.

Naranjo, J.A.; Lara, L.E. 2002. Structural instability of volcanic edifices caused by differential shortening of the Central Andes during the Miocene. In Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra 2002. Simposio Internacional de la Interacción entre los volcanes y la base y sus riesgos geológicos asociados, Instituto Geográfico Militar. CD-ROM, Artículo y Resumen, 8 p.

Naranjo, J.A.; Paskoff, R. 1985. Evolución cenozoica del piedemonte andino en la Pampa del Tamarugal, Norte de Chile (18°-21°S). In 4 Congreso Geológico Chileno, No 4: 5 p. 149-165. Antofagasta.

Naranjo, J.A.; Puig, A. 1984. Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Atacama: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Nos. 62-63: 140 p., 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.

Naranjo, J.A.; Ramírez, C.F.; Paskoff, R. 1994. Morphostratigraphic evolution of the western margin of Salar de Atacama. *Revista Geológica de Chile* 21 (1): p. 91-104.

Naranjo, J.A., Villa, V., Venegas, C. 2013. Geología de las áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño, Regiones de Antofagasta y Atacama. Carta Geológica de Chile, Serie Geología básica, escala 1:100.000 N° 153 y 154, Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), 79 p.

Naranjo, J.; Ramírez, C., Villa, V. 2016. Geología de las áreas Cerro Panteón de Aliste y Cerro Colorado, Región de Atacama. Carta Geológica de Chile, Serie Geología básica, N° 185 y 186, Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), 1 mapa escala 1:100.000.

Páez, G., Permuy, C., Jovic, S., Guido, D., Osorio, J., Kasaneva, S. 2015. Depósitos hidromagmáticos en la Faja Paleocena de la Región de Antofagasta: Ejemplos del Distrito Minero El Guanaco. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, At 1, p. 207-210.

Ramos, V., Folguera, A. 2009. Andean flat-slab subduction through time. In: MURPHY, J. B., KEPPIE, J. D. & HYNES, A. J. (eds) *Ancient Orogens and Modern Analogues*. Geological Society, London, Special Publications, 327, p. 31–54.

Ross, A. 2014A. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology results for sample MCR0006218: alunite of Atlas Project. Reporte interno Mirasol Resources (sin publicar), 10 p.

Ross, A. 2014B. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology results for sample MCD0001879: alunite of Atlas Project. Reporte interno Mirasol Resources (Sin publicar), 12 p.

Rutter, N.; Coronato, A.; Helmens, K.; Rabassa, J.; Zárata, M. 2012. *Glaciations in North and South America from the Miocene to the Last Glacial Maximum*. Springer: 67 p. Dordrecht Heidelberg New York London.

Richards, J. P., Boyce, A.J., and Pringle, M. S., 2001. Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization: *Economic Geology*, v. 96, p. 271–305.

Salfity, J.A., 1985. Lineamientos transversales al rumbo andino en el noroeste Argentino: Congreso Geológico Chileno, IV, Antofagasta, agosto 1985, Part 2, p. 119–137.

Schoen, R., White, D.E., and Hemley, J.J., 1974. Argillization by descending acid at Steamboat Springs, Nevada: *Clays and Clay Minerals*, v. 22, p. 1-22.

Sillitoe, R.H., 1985. Ore breccias in volcanoplutonic arcs. *Economic Geology*, v. 80, p. 1467-1514.

Sillitoe, R.H., 1991. Gold Metallogeny of Chile - an Introduction. *Economic Geology* 86, p. 1187-1205.

Sillitoe, R.H., 1993. Epithermal models: Genetic types, geometrical controls and shallow features: *Geological Association of Canada Special Paper* 40, p. 403–417.

Sillitoe, R.H. 1995. Exploration of porphyry copper lithocaps, in Mauk, J.L., and St. George, J.D., eds., *Pacific Rim Congress 1995, Auckland, Proceedings: Parkville, Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, p. 527–532.

Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology* 105, p. 3–41.

Sillitoe, R.H., and Bonham, H.F., 1984. Volcanic landforms and ore deposits. *Economic Geology*, v. 79, p. 1286-1298.

Sillitoe, R.H., Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. In: Simmons, S.F., Graham, I. (Eds.), *Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes Within the Earth. Special Publication–Society of Economic Geologists* 10, p. 315–343.

Sillitoe, R.H., 2015. Epithermal paleosurfaces. *Mineralium Deposita*, v 50, p. 767-793.

Stoffregen, R.; Cygan, G. 1990. An experimental study of Na-K exchange between alunite and aqueous sulfate solutions. *American Mineralogist*, Vol. 75, p. 209-220.

Stoffregen, R. E., Alpers, C. N., Jambor, J. L. 2000. Alunite-jarosite crystallography, thermodynamics and geochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 40, p. 453–479.

Thompson, A.; Hauff, P.; and Robitaille, A. 1999. Alteration mapping in exploration: Application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy: Society of Economic Geologists Newsletter 39, p. 1, 16–27.

Trumbull, R.B.; Wittenbrink, R.; Hahne, K.; Emmermann, R.; Büsch, W.; Gerstenberger, H.; Siebel, W. 1999. Evidence for Late Miocene to Recent contamination of arc andesites by crustal melts in the Chilean Andes (25–26°S) and its geodynamic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 12, p. 135–155.

Turner, G. 1968. The distribution of potassium and argon in chondrites. In Ahrens, L.H. (ed.) *Origin and Distribution of the Elements*, New York: Pergamon, p.387-97.

Venegas, C., Cervetto, M., Astudillo, N., Espinoza, F. 2013. Carta Sierra Vaquillas Altas, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, 1 mapa escala 1:100.000. Serie Geología básica, N° 159, 88 p.

Walthier, T.N., Sirvas, E., and Areneda, R., 1985. The El Indio gold-silver-copper deposit: *Engineering and Mining Journal*, v. 186, p. 38-42.

Wörner, G., Harmon, R. S., Davidson, J., Moorbath, S., Turner, D. L., McMillan, H., Nye, C., Lopez-Escobar, L., Moreno, H., 1988. The Nevados de Payachata volcanic region (18° S/ 69° N Chile), I. Geological, geochemical, and isotopic observations: *Bull. Volcanology*, v. 50, p. 287-303.

ANEXOS

**$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Step-Heating Data for Run
14166-01; AT-27B**

Alunita

Analista: Luis Yáñez B.



Servicio Nacional
de Geología y
Minería

Santiago, 28 de mayo de 2018

Informe Ar/Ar 11/2018 MAP 215-50

Solicitante: Sr. Stephen Matthews
Yamana Chile servicios SPA

Muestra : **AT-27B**
Material : Alunita
N° interno : 14166-01

Análisis de Step Heating

Edad integrada: 20.56 ± 0.07 Ma.
Edad plateau: 20.58 ± 0.06 Ma.
Pasos en el plateau: 10/10 (100 % en el plateau)
MSWD plateau: 0.71

Análisis de Isócrona

Edad isócrona: 20.61 ± 0.07 Ma.
Pasos: 10/10 (Todos los pasos)
Intercepto 40/36: 295 ± 3
MSWD isócrona: 0.59

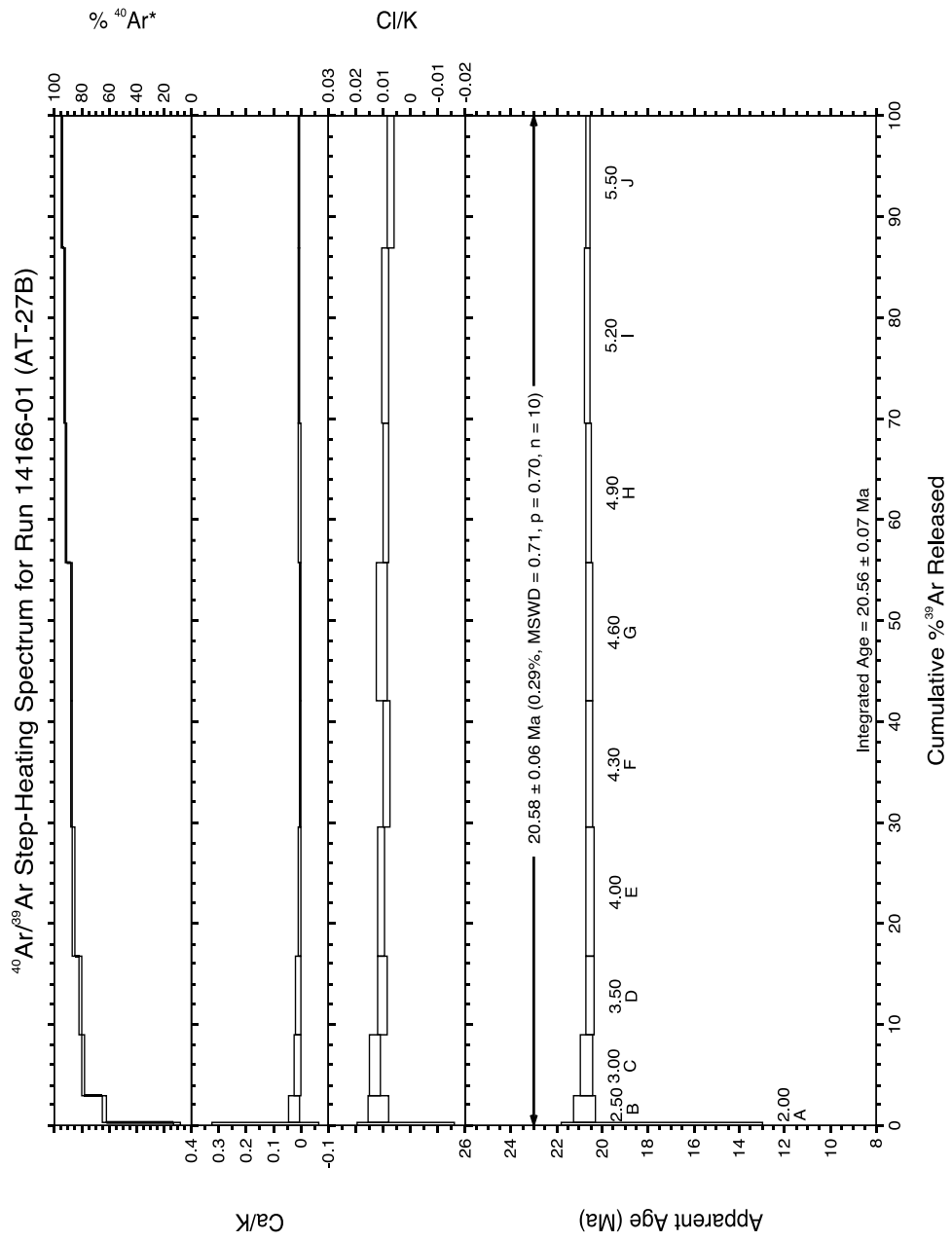
Comentarios:

Todos los valores obtenidos son concordantes. No se aprecia exceso de Ar. Se recomienda utilizar la edad obtenida con el plateau.

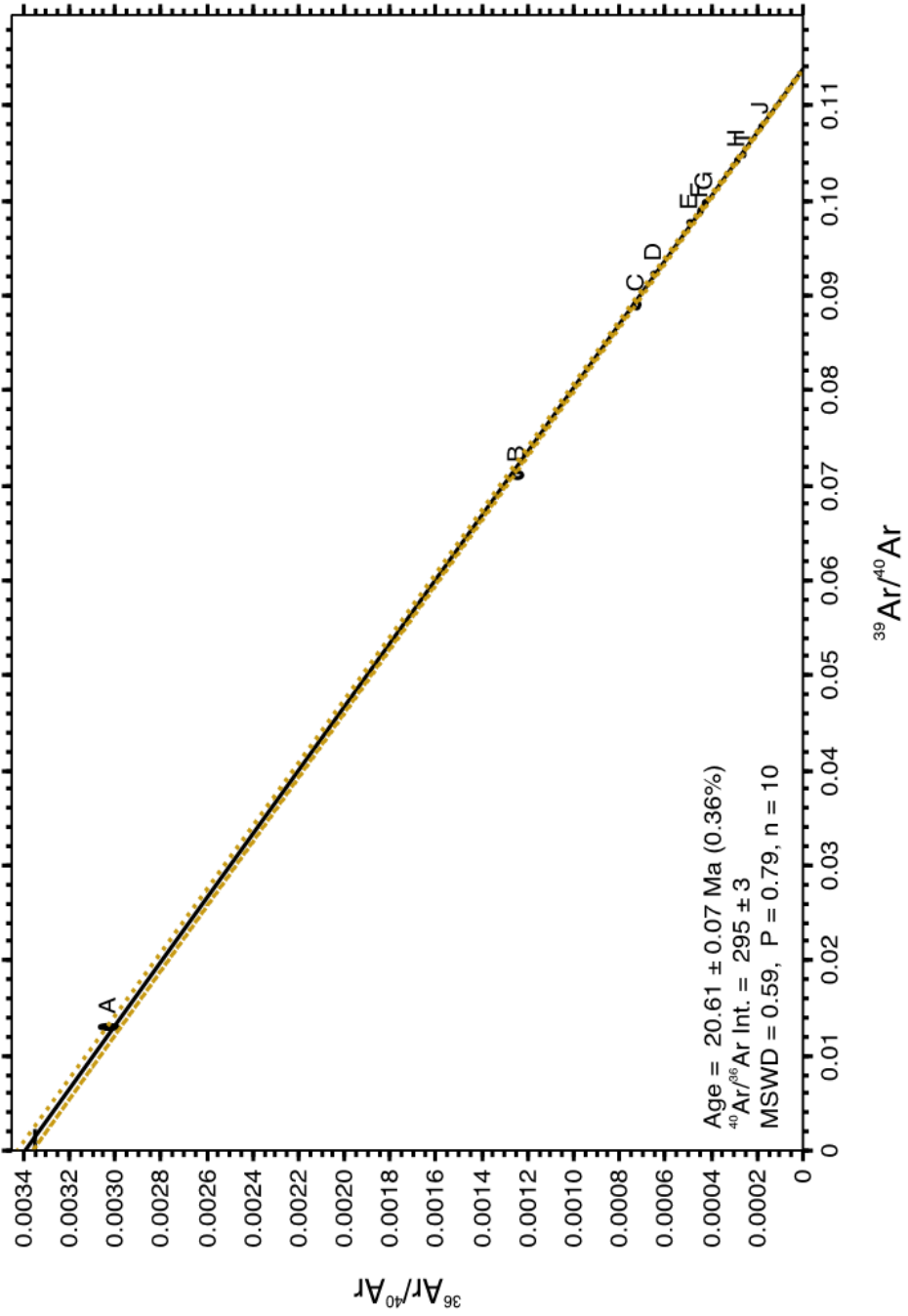
.....

Departamento de Laboratorios Servicio Nacional de Geología y Minería
Til Til 1993, Nuñoa - Santiago - FONOS: (56-2) 224963100 - www.sernageomin.cl
E-mail: jefe_lab@sernageomin.cl - Casilla: 10465 y 1347, correo 21- SANTIAGO - CHILE





Isochron for Run 14166-01 (AT-27B)



**$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Step-Heating Data for Run
14167-01; CLATDH0015 439.43**

Alunita

Analista: Luis Yáñez B.

Muestra : **CLATDH0015 439.43**
Material : Alunita
N° interno : 14167-01

Análisis de Step Heating

Edad integrada: 20.6 ± 0.3 Ma.
Edad plateau: **20.6 ± 0.2 Ma.**
Pasos en el plateau: 9/10 (99.1 % en el plateau)
MSWD plateau: 0.09

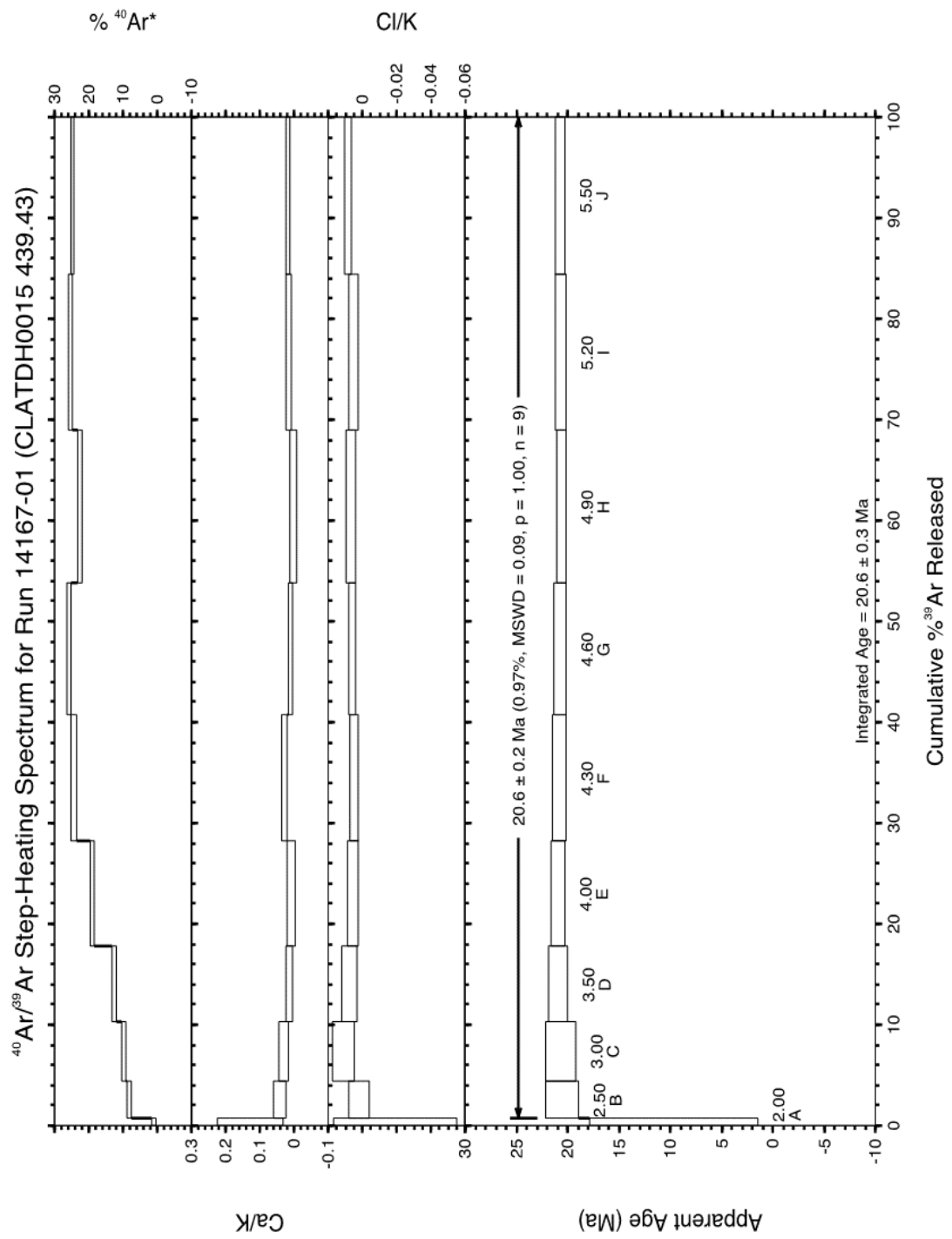
Análisis de Isócrona

Edad isócrona: 20.9 ± 0.4 Ma.
Pasos: 10/10 (Todos los pasos)
Intercepto 40/36: 297.4 ± 07
MSWD isócrona: 0.68

Comentarios:

Todos los valores obtenidos son concordantes. No se aprecia exceso de Ar. Se recomienda utilizar la edad obtenida con el plateau.

.....



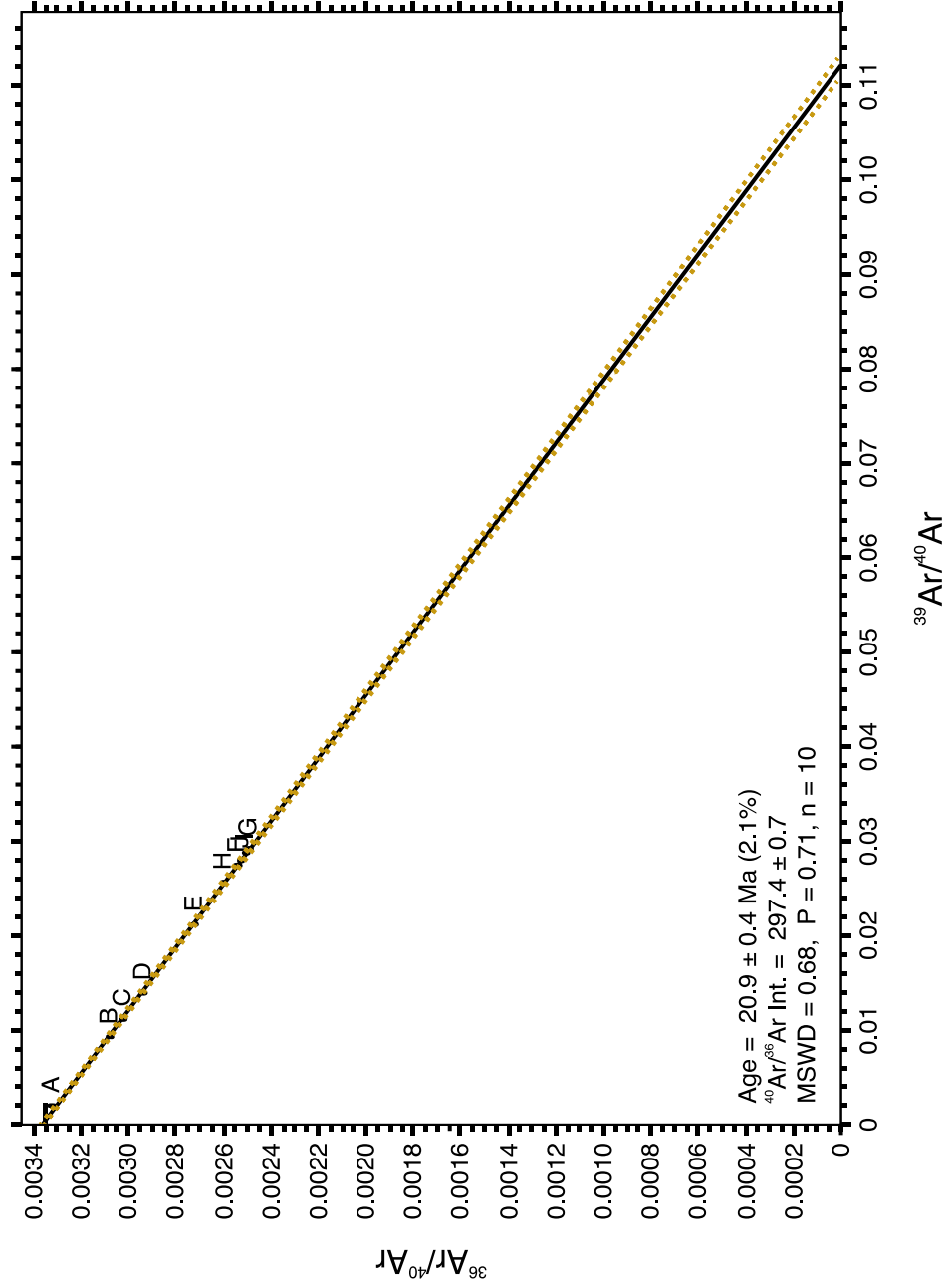
Step-Heating Information

Data

40Ar/39Ar Step-Heating Data for Run 14167-01; CLATDH0015 439.43

Run ID	Status	Reason	Watts	Ca/K	Cj/K	36Ar/39Ar	%36Ar(Ca)	40*Ar/39Ar	Mol 39Ar	% Step	Cum. %	%40Ar*	Age (Ma)	± Age
CLATDH0015 439.43, Run ID# 14167-01 (J = 0.0013083 ± 1.100000e-6):														
14167-01A	OK		2.00	0.125471	-0.019769	1.658498	0.0	4.06867	2.78e-15	0.9	0.9	0.8	9.57757	4.10704
*14167-01B	OK	Isomeric interference	2.50	0.039327	0.001515	0.331794	0.0	8.74193	1.19e-14	3.7	4.5	8.1	20.51594	0.80584
*14167-01C	OK	OK	3.00	0.027497	0.010639	0.271234	0.0	8.77852	1.88e-14	5.8	10.3	9.8	20.60132	0.70235
*14167-01D	OK	OK	3.50	0.012967	0.007189	0.211275	0.0	8.88253	2.45e-14	7.5	17.9	12.3	20.84401	0.48238
*14167-01E	OK	OK	4.00	0.006090	0.005290	0.128578	0.0	8.87405	3.4e-14	10.5	28.4	18.8	20.82421	0.32336
*14167-01F	OK	OK	4.30	0.025715	0.004527	0.092656	0.0	8.81318	4.05e-14	12.5	40.8	24.2	20.68219	0.32898
*14167-01G	OK	OK	4.60	0.007908	0.005514	0.085541	0.0	8.78782	4.22e-14	13.0	53.8	25.6	20.62303	0.29369
*14167-01H	OK	OK	4.90	0.000093	0.006346	0.101477	0.0	8.75436	4.94e-14	15.2	69.1	22.4	20.54495	0.2925
*14167-01I	OK	OK	5.20	0.014998	0.005106	0.087119	0.0	8.77437	5.01e-14	15.4	84.5	25.2	20.59163	0.26266
*14167-01J	OK	OK	5.50	0.015419	0.008272	0.090415	0.0	8.79818	5.02e-14	15.5	100.0	24.6	20.64719	0.25282
Integ. Age =									99.1			20.6	0.3	
(*) Plateau Age =														
Sample	Lab ID	Irrad.	Material	J	± J	Integ. n	Integ. Mol 39	Integ. Ca/K	± Integ. Ca/K	Integ. 40*/39K	± Integ. 40*/39K	Integ. % Rad	Integ. Age	2s SD
CLATDH0015 439.43	14167-01	203A	Alunita	0.00130828	0.0000011	10	3.25e-13	0.01464	0.00157	8.759014	0.073495	17.6	20.6	0.3
Plat. n	Plat. % Gas	Plat. Mol 39	Plat. MSWD	Plat. Prob.	Plat. Steps	Plat. (40Ar/36Ar)tr	Plat. ± (40Ar/36Ar)tr	Plat. Ca/K	Plat. ± Ca/K	Plat. Age	Plat. 2s MSE	Includes ±J		
9	99.1	3.22E-13	0.1	1	B-J	299	0.3	0.00058	0.02859	20.64189	0.2166618	TRUE		

Isochron for Run 14167-01 (CLATDH0015 439.43)



Isochron Information														
Run ID	Sample	J	± J	Ca/K	± Ca/K	40/36tr	MSE tr	Age	2s MSE	MSWD	Prob	n	% Gas	Steps
14167-01	CLATD0015 439.43	0.0013083	1.100000e-6	0	0.00561	297	0.7	20.938	0.44	0.682	0.708	10	0	-
Run ID	Status	40*Ar/39Ar	(36/40)isoch	%±	(39/40)isoch	%±	Correl	36/39	Group					
CLATD0015 439.43	OK	4.06867	0.0033221	0.4	0.00200	1.770	0.042	1						
14167-01A	OK	8.74193	0.0030778	0.3	0.00928	0.365	0.169	1						
14167-01B	OK	8.77852	0.0030218	0.4	0.01114	0.729	0.088	1						
14167-01C	OK	8.88253	0.0029360	0.3	0.01390	0.424	0.160	1						
14167-01D	OK	8.87405	0.0027205	0.3	0.02116	0.342	0.193	1						
14167-01E	OK	8.81318	0.0025401	0.5	0.02742	0.278	0.138	1						
14167-01F	OK	8.78782	0.0024919	0.5	0.02913	0.439	0.119	1						
14167-01G	OK	8.75436	0.0025986	0.3	0.02561	0.264	0.242	1						
14167-01H	OK	8.77437	0.0025045	0.4	0.02875	0.240	0.219	1						
14167-01I	OK	8.79818	0.0025261	0.4	0.02794	0.328	0.180	1						

Muestra	Nº Análisis	Material	Edad Integrada $\pm 2\sigma$	Edad Plateau $\pm 2\sigma$	Edad Isoc. Inversa $\pm 2\sigma$
AT-27B	14166-01	Alunita	20.56 \pm 0.07 Ma	20.58 \pm 0.06 Ma	20.61 \pm 0.07 Ma
CLATDH0015 439.43	14167-01	Alunita	20.6 \pm 0.3 Ma	20.6 \pm 0.2 Ma	20.9 \pm 0.4 Ma

Datos adicionales para Informe 11/2018 de Sr. Stephen Matthews

Razón 40/36 de argón atmosférico: 295.5 ± 0.5
MSWD aceptable: < 3

Se utiliza estándar Fish Canyon (FC, 28.201 Ma.) para interpolación en el cálculo de J.

Condiciones mínimas para el Plateau: 3 pasos consecutivos con concordancia de error a 2 sigma y por lo menos un 50% de Ar³⁹.

En el informe, los errores en las edades están expresados en el ámbito de dos sigmas de confiabilidad.

En los espectros de step-heating, los errores están expresados con dos sigmas de confiabilidad.

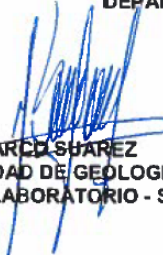
En las tablas de datos y el diagrama de isócrona inversa, los datos están expresados con un sigma de confiabilidad.

Cada tres o cuatro pasos se hicieron análisis de niveles de blancos, que permitieron ir corrigiendo los resultados posteriores.

Análisis realizado en espectrómetro de masas MAP 215-50, con Multiplicador de electrones y laser de CO₂.



LUIS YÁÑEZ BADILLA.
ANALISTA GEOLOGIA ISOTOPICA
DEPARTAMENTO LABORATORIO - SERNAGEOMIN



MARCELO SUÁREZ
VºBº JEFE (S) UNIDAD DE GEOLOGIA ISOTOPICA
DEPARTAMENTO LABORATORIO - SERNAGEOMIN