



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**DISTRIBUCIÓN Y OCURRENCIA DE ORO EN LOS DEPÓSITOS TIPO
PÓRFIDO COBRE-MOLIBDENO Y COBRE-ORO EN LOS PELAMBRES,
CHILE CENTRAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

NELSON JOSÉ ROMÁN MORAGA

PROFESOR GÚIA:
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
KATJA DECKART
VICTOR MAKSAEV JURCHUC

Este trabajo ha sido financiado por Minera Los Pelambres

**SANTIAGO DE CHILE
2013**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Nelson José Román Moraga
FECHA: Diciembre 2013
PROFESOR GUÍA: Brian Townley Callejas

DISTRIBUCIÓN Y OCURRENCIA DE ORO EN LOS DEPÓSITOS TIPO COBRE-MOLIBDENO Y COBRE-ORO EN LOS PELAMBRES, CHILE CENTRAL

El conjunto Los Pelambres-Frontera, ubicado en Chile central, a 190 km al norte de Santiago, es un sistema de pórfido gigante, de edad Mioceno tardío - Plioceno temprano, conformado por el depósito tipo pórfido Cu-Mo Los Pelambres y por el depósito tipo pórfido cuprífero Frontera. En este trabajo se presenta un estudio de la distribución y ocurrencia de Au en ambos pórfidos, aspectos que no han sido explorados en detalle con anterioridad.

El presente estudio tiene dos líneas de trabajo principales: la primera es el estudio de información sobre Au de previa disposición, mientras que la segunda es un plan de muestreo que incluye análisis químicos y mineralógicos. Se realizaron, entre otros, análisis de Au en separados de minerales de interés.

Los resultados muestran que la distribución espacial de Au no es homogénea. En Los Pelambres, se reconocen al menos tres zonas anómalas de Au ($[Au] \geq 0,1$ ppm): Zona Anómala Noreste-Este (ZANE-E), Zona Anómala Fondo Mina (ZAFM) y Zona Anómala Sureste (ZASE). En Frontera, se reconoce una zona anómala, Zona Frontera, que es de dimensiones y leyes de Au mayores a las anomalías de Los Pelambres. La distribución espacial de Au no es controlada por procesos supérgenos ni por alteración hidrotermal en Los Pelambres-Frontera.

Se definen tres ambientes de mineralización de Au: (1) oro de alteración potásica con mineralización de bornita y calcopirita, el cual comprende la mayor parte de las zonas anómalas antes mencionadas, y en el cual el oro está asociado principalmente a bornita (como partículas de Au nativo y en solución sólida), y en menor medida, a calcopirita, molibdenita y magnetita; (2) oro de alteración cuarzo-sericítica con mineralización de calcopirita y pirita, ambiente en el cual Au está asociado, como partículas de Au nativo y electrum, a calcopirita, pirita y ganga; y (3) oro en niveles lixiviados y de enriquecimiento supérgeno, donde el oro, inicialmente de los ambientes anteriores, pasa a estar asociado, en niveles lixiviados, a óxidos e hidróxidos de Fe o Mn, y en niveles de enriquecimiento supérgeno, a calcosina y covelina (como partículas de Au nativo o electrum). Aunque no se detectaron partículas libres de Au nativo en Los Pelambres-Frontera, este tipo de ocurrencia no se descarta.

Se plantea que la introducción de Au a los depósitos estuvo ligada a fluidos mineralizadores asociados principalmente a episodios de intrusión de Pórfido A y de formación de brechas hidrotermales asociadas. Se propone que Au precipitó debido a saturación, por procesos de enfriamiento y por reducción en fS_2 por precipitación de sulfuros, en etapas de alteración hidrotermal tempranas (alteración potásica) relacionadas, a su vez, a eventos de vetillas tempranas T4 y A.

Agradecimientos

En primer lugar, doy las gracias a Brian Townley, mi Profesor Guía, quien me apoyó durante todo el progreso de la realización de esta memoria, con ideas innovadoras, consejos técnicos, retroalimentación y, sobretodo, con la confianza para llevar a cabo con éxito el trabajo.

A Merrill Garay, quien fue mi tutor en Los Pelambres. Todos los modelos tridimensionales usados para este informe, acceso a bibliografía del depósito, gestiones para realización de mapeo de sondajes, preparación de muestras y transporte de las mismas, se las debo a él. A Merrill también agradezco por haberme dado la confianza y libertad para poder llevar a cabo las ideas que me había propuesto para lograr los objetivos planteados. También, por su constante disposición para con temas de la investigación, y por su aporte de ideas.

A Felipe Ibarra, por sus sugerencias sobre tratamiento estadístico de datos. A Alfonso Andía, por su invaluable ayuda respecto a aspectos de protocolos de muestreos, análisis a realizar e interés en el presente estudio. A Alfonso debo las gestiones para poder llevar a cabo estudios con Brockway y Franquesa, aportes de suma relevancia en este trabajo. También doy las gracias a Roberto Escuti, de Alfred H. Knight, por haber preparado las muestras a la perfección.

A Ramón Briones y Eduardo Mondaca (Cacho), quienes fueron de valor inestimable respecto al trabajo con bases de datos de Los Pelambres. A Lino Dávila, por su asistencia a llevar las muestras a Santiago, siendo que ni siquiera pertenece al área de Geología.

A mis amigos de Los Pelambres, Eduardo Gómez y Lucila Barraza, quienes desinteresadamente se preocuparon por mí, ayudándome con la vestimenta apropiada para estar en la mina, con el transporte, y siendo compañía amable y cariñosa en el día a día de Los Pelambres, al igual que Ramón y Cacho.

Les doy mis más sinceros agradecimientos a Juan Vargas (Juanito) y a Roberto Valles, por haber efectuado la separación de minerales contemplada en el presente estudio, y haber dado prioridad a las muestras, siempre con la mejor disposición.

Por supuesto, finalmente, esta página carecería de sentido si no agradezco a quienes me han dado el soporte fundamental durante mi vida, y especialmente durante mi estadía durante la Universidad: agradezco profundamente a José Manuel, Yolanda y Ángeles: mi padre, madre y hermana, respectivamente.

Tabla de contenido

Índice de tablas	IX
Índice de figuras	XI
1. Introducción	1
1.1. Ubicación y Acceso	1
1.2. Generalidades	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivos Específicos	3
2. Marco Geológico	5
2.1. Marco geológico regional	5
2.1.1. Rocas estratificadas	5
2.1.2. Rocas no estratificadas	8
2.2. Marco geológico distrital: Los Pelambres-Frontera	8
2.2.1. Rocas de caja	8
2.2.2. Rocas Intrusivas	9
2.2.3. Geocronología	14
2.2.4. Estructuras	15

2.2.5.	Alteración Hidrotermal	16
2.2.6.	Mineralización	18
2.3.	Oro en Los Pelambres-Frontera – Trabajos Previos	23
3.	Marco Teórico	26
3.1.	Oro en depósitos tipo pórfido cuprífero	26
3.1.1.	Origen del oro	26
3.1.2.	Relaciones entre oro y otras características geológicas	26
3.1.3.	Ocurrencia de oro en pórfidos cupríferos	27
4.	Metodologías	29
4.1.	Bases de datos	29
4.1.1.	Base de Datos Nueva (BDN)	30
4.1.2.	Base de Datos Histórica (BDH)	31
4.1.3.	Base de Datos Integrada (BDI)	31
4.1.4.	Comparación entre BDH y BDN	31
4.1.5.	Robustecimiento de las bases de datos	33
4.2.	Sistema de coordenadas	34
4.3.	Metodologías para análisis univariable y espacial de Au	34
4.4.	Metodologías para análisis de correlación bivariable de Au	35
4.5.	Metodologías para comparación de Au y mineralogía, litología, alteración hidrotermal y vetillas	36
4.6.	Metodologías para caracterización geológica de zonas anómalas de Au	38
4.7.	Plan de muestreo y análisis químicos y mineralógicos	38
4.7.1.	Muestras de protocolo AU1	39

4.7.2.	Muestras de protocolo AU2	39
4.7.3.	Separación de minerales de interés y posterior análisis químico por Au	42
4.7.4.	Análisis mineralógico modal	43
4.7.5.	Análisis químicos de Au-Ag y litogeoquímica	43
4.7.6.	Estudio de partículas de minerales de Au	44
5.	Distribución y ocurrencia de Au en Los Pelambres-Frontera	45
5.1.	Distribución espacial de Au en Los Pelambres - Frontera	45
5.1.1.	Distribución espacial de Au – BDN	45
5.1.2.	Distribución espacial de Au – BDH y BDN integradas	49
5.1.3.	Mapa de isopleyas de Au y zonas anómalas	53
5.1.4.	Definición y construcción de sólidos de Au “alto”	55
5.2.	Análisis de correlación bivariante de Au	56
5.2.1.	Análisis de correlación bivariante de Au – BDI	57
5.2.2.	Análisis de correlación bivariante de Au – otras bases de datos	60
5.2.3.	Análisis de correlación bivariante de Ag – BDI	62
5.3.	Relación entre zonas anómalas de Au y abundancia de sulfuros	63
5.3.1.	Au y sulfuros hipógenos	64
5.3.2.	Au y sulfuros supérgenos	66
5.3.3.	Au y horizontes supérgenos	66
5.3.4.	Au y razones entre minerales	70
5.3.5.	Ag y mineralogía de sulfuros	72
5.3.6.	Síntesis	74
5.4.	Relación entre zonas anómalas de Au y litología	75

5.4.1.	Au y litología: comparación gráfica	75
5.4.2.	Au y litología: comparación usando modelo de bloques	78
5.4.3.	Ag y litología	78
5.4.4.	Síntesis	81
5.5.	Relación entre zonas anómalas de Au y alteración hidrotermal	81
5.5.1.	Au y alteración hidrotermal	81
5.5.2.	Ag y alteración hidrotermal	84
5.6.	Relación entre zonas anómalas de Au y vetillas	85
5.7.	Caracterización geológica de zonas anómalas de Au	89
5.7.1.	Frontera	89
5.7.2.	Fondo Mina (ZAFM)	91
5.7.3.	ZANE-E	93
5.7.4.	ZASE	95
5.7.5.	Otras zonas anómalas	96
5.7.6.	Zonas con oro bajo y alta bornita	97
5.8.	Análisis químicos y mineralógicos	98
5.8.1.	Estudio de separados de minerales	99
5.8.2.	Estudio de partículas minerales de Au	105
5.8.3.	Otros estudios sobre ocurrencia de Au en Los Pelambres-Frontera . . .	108
6.	Discusiones	111
6.1.	Ambientes de mineralización de Au en Los Pelambres – Frontera	111
6.1.1.	Oro de alteración potásica con mineralización de bornita + calcopirita	111
6.1.2.	Oro de alteración cuarzo-sericítica con mineralización de calcopirita + pirita	113

6.1.3.	Oro en horizontes lixiviados y de enriquecimiento supérgeno	113
6.2.	Incorporación de Au a Los Pelambres – Frontera	114
6.2.1.	Pórfidos interminerales y centros hidrotermales no ligados a oro alto .	115
6.3.	Mecanismos de transporte y precipitación de Au en Los Pelambres – Frontera	115
6.4.	Otros controles sobre Au en Los Pelambres-Frontera	118
6.4.1.	Posible control litológico del stock Los Pelambres sobre contenidos de Au en Los Pelambres	118
6.4.2.	Posible control estructural - litológico en la ZASE y porción sur de la ZANE-E	118
7.	Conclusiones y Recomendaciones	119
7.1.	Conclusiones	119
7.2.	Recomendaciones	120
8.	Bibliografía	122
9.	Anexos	127
9.1.	Anexo A: Controles fisicoquímicos en el transporte y precipitación de Au, y su relación con sulfuros en depósitos minerales	127
9.1.1.	Ocurrencias de oro	128
9.1.2.	Oro en solución	128
9.1.3.	Implicancia en la precipitación de sulfuros	132
9.2.	Anexo B: Oro en depósitos tipo pórfido cuprífero	135
9.2.1.	Generalidad	135
9.2.2.	Origen del oro	135
9.2.3.	Relaciones entre oro y otras características geológicas	135
9.2.4.	Ocurrencia de oro en pórfidos cupríferos	136

9.3. Anexo C: Control de calidad de análisis químicos – mineralógicos	138
9.3.1. Control de calidad: Au-Ag en roca total	139
9.3.2. Control de calidad: Cu-Mo en roca total	139
9.3.3. Control de calidad: Au en separados de minerales	141
9.3.4. Control de calidad: Análisis mineralógico modal mediante briquetas .	141
9.3.5. Conclusiones	141
9.4. Anexo D: Certificados de análisis de materiales de referencia	142
9.5. Anexo E: Resultados completos análisis litogeoquímica	145
9.6. Anexo F: Análisis composicional de partículas minerales de Au y Ag, por microsonda electrónica	148
9.6.1. Muestra NRM-F-21	148
9.6.2. Muestra NRM-F-22	149

Índice de tablas

4.1. Datos de muestras analizadas por Au, según base de datos.	29
4.2. Correlación general entre datos próximos (< 30 metros) de BDN y BDH, para concentraciones de Au y Ag.	32
5.1. Datos estadísticos BDN	46
5.2. Datos estadísticos BDI	50
5.3. Rangos de abundancia mineral para sulfuros de interés.	63
5.4. Muestras para separación de minerales - Protocolo AU1	100
5.5. Muestras para estudio de partículas de Au-Ag - Protocolo AU2	101
5.6. Resultados de análisis químicos y de composición mineralógica de 23 muestras del presente estudio.	102
5.7. Leyes de Au de separados de minerales.	104
5.8. Productos de concentración gravitacional mediante mesa, parte del estudio de partículas minerales de Au. Se incluyen leyes de Au de cada producto.	107
5.9. Detalle de partículas minerales de Au/Ag halladas en este estudio.	107
5.10. Composición mineralógica de muestras del trabajo de ALS Metallurgy - Kamloops (2013).	109
5.11. Concentraciones de elementos químicos de interés de muestras del trabajo de ALS Metallurgy - Kamloops (2013).	109
5.12. Ley de Au en concentrados de muestras del trabajo de ALS Metallurgy - Kamloops (2013), y número de partículas de Au halladas en cada muestra (“Ocurrencias Au”).	109

5.13. Ley de Ag en concentrados de muestras del trabajo de ALS Metallurgy - Kamloops (2013), y número de partículas de Ag halladas en cada muestra (“Ocurrencias Ag”).	109
9.1. Número de muestras para control de calidad, por cada estudio contemplado en el estudio de Au en Los Pelambres-Frontera.	138
9.2. Coeficientes de variación de análisis considerados para control de calidad. . .	139
9.3. Muestras para control de calidad de análisis de Au y Ag en roca total. . . .	140
9.4. Muestras para control de calidad de análisis de Cu y Mo en roca total. . . .	140
9.5. Muestra para control de calidad de análisis de Au en separados de minerales.	141
9.6. Muestras para control de calidad de análisis mineralógico modal mediante briquetas.	141
9.7. Resultados análisis litogeoquímica ICP-HF39 (digestión cuatro ácidos – lectura ICP-AES). Tabla 1 de 2.	145
9.8. Resultados análisis litogeoquímica ICP-HF39 (digestión cuatro ácidos – lectura ICP-AES). Tabla 2 de 2.	146
9.9. Resultados análisis litogeoquímica ICP-FP12 (fusión alcalina con Na_2O_2 – lectura ICP-AES).	147

Índice de figuras

1.1. Ubicación Los Pelambres. Tomado de Atkinson et al. (1996)	2
1.2. Rajo de Mina Los Pelambres, visto desde cercanías de Botadero Ladera Sur .	3
2.1. Franja de pórfidos cupríferos de edad Mioceno tardío – Plioceno temprano de Chile central.	6
2.2. Mapa geológico regional del área de Los Pelambres.	7
2.3. Mapa geológico distrital de Los Pelambres-Frontera.	10
2.4. Vista en planta de sección definida a una elevación de 3080, a partir de Modelo litológico de Los Pelambres-Frontera	11
2.5. Litologías presentes en Los Pelambres-Frontera.	14
2.6. Mapa de alteración hidrotermal de Los Pelambres-Frontera.	17
2.7. Mapas de intensidad de vetillas, tomados de Perelló et al. (2012).	20
2.8. Algunas vetillas importantes de Los Pelambres-Frontera.	22
2.9. Distribución espacial de oro de Los Pelambres-Frontera, según Brockway et al. (2008).	25
4.1. Ubicación de collares de sondajes de bases de datos en Los Pelambres-Frontera.	30
4.2. Correlación “muestra a muestra” entre datos próximos de BDN y BDH, para concentraciones de Au y Ag.	32
4.3. Criterio de separación de BDI en bases de datos de Los Pelambres y Frontera.	36
4.4. Protocolo de preparación mecánica AU1.	40

4.5. Protocolo de preparación mecánica AU2.	41
4.6. Equipamiento del Laboratorio de Separación de Minerales del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.	42
5.1. Gráficos de análisis univariable de Au – BDN.	46
5.2. Vista en planta de datos de concentración de Au y Ag - BDN.	47
5.3. Vista hacia el N de datos de concentración de Au - BDN.	48
5.4. Vista hacia el W de datos de concentración de Au - BDN.	48
5.5. Distribución univariable de Ag – BDN.	49
5.6. Gráficos de análisis univariable de Au – BDI.	50
5.7. Vista en planta de datos de concentración de Au y Ag - BDI.	51
5.8. Vista hacia el N de datos de concentración de Au - BDI.	52
5.9. Vista hacia el W de datos de concentración de Au - BDI.	52
5.10. Gráficos de distribución univariable de Ag – BDI.	53
5.11. Mapa de isopleyas de Au, de Los Pelambres-Frontera.	54
5.12. Sólidos de Au – Ag altos.	55
5.13. Diagramas de dispersión de Au respecto a elementos químicos de interés. Datos de BDI (Los Pelambres-Frontera).	58
5.14. Diagramas de dispersión de Au respecto a elementos químicos de interés, con indicación de densidad de datos. Datos de BDI (Los Pelambres-Frontera).	59
5.15. Perfil visto hacia el N de muestras correspondientes a Frontera. Puntos rojos corresponden a datos que siguen la tendencia indicada con línea segmentada azul en la Figura 5.13B	59
5.16. Diagramas de dispersión de Au respecto a elementos químicos de interés. Datos de BDN (no incluye Frontera).	60
5.17. Diagramas de dispersión de Au respecto a elementos químicos de interés, con indicación de densidad de datos, de datos del sector Frontera.	61

5.18. Diagramas de dispersión de Ag respecto a elementos químicos de interés, con indicación de densidad de datos. Datos de BDI (Los Pelambres-Frontera). . .	62
5.19. Comparación espacial entre sólidos de Au alto y sólidos de abundancia mineral de sulfuros primarios, vista en planta.	64
5.20. Comparación espacial entre sólidos de Au alto y sólidos de abundancia mineral de sulfuros, vista isométrica.	65
5.21. Comparación espacial entre sólidos de Au alto y sólidos de abundancia mineral de pirita alta, vista en planta.	67
5.22. Comparación espacial entre sólidos de Au alto y horizontes supérgenos. . . .	68
5.23. Leyes de Au, Ag y Cu a lo largo de sondaje MAM025 de Frontera.	69
5.24. Comparación espacial entre sólidos de Au alto y bloques que representan abundancia relativa entre bornita y calcopirita.	70
5.25. Comparación espacial entre sólidos de Ag alto y sólidos de abundancia mineral de sulfuros primarios, vista en planta.	71
5.26. Comparación espacial entre sólidos de Ag alto y sólidos de abundancia mineral de sulfuros, vista isométrica.	72
5.27. Comparación espacial entre sólidos de Ag alto y horizontes supérgenos. . . .	73
5.28. Modelos de litología de roca caja y alteración hidrotermal del conjunto Los Pelambres-Frontera, en comparación con sólidos de Au alto.	76
5.29. Distribución espacial de Pórfido D y litologías interminerales en Los Pelambres-Frontera, y comparación con sólidos de Au alto.	77
5.30. Datos estadísticos de litología, a partir de modelo de bloques, para bloques con concentración de Au $\geq 0,05$ ppm.	79
5.31. Modelos de litología de roca caja y alteración hidrotermal del conjunto Los Pelambres-Frontera, en comparación con sólidos de Ag alto.	80
5.32. Datos estadísticos de litología -ley promedio Ag por litología, y abundancia relativa de bloques-, a partir de modelo de bloques, para bloques con concentración de Ag ≥ 1 ppm.	82
5.33. Datos estadísticos de alteración hidrotermal, a partir de modelo de bloques, para bloques con concentración de Au $\geq 0,05$ ppm.	83

5.34. Datos estadísticos de alteración hidrotermal -ley promedio Ag por alteración, y abundancia relativa de bloques-, a partir de modelo de bloques, para bloques con concentración de Ag ≥ 1 ppm.	84
5.35. Superposición de sólidos de Au alto a mapa de intensidad de vetillas de Perrelló et al. (2012)	85
5.36. Ley promedio de Au-Ag respecto a rangos de frecuencia de vetillas en Los Pelambres-Frontera.	86
5.37. Ley promedio de Au-Ag respecto a frecuencia de vetillas en Los Pelambres-Frontera. Vetillas agrupadas en A+B y ED+D. Se han filtrado los datos a Au $\geq 0,05$ ppm y Ag ≥ 1 ppm, para estudio exclusivo dentro de zonas anómalas.	87
5.38. Diagramas de dispersión de Au versus número de vetillas, utilizando la información disponible en BDI.	88
5.39. Ubicación de sondajes empleados para realizar caracterización geológica de zonas anómalas de Au en Los Pelambres-Frontera.	90
5.40. Testigos de sondaje Zona Anómala Frontera, diámetro HQ.	92
5.41. Aspecto general de testigos de sondaje de ZAFM y ZANE-E.	94
5.42. Testigos de sondaje ZASE, diámetro HQ.	96
5.43. Aspecto de algunas rocas no pertenecientes a las cuatro zonas anómalas definidas para oro.	97
5.44. Gráficos de análisis de correlación bivariable entre concentraciones de Au y otros elementos químicos o abundancias minerales. Datos obtenidos en este estudio.	103
5.45. Gráficos de análisis de correlación bivariable entre concentraciones de Ag y otros elementos químicos o abundancias minerales. Datos obtenidos en este estudio.	106
5.46. Partículas halladas en el estudio de partículas minerales de Au, de este trabajo.	107
5.47. Partícula de electrum en asociación con pirita (py) y ganga (gn). Muestra 66. Tomada de ALS Metallurgy - Kamloops (2013).	108
6.1. Calcosina como reemplazo selectivo de bornita y calcopirita. Sector Frontera.	114
6.2. Condiciones de formación de Zona Frontera, y solubilidad de Au (ppb) respecto a ellas, en función de pH y fO_2	116

9.1. Solubilidad y especiación de Au (en términos de molalidad, m , y ppb) a 1 kbar, como función de temperatura, para una solución acuosa conteniendo 1,5 m NaCl y 0,5 m KCl, con buffer pH dado por la asociación feldespato-K - muscovita - cuarzo.	130
9.2. Solubilidad de Au (ppb) en función de pH y fO_2 , para una solución conteniendo 1 m NaCl y $(\sum S)=0,01$ m, a 500 bar y 250°C.	131
9.3. Certificado de Análisis de material de referencia Cu187 (estándar secundario). Página 1 de 2.	142
9.4. Certificado de Análisis de material de referencia Cu187 (estándar secundario). Página 2 de 2.	143
9.5. Certificado de Análisis de material de referencia AuBlank58 (blanco).	144
9.6. Imagen de Rayos X de la zona que contiene partícula de oro. Muestra NRM-F-21	148
9.7. Gráfico de composición de partícula de oro nativo de la muestra NRM-F-21.	149
9.8. Imagen de Rayos X de la zona que contiene pequeña partícula de plata nativa libre. Muestra NRM-F-22.	150
9.9. Gráfico de composición de partícula de plata nativa de la muestra NRM-F-22.	151

Capítulo 1

Introducción

El conjunto Los Pelambres-Frontera comprende dos depósitos contiguos tipo pórfido Cu: Los Pelambres, Cu-Mo, y Frontera, definido por Perelló et al. (2009, 2012) como Cu-Au. Cabe notar que Frontera se clasifica formalmente como pórfido Cu-Mo, según las clasificaciones de Sillitoe (1979); Cox y Singer (1988); Kirkham y Sinclair (1995) y la clasificación propuesta por Kesler et al. (2002), usando leyes de Frontera publicadas en Perelló et al. (2009) en adición a información contenida en el trabajo de Brockway et al. (2008): 0,52 % Cu, 0,1 g/t Au y 63 ppm Mo, usando una ley de corte de 0,4 % Cu. El descubrimiento de Frontera es reciente (Brockway et al., 2008; Perelló et al., 2009). Este conjunto, junto al depósito tipo pórfido Cu-Mo El Pachón, ubicado al SE de Los Pelambres-Frontera, en Argentina, conforman el cluster Los Pelambres-El Pachón.

En este estudio se presentan los resultados de investigación sobre la distribución y ocurrencia de Au en Los Pelambres-Frontera, aspectos que no han sido explorados en detalle con anterioridad. El estudio de distribución y ocurrencia de Au en Los Pelambres-Frontera tiene por finalidad generar información a ser considerada, eventualmente, en la planificación minera de Los Pelambres, y además, servir como guía a procesos de metalurgia, en relación a procesos de recuperación del elemento.

1.1. Ubicación y Acceso

El sistema Los Pelambres-Frontera se ubica en Chile Central, a 190 km al norte de Santiago, justo al oeste de la frontera entre Chile y Argentina (Fig. 1.1). Se puede acceder por tierra, utilizando la ruta 5 norte y luego tomando desvío hacia el este, por camino pavimentado, desde Los Vilos (ruta D-85) o Huentelauquén (ruta D-75). El camino pasa por Salamanca, y finalmente se llega a destino siguiendo la ruta D-835. Minera Los Pelambres cuenta con un aeródromo, por lo que acceso mediante avión también es posible.



Figura 1.1: Ubicación Los Pelambres. Tomado de Atkinson et al. (1996)

1.2. Generalidades

Los Pelambres-Frontera es clasificado como un sistema de pórfido gigante (Perelló et al., 2012), debido a su recurso actual de 6.165 Mt a 0,56 % Cu y 0,011 % Mo, estimado a una ley de corte de 0,35 % Cu (Perelló et al., 2011). El depósito Los Pelambres se explota mediante rajo abierto (Fig. 1.2). Los Pelambres-Frontera pertenece a Minera Los Pelambres (Antofagasta Minerals S.A.) en un 60 %, y a un consorcio japonés en un 40 %. Actualmente en la explotación se extraen 160.000 toneladas de mineral al día, con un promedio de 0,76 % Cu y 0,019 % Mo (Perelló et al., 2012). La operación minera en Los Pelambres produce concentrado de Cu y concentrado de Mo, obtenido mediante flotación convencional de sulfuros. El depósito Frontera aún no ha sido explotado. En el trabajo de Perelló et al. (2011) se reporta un recurso para Frontera (ya considerado en el recurso antes expuesto) de 700 Mt a 0,52 % Cu y 0,1 ppm Au, estimado a una ley de corte de 0,4 % Cu.

Los concentrados de Cu producidos en Los Pelambres contienen otros elementos químicos que pueden ser perjudiciales para la comercialización de los mismos, por ejemplo, arsénico; y otros elementos que pueden ser considerados como subproductos, como oro y plata. En este mismo sentido, en 2010 fueron producidas 35.000 oz de Au de la explotación de Los Pelambres (Perelló et al., 2012). Algunos estudios en Los Pelambres-Frontera tratan, en parte, la distribución y ocurrencia de oro en el sistema (Brockway et al., 2008; Perelló et al., 2009, 2011, 2012), pero el tema no ha sido explorado en detalle. Todo lo antes expuesto motiva el presente trabajo, y los objetivos planteados a continuación.



Figura 1.2: Rajo de Mina Los Pelambres, visto desde cercanías de Botadero Ladera Sur (entre Los Pelambres y Frontera). Fotografía tomada por Kosuke Morioka.

1.3. Objetivos

El presente trabajo tiene por objetivo principal determinar la distribución y ocurrencia de oro en los depósitos tipo pórfido cuprífero de Los Pelambres, específicamente en el depósito tipo pórfido Cu-Mo Los Pelambres, y el depósito contiguo tipo pórfido Cu-Au Frontera.

1.3.1. Objetivos Específicos

- Visualizar y estudiar la distribución espacial de Au, así como también las relaciones entre el oro y otros elementos químicos y minerales de interés en Los Pelambres-Frontera. En particular, explorar la relación entre ocurrencias de oro y plata, y sus posibles controles.
- Determinar la relación entre la distribución de oro y la alteración hidrotermal presente en los depósitos. Asimismo, estudiar la ocurrencia de oro relacionada a las zonas generadas por procesos supérgenos.

- Investigar la relación entre el contenido de oro y las distintas litologías comprendidas en los depósitos en estudio.
- Estudiar posible relación entre contenido de Au y tipos e intensidad de vetillas en el yacimiento.
- Analizar la concentración total de oro en sulfuros y otros minerales primarios, en específico: bornita, calcopirita, pirita, molibdenita, magnetita, y otros minerales de interés asociados a los depósitos antes mencionados. En este mismo sentido, estudiar cualitativamente la ocurrencia de Au en estos minerales asociado a la estructura cristalina, es decir, como solución sólida en el mineral; y/o como inclusiones (partículas) de Au nativo.
- Detectar, si es que existiesen, minerales de oro en Los Pelambres-Frontera.

Capítulo 2

Marco Geológico

Los depósitos de pórfido cuprífero Los Pelambres y Frontera pertenecen a la franja de pórfidos cupríferos de edad Mioceno tardío – Plioceno temprano (12 – 4 Ma) de Chile central (Maksaev et al., 2007; Fig. 2.1), la cual está inserta, a su vez, en la Franja Metalogénica del Neógeno (Maksaev, 2001). La franja se extiende por aproximadamente 400 km, entre latitudes 31° y 35°S (Perelló et al., 2013), y es la más oriental de Chile (Maksaev, 2001). Algunos depósitos minerales pertenecientes a la franja presentan complejos de brechas hidrotermales como característica en común: es el caso de Los Pelambres-Frontera, Río Blanco-Los Bronces y El Teniente (Skewes y Stern, 1994).

2.1. Marco geológico regional

La geología regional, tectónica y estratigrafía de la región de Los Pelambres es tratada en el reciente trabajo de Perelló et al. (2012). La siguiente reseña está basada en aquel trabajo y referencias contenidas en el mismo.

2.1.1. Rocas estratificadas

La Franja Los Pelambres, que abarca entre 31°35'S y 32°03'S, comprende zonas a ambos lados de la frontera internacional entre Chile y Argentina (Fig. 2.2). Ha sido dividida en tres dominios tectónicos, limitados por fallas inversas de alto ángulo, con rumbo aproximado N-S a NNW-SSE: falla Los Pelambres, falla Totoral y falla González (Fig. 2.2). Las dos primeras fallas nombradas poseen manteo al oeste, mientras que la última, al este.

El dominio del este es limitado al oeste por la falla Los Pelambres, y es el dominio que alberga la mayor parte de la mineralización de Los Pelambres-Frontera, y la totalidad de la del depósito tipo pórfido El Pachón. Comprende un bloque de basamento compuesto de riolitas y tobas félsicas del Paleozoico tardío, junto a granitoides comagmáticos (grupo Choiyoi).

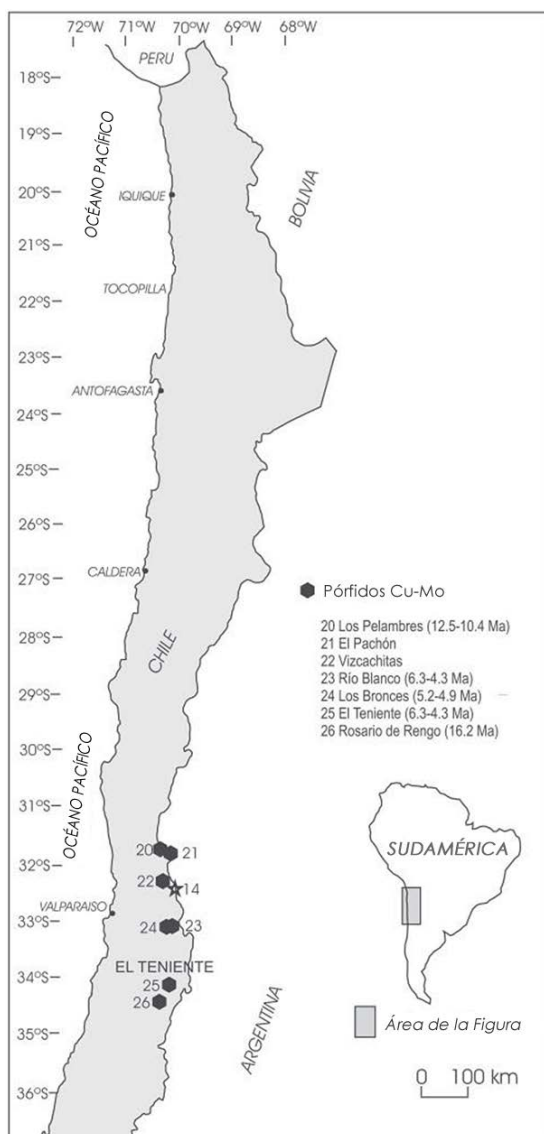


Figura 2.1: Franja de pórfidos cupríferos de edad Mioceno tardío – Plioceno temprano de Chile central. Tomado de Maksaev et al. (2007)

Al oeste, este bloque es sobreyacido por estratos de rocas sedimentarias y volcánicas continentales del Triásico, y secuencias sedimentarias continentales y marinas correspondientes a los afloramientos de más al norte de la cuenca de trasarco de Neuquén. Estas rocas son sobreyacidas, a su vez, por los Estratos de Mondaca (clasificación informal). Hacia el oeste, las rocas anteriores se encuentran subyaciendo tectónicamente a otro bloque de basamento Paleozoico y estratos del Mesozoico, a través de la Falla Mondaca. Siguiendo al oeste, las rocas antes nombradas son sobreyacidas discordantemente por una franja bien definida de la Formación Pachón (ver más adelante).

El dominio central, limitado por la falla Los Pelambres al este, y las fallas Totoral y González, al oeste (Fig. 2.2), consiste en una franja de dirección N-S que alberga estratos extremadamente deformados y plegados de la Formación Los Pelambres (Oligoceno – Mioceno temprano; ver descripción más adelante), además de pequeños bloques tectónicos de rocas volcánicas cretácicas (Toba riolítica, ver más adelante).

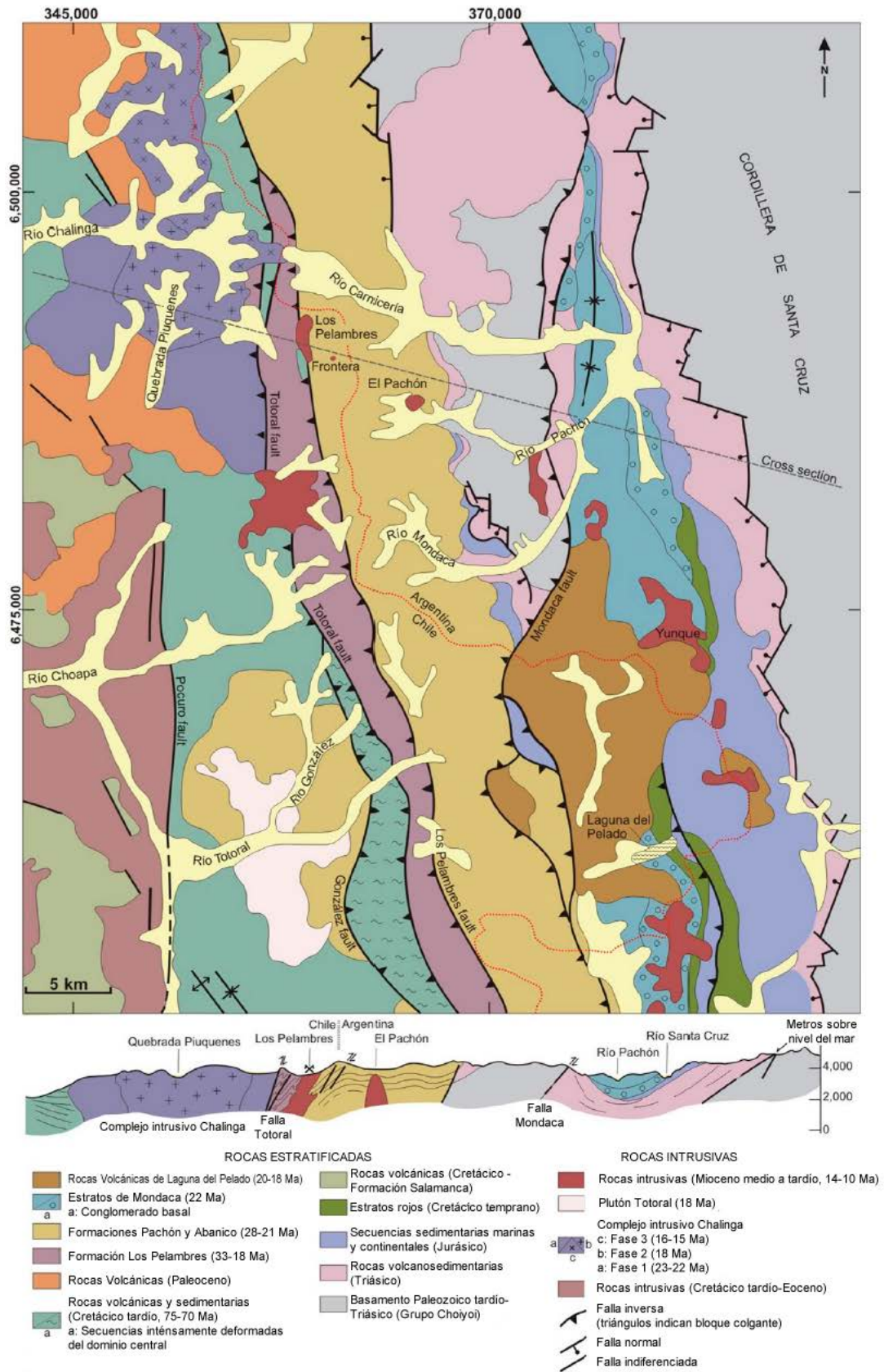


Figura 2.2: Mapa geológico regional del área de Los Pelambres. Tomado de Perelló et al. (2012)

Finalmente, el dominio oeste es acotado al este por las fallas Totoral y González. Se caracteriza por secuencias estratificadas, de bajo manteo al este, de rocas continentales volcánicas, volcanosedimentarias y sedimentarias de edad cretácica, incluyendo la Formación Salamanca. La falla Pocuro corresponde al contacto de la Formación Salamanca al este, donde se pone en contacto con otras unidades volcánicas de edad similar al este. Hacia el noreste de Los Pelambres-Frontera, las secuencias antes nombradas se encuentran sobreyacidas por secuencias volcánicas andesíticas de edad paleocena.

2.1.2. Rocas no estratificadas

En el dominio oeste ocurren mayoritariamente rocas magmáticas intrusivas Meso-Cenozoico: stocks y plutones del Cretácico tardío, Paleoceno, Eoceno y Oligoceno (Perelló et al., 2012). Esta situación contrasta con la escasez relativa de cuerpos intrusivos en los dominios al este. Destacan el plutón Totoral (edad U-Pb en zircón: $18,4 \pm 0,4$ Ma; Perelló et al., 2012), de composición monzogranítica, y el complejo intrusivo Chalinga, inmediatamente al oeste de Los Pelambres (Fig. 2.2). En el complejo Chalinga se han reconocido 3 fases magmáticas: inicialmente fases de granodioritas y dioritas de piroxeno, para luego gradar a gabro de olivino y dioritas (Perelló et al., 2012). Hacia el sureste de la fase magmática más tardía del complejo intrusivo Chalinga, se extiende una cadena de stocks de diorita cuarcífera con hornblenda, con texturas equigranulares a porfídicas, que incluye los centros porfídicos de Los Pelambres-Frontera y Pachón (Stock Los Pelambres, ver más adelante). El Stock Los Pelambres corresponde a la intrusión de más al noreste de la cadena.

2.2. Marco geológico distrital: Los Pelambres-Frontera

2.2.1. Rocas de caja

En el área de Los Pelambres-Frontera, las rocas de caja de los cuerpos intrusivos preminerales e interminerales son principalmente las rocas de la Formación Los Pelambres y Formación Pachón, además de una Toba Riolítica que aflora entre las dos formaciones antes nombradas en la parte sur de la zona de la mina (Figs. 2.3 y 2.4).

Formación Los Pelambres

Corresponde, en el área de estudio, a una secuencia estratificada, con rumbo general norte-sur, de flujos de andesita (miembro superior volcánico) y rocas epiclásticas (miembro inferior sedimentario). La distinción de miembros es explicitada por Brockway et al. (2008). Aflora al oeste de la Formación Pachón y de Toba Riolítica (Figs. 2.3 y 2.4), en contacto por falla con la primera (Fig. 2.3), y en disconformidad con la segunda, en donde niveles clásticos de la Formación Los Pelambres sobreyacen a Toba Riolítica (Perelló et al., 2012).

Formación Pachón

Previamente denominada como Formación Abanico, aflora principalmente al este del actual rajo de la mina, y también al norte (Figs. 2.3 y 2.4). Está en contacto al oeste, por falla (Falla Los Pelambres), con la Formación Los Pelambres, y del mismo modo, con Toba Riolítica, al suroeste de la zona de Los Pelambres-Frontera. Consiste, de modo general, en flujos de lava andesíticos a basálticos con algunas intercalaciones menores de tobas félsicas (Perelló et al., 2012). En el trabajo de Brockway et al. (2008), se han definido dos unidades dentro de esta formación: (1) lavas andesíticas, que incluyen rocas de textura porfídica, amigdaloidales y brechas volcánicas; (2) filones dacíticos. Lavas de la Formación Pachón son las que albergan gran parte de la mineralización de Frontera, y las que hospedan la mayoría de los intrusivos de Los Pelambres (Brockway et al., 2008).

Toba Riolítica

Descrita por Brockway et al. (2008) como “Filón Dacítico” (Fig. 2.3), actualmente se considera en el modelo litológico de Los Pelambres-Frontera como una toba riolítica, de rumbo norte-sur y manteo subvertical, de textura porfídica fina con fenocristales de plagioclasa y escasos ojos de cuarzo (Brockway et al., 2008). Aflora al suroeste de la mina, y está en contacto por discordancia con la Formación Los Pelambres, y por falla con la Formación Pachón (Falla Los Pelambres).

2.2.2. Rocas Intrusivas

Las rocas intrusivas presentes en la zona de Los Pelambres-Frontera han sido descritas en diversos trabajos (ej.: Sillitoe, 1973; Atkinson et al., 1996; Brockway et al., 2008; Perelló et al., 2009, entre otros). En el tiempo, la clasificación de estas rocas, incluyendo agrupaciones entre ellas, ha ido cambiando, así como la temporalidad relativa entre algunas. La clasificación de rocas intrusivas presentadas en este escrito, está basada en los últimos trabajos sobre Los Pelambres-Frontera (Brockway et al., 2008; Perelló et al., 2009, 2011, 2012; Minera Los Pelambres, 2013), apoyándose en descripciones realizadas por Atkinson et al. (1996).

El cuerpo intrusivo principal de la zona de los depósitos antes mencionados es el Stock Los Pelambres, premineral, que se emplazó posteriormente (ver edades más adelante) a un cuerpo intrusivo porfídico: Pórfido Cuarzo Feldespático (Fig. 2.4).

En el Stock Los Pelambres, está emplazado casi completamente el depósito Los Pelambres, y parcialmente Frontera, cuya mineralización está fundamentalmente ubicada en rocas volcánicas de la Formación Pachón. Este stock se encuentra a su vez intruido por dos familias de fases porfídicas interminerales: Pórfido A y Pórfido B (los nombres provienen de la clasificación de Atkinson et al., 1996). Estos pórfidos están presentes tanto en Los Pelambres como en Frontera, y tienen asociados algunos cuerpos y características magmático-hidrotermales. Finalmente se encuentran fases porfídicas tardiminerales.

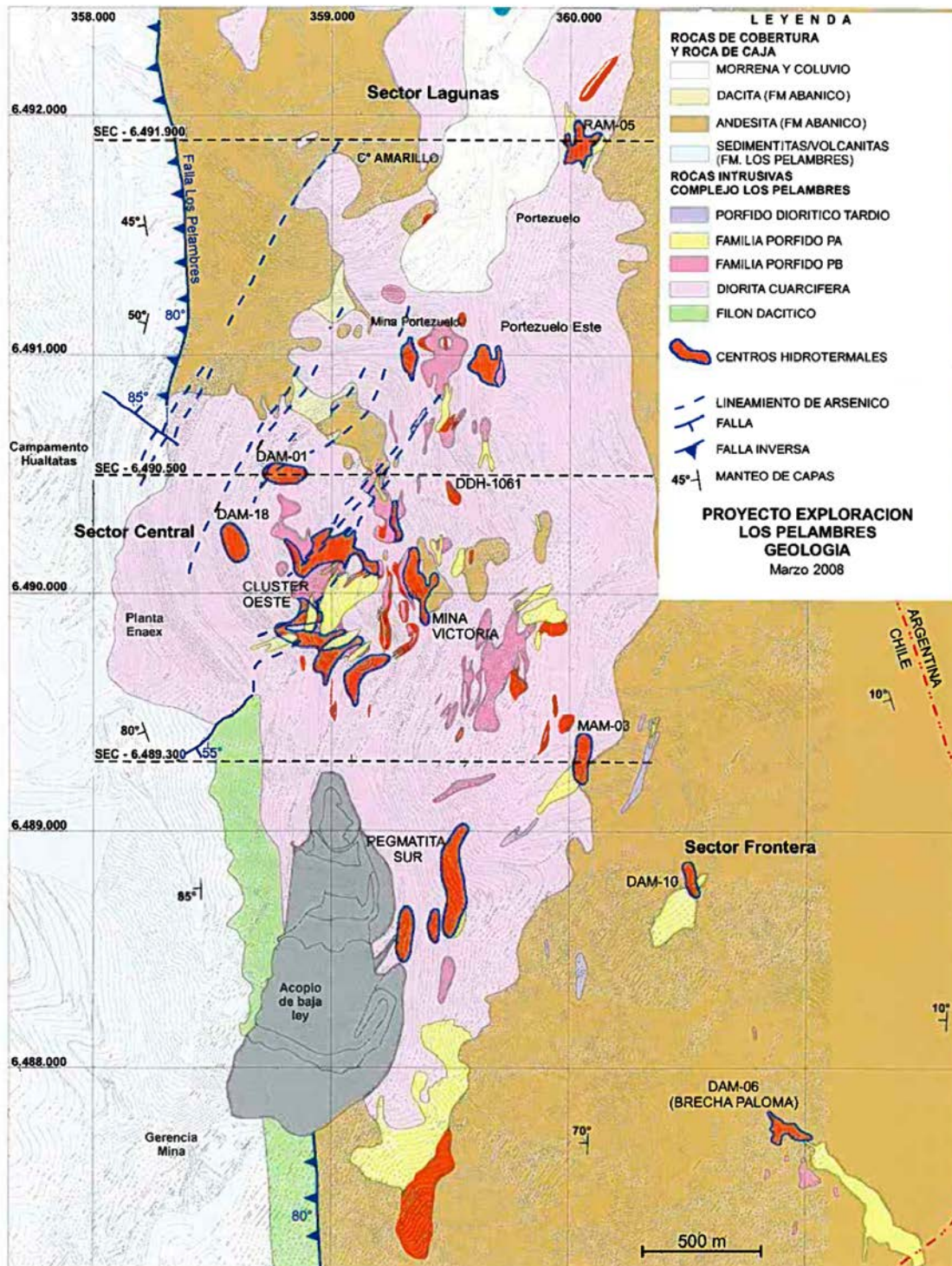


Figura 2.3: Mapa geológico distrital de Los Pelambres-Frontera. Tomado de Brockway et al. (2008). No se muestran secciones indicadas. Ver equivalencias con nombres de este trabajo en el texto.

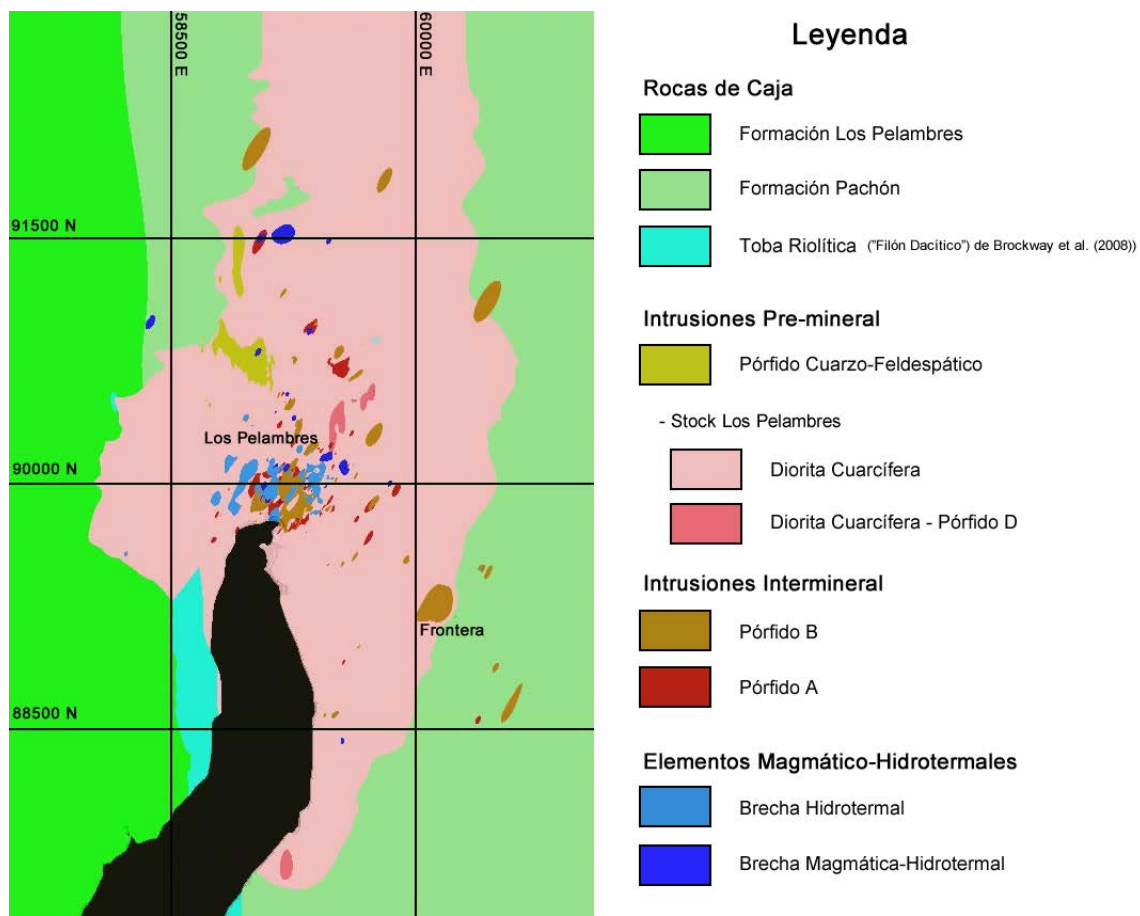


Figura 2.4: Vista en planta de sección definida a una elevación de 3080, a partir de Modelo litológico de Los Pelambres-Frontera (Minera Los Pelambres, 2013), obtenido mediante el software Leapfrog. Stock Los Pelambres comprende a Diorita Cuarcifera y a Pórfido D. Zona en negro representa relieve más bajo que no alcanzó a ser incluido en la sección.

Pórfido Cuarzo-Feldespático

Posee características de diques, y se encuentra principalmente en el flanco noroeste del depósito Los Pelambres, y del Stock Los Pelambres, con una pequeña ocurrencia en el flanco noreste del stock antes mencionado (Fig. 2.4). Atkinson et al. (1996) mencionan un cuerpo intrusivo similar, pero que aflora al sureste del depósito. Lo describe como un pórfido compuesto casi en su totalidad por cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico (microclina peritítica), con masa fundamental aplítica, y en algunos especímenes, mirmequítica. Es descrito por Perelló et al. (2012) como un conjunto de sills dacíticos con ojos de cuarzo.

Stock Los Pelambres

Comprende varias unidades discretas, en un principio diferenciadas, en parte, por Atkinson et al. (1996), pero posteriormente agrupadas. Se trata de un stock de orientación aproximada norte-sur, de 4,5 km de largo y 1,5 km de ancho en promedio (Figs. 2.3 y 2.4), con un máximo de 2,2 km en el centro, y ha sido hallado en profundidad (mediante sondajes)

hasta una profundidad de 1,5 km (Brockway et al., 2008).

El grueso del stock está formado por diorita cuarcífera de grano fino a medio (Fig. 2.5A), que se presenta principalmente con textura equigranular (alrededor de 90 % del stock, Atkinson et al., 1996). También se observan rocas con textura porfídica: diorita cuarcífera porfídica y “Pórfido D”, con esta última siendo una variación textural reconocida en modelos litológicos actuales del depósito (Figs. 2.4 y 2.5A). En Pórfido D, y en otras variedades porfídicas, es común una masa fundamental aplítica, mientras que en la diorita cuarcífera equigranular ocurre cuarzo y feldespatos-K intersticial. Diorita cuarcífera porfídica intruye a la fase equigranular (Atkinson et al., 1996; Brockway et al., 2008). Además en el stock se reconoce una tercera unidad, que corresponde a filones y stocks de composición dacítica (Brockway et al., 2008).

Una de las características fundamentales de las rocas del Stock Los Pelambres, incluyendo a filones dacíticos, es la presencia de pseudomorfos de biotita policristalina, a partir de fenocristales de hornblenda, rasgo que se vincula con alteración potásica.

Fases porfídicas interminerales

Estos cuerpos consisten en diques y pequeños cuerpos de geometría irregular, los cuales se encuentran en su mayoría agrupados en la parte central del Stock Los Pelambres (Perelló et al., 2012), pero también han sido reconocidos intruyendo rocas volcánicas de la Formación Pachón, hacia el sureste del cluster principal, en la zona de Frontera (Figs. 2.3 y 2.4). Estas intrusiones forman un lineamiento de intrusiones pobremente definido en esa dirección (Perelló et al., 2012). Las dos familias nombradas arriba (Pórfido A y Pórfido B) están, a su vez, formadas por más fases, las cuales no en todos los casos pueden ser correlacionadas con exactitud (Perelló et al., 2012). Ambas familias presentan localizadamente cavidades miarolíticas, que contienen biotita, clorita, anhidrita y calcopirita (Perelló et al., 2012). Estas cavidades han sido incorporadas en modelos recientes de zonación de características magmática-hidrotermales (ver más adelante).

Pórfido A

Ocurre como diques pequeños, escasos y dispersos, y cuerpos irregulares, que afloran al este y sureste del centro del Stock, con orientaciones norte-sur, noreste y noroeste (Brockway et al., 2008). Según Brockway et al. (2008), son de composición dacítica, pero Perelló et al. (2012) determinan una predominancia de composición andesítica. La coloración es marrón oscuro (Fig. 2.5C), con masa fundamental traquítica (cristales de plagioclasa orientados, de 0,1 a 0,3 mm; Atkinson et al., 1996). Fenocristales de plagioclasa (2-4 mm transversalmente) y biotita orientados le dan una textura bandeada a las rocas de la familia del Pórfido A que es característica útil para su identificación (Perelló et al., 2012). Tanto este pórfido como el Pórfido B presentan cavidades miarolíticas que contienen biotita, clorita, anhidrita y calcopirita (Perelló et al., 2012).

Pórfido B

Se trata de una agrupación de intrusiones de textura porfídica, que petrográficamente son dacitas de grano medio a grueso, más grueso que Pórfido A, con fenocristales de plagioclasa, y ojos de cuarzo en menor proporción (Brockway et al., 2008). Tiene una coloración gris a marrón claro (Fig. 2.5D), lo que lo diferencia, en primera instancia, de Pórfido A. La masa fundamental está formada, en parte, por plagioclasas orientadas (textura traquítica, Brockway et al., 2008).

Fase porfídica tardía

Descrita por Brockway et al. (2008) como “Pórfido Diorítico Tardío” (Figura 2.3), son diques estériles, que representan eventos de corta duración (Brockway et al., 2008), dispuestos en la zona entre Los Pelambres y Frontera (Perelló et al., 2012). Algunos de estos diques son de textura fanerítica de grano fino a medio (Fig. 2.5F), de coloración mesocrática. No se han incorporado a la última versión de modelo litológico.

Elementos magmático-hidrotermales asociados a fases porfídicas interminerales

En el área de Los Pelambres-Frontera, se reconocen fases de pegmatita, aplita, brecha magmática (“ígneas”) y brecha hidrotermal (Fig. 2.4), de génesis asociada a transición magmática-hidrotermal. Estas fases fueron reconocidas y descritas por Atkinson et al. (1996) separadamente, pero en los últimos trabajos sobre los depósitos, se ha establecido el vínculo de estas fases magmático-hidrotermales entre ellas, y con intrusiones, en específico con las familias Pórfido A y Pórfido B. Inicialmente el trabajo de Sillitoe (2006), y el posterior desarrollo en Brockway et al. (2008) y Perelló et al. (2012), han propuesto un modelo de zonación ideal de estas características transicionales, llamadas en adelante “centros hidrotermales” (Figura 2.3), los cuales se desarrollan como foco de intrusiones de Pórfido B, y localmente de Pórfido A (Brockway et al., 2008).

El modelo, según lo expuesto en Perelló et al. (2012), consiste en que los centros hidrotermales son formados por la exsolución de fluidos derivados de la intrusión y cristalización de las fases porfídicas interminerales. Las cavidades miarolíticas presentes en Pórfido A y Pórfido B representan la exsolución y entrapamiento de fluidos de estos pórfidos. En la parte proximal superior de la intrusión, se da lugar a fracturamiento que da lugar a brechas, proximalmente con matriz ígnea, del mismo pórfido que intruye, y distalmente grada a brecha de matriz hidrotermal (Fig. 2.5C), en función que el material magmático disminuye relativamente, y la cantidad de fluido exsuelto aumenta. Finalmente, en zonas distales sin brechización, en la zona de techo de los centros hidrotermales, se dan diques y cuerpos de aplita-pegmatita, vetillas paralelas de cuarzo y cuarzo-feldespato, y facies de solidificación unidireccional (Brockway et al., 2008).

En este modelo se entiende a cada centro hidrotermal como formado por una intrusión de pórfido intermineral en específico, lo que contradice la visión de Atkinson et al. (1996), donde se propone una gran pipa de brecha (“Zona de Brecha Central”) que en realidad corresponde a varios centros hidrotermales distintos, que están en cercanía espacial.

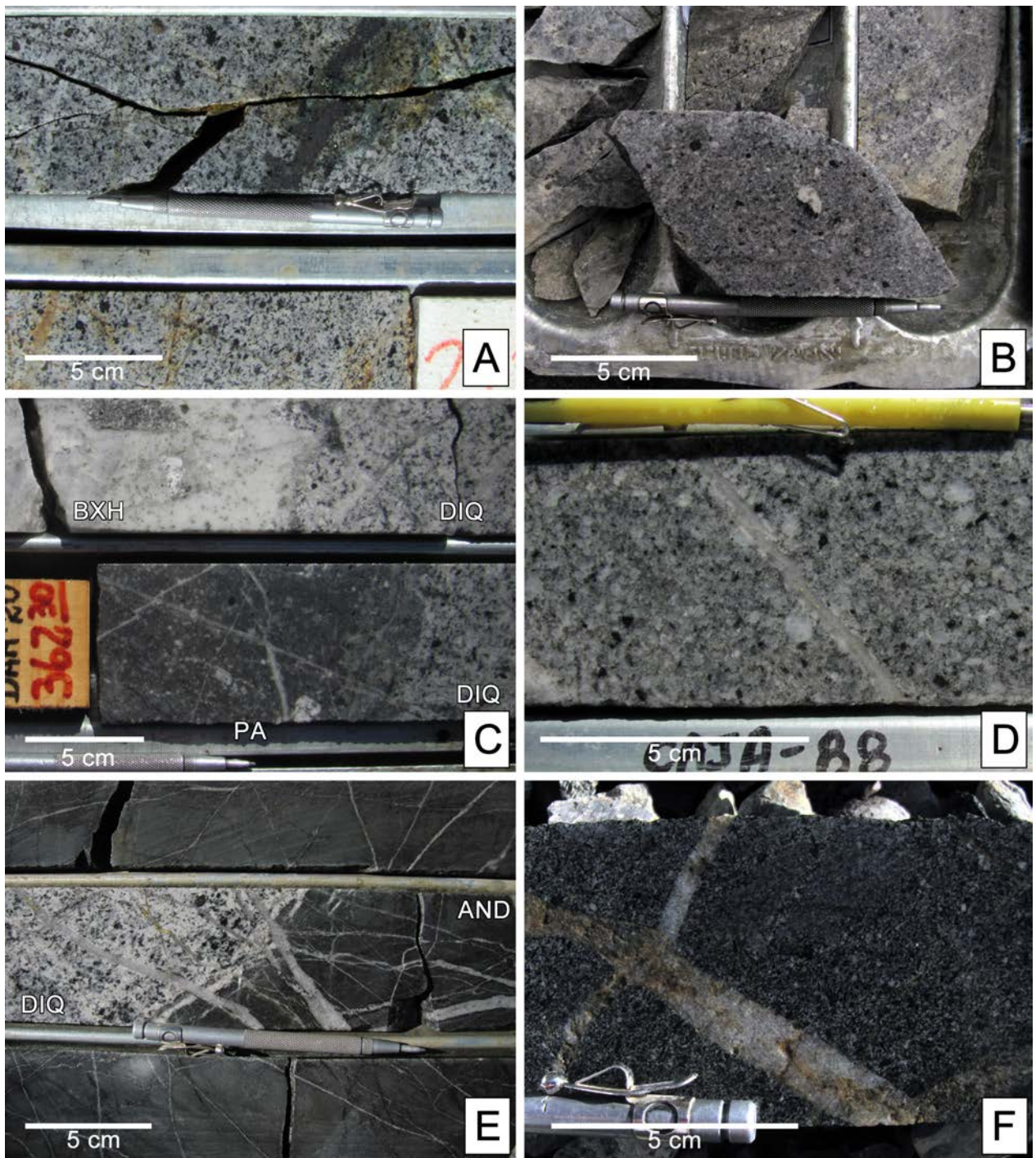


Figura 2.5: Litologías presentes en Los Pelambres-Frontera. A: diorita cuarcífera. B: variación textural Pórfido D. C: brecha hidrotermal, en parte superior de imagen, con matriz de cuarzo y calcopirita; y Pórfido A, intruyendo a diorita cuarcífera (DIQ), en parte inferior. D: Pórfido B, y en parte central, vetilla tipo B. E: Andesita Fm. Pachón, intruida por diorita cuarcífera. F: Pórfido tardío.

2.2.3. Geocronología

En los trabajos de Perelló et al. (2009, 2012) se publicaron nuevas edades de rocas de Los Pelambres-Frontera, así como también se compilaron edades de trabajos anteriores (ej.:

Bertens et al., 2003, 2006). En específico, en Perelló et al. (2012) se reportaron edades U-Pb en circones mediante LA-ICP-MS, de las rocas intrusivas del sistema.

Las andesitas de la Formación Los Pelambres fueron datadas mediante U-Pb en circones, en muestras tomadas al W del rajo de la mina Los Pelambres (Perelló et al., 2009), obteniendo rango de edad de entre $33,4 \pm 0,5$ a $25,5 \pm 0,5$ Ma, correspondiente a Oligoceno. Por otro lado, andesita de la Formación Pachón, con edades reportadas en el mismo trabajo anterior, y mediante el mismo método, en muestras en las cercanías del rajo, tienen un rango de edades de $21,69 \pm 0,26$ – $22,7 \pm 0,2$ Ma, que está en buena correlación con datos de trabajos anteriores: $21,41 \pm 0,18$ – $25,54 \pm 0,21$ Ma, correspondientes al Oligoceno tardío – Mioceno temprano.

El evento de cristalización del stock Los Pelambres (diorita cuarcífera) está representado por dos edades U-Pb en Perelló et al. (2012): $13,60 \pm 0,30$ – $13,00 \pm 0,70$ Ma. En adición, trabajos anteriores reportan rangos de edades (U-Pb en circones) entre $13,92 \pm 0,15$ - $12,51 \pm 0,17$ Ma, correspondientes a Mioceno medio – tardío.

Se han reportado nuevas edades U-Pb en circones de los pórfidos A y B, con 7 y 8 edades respectivamente (Perelló et al., 2012). El rango de edades para Pórfido B es $12,30 \pm 0,30$ – $10,80 \pm 0,23$ Ma, y para Pórfido A, $11,50 \pm 0,30$ – $10,53 \pm 0,14$ Ma. Lo anterior muestra que intrusiones de Pórfido B empezaron antes que las de Pórfido A, aunque existe un rango de traslape entre las edades (entre $\sim 11,50$ - $10,80$ Ma, Mioceno tardío) en los que coexistieron eventos de intrusión de pórfidos A y B, lo que puede explicar la observación de Atkinson et al. (1996) sobre casos donde Pórfido A fue intruido por Pórfido B.

En el trabajo de Perelló et al. (2009) se reportaron edades de intrusiones minerales interminerales, diferenciando Los Pelambres de Frontera. Las edades obtenidas son: $11,9 \pm 0,3$ – $10,8 \pm 0,2$ Ma, para Los Pelambres, y $10,29 \pm 0,12$ – $10,24 \pm 0,55$ Ma para Frontera. Se observa que las edades más jóvenes de estas intrusiones interminerales se obtienen de muestras de Frontera.

2.2.4. Estructuras

En el conjunto Los Pelambres-Frontera se reconoce la falla Los Pelambres (Figs. 2.2 y 2.3), de deformación frágil, inversa y de manteo al W, la cual tiene un rumbo aproximado N-S a NNW-SSE, y un manteo aproximado de 80° W (Brockway et al., 2008). La mayor parte de la mineralización del sistema se encuentra en el bloque yacente. Se presume que el último movimiento de esta falla es anterior al emplazamiento del stock precursor Los Pelambres, ya que éste intruye la falla, y no se ha hallado evidencia de posteriores deformaciones dentro del stock (Perelló et al., 2012).

Aparte de Falla Los Pelambres, se reconocen algunas fallas y lineamientos de rumbo NE (Fig. 2.3) y manteo hacia el SE (55° a 70°), que tienen asociadas alteración sericítica (Fig. 2.6), con presencia de vetillas tipo D (sensu El Salvador; Gustafson y Hunt, 1975). Además, se piensa que estas fallas están estrechamente ligadas a lineamientos geoquímicos de As (mayores leyes del elemento), anomalías que fueron utilizadas para inferir algunas de

las fallas de dirección NE. Por último, se plantea que este sistema de fallas tuvo un rol en una dislocación estructural del conjunto Los Pelambres-Frontera, evidenciado en el contacto entre el stock Los Pelambres y la falla Los Pelambres (Perelló et al., 2012).

2.2.5. Alteración Hidrotermal

Los Pelambres-Frontera presenta, a grandes rasgos, alteración potásica, sericítica y propilítica, las cuales se disponen espacialmente en forma similar al modelo de Lowell y Guilbert (1970) (Perelló et al., 2012) y de Sillitoe (2010), en el sentido que la alteración potásica se ubica en posición central del sistema, a modo de núcleo, que grada lateralmente a una zona de alteración sericítica anular, la que a su vez está rodeada por un gran halo de alteración propilítica (Perelló et al., 2012). En el mapa de alteración de Brockway et al. (2008) (Fig. 2.6), se ha definido una zona de alteración sericita-clorita, la cual delimita la zona potásica y grada a alteración cuarzo-sericítica hacia afuera del sistema. Esta zonación es similar a la propuesta por Sillitoe (2010) preferentemente para pórfidos Cu-Au. Nuevos modelos de alteración del depósito (no publicados) difieren de los mencionados antes, en el sentido que no consideran, en estricto rigor, a las alteraciones sericíticas como halos de la alteración potásica.

Alteración Potásica

Esta alteración se dispone en una franja de orientación NNO-SSE, alcanzando su mayor ancho en la zona del actual rajo (~ 2 km), en Los Pelambres (Fig. 2.6). La franja continúa hacia el SSE, incluyendo Frontera, y pasa hacia Argentina en esa dirección. Las asociaciones mineralógicas observadas en esta alteración son principalmente biotita, como reemplazo de anfíbola (Brockway et al., 2008), y reemplazo parcial de plagioclasas por feldespato-K (Sillitoe, 1973; Atkinson et al., 1996). Lo anterior es lo común para Los Pelambres, donde la alteración potásica está desarrollada principalmente en el Stock Los Pelambres y pórfidos interminerales que lo intruyen. En el sector Frontera, en contraste, la alteración potásica consiste principalmente en agregados granoblásticos de biotita de grano fino, acompañados por clorita y apatito (Perelló et al., 2012), desarrollados preferencialmente en lavas andesíticas, mientras que en las litologías intrusivas interminerales, y Stock Los Pelambres, el estilo de alteración es similar al descrito para Los Pelambres. En este mismo sector, existen vetillas milimétricas de magnetita (Brockway et al., 2008). Las características en común de la alteración potásica, para Los Pelambres-Frontera, es la ocurrencia de vetillas finas de biotita-anhidrita, vetillas de feldespato potásico-anhidrita, y vetillas de cuarzo, denominadas T4 (Atkinson et al., 1996), A y B (Brockway et al., 2008). Estas vetillas de cuarzo tienen un rol fundamental en la mineralización del sistema, por lo que serán tratadas más adelante.

Alteración Clorita-Sericita

Esta alteración se ha modelado en trabajos anteriores (ej.: Brockway et al., 2008) como un halo de alteración que rodea zonas de alteración potásica (Fig. 2.6), pero en modelos

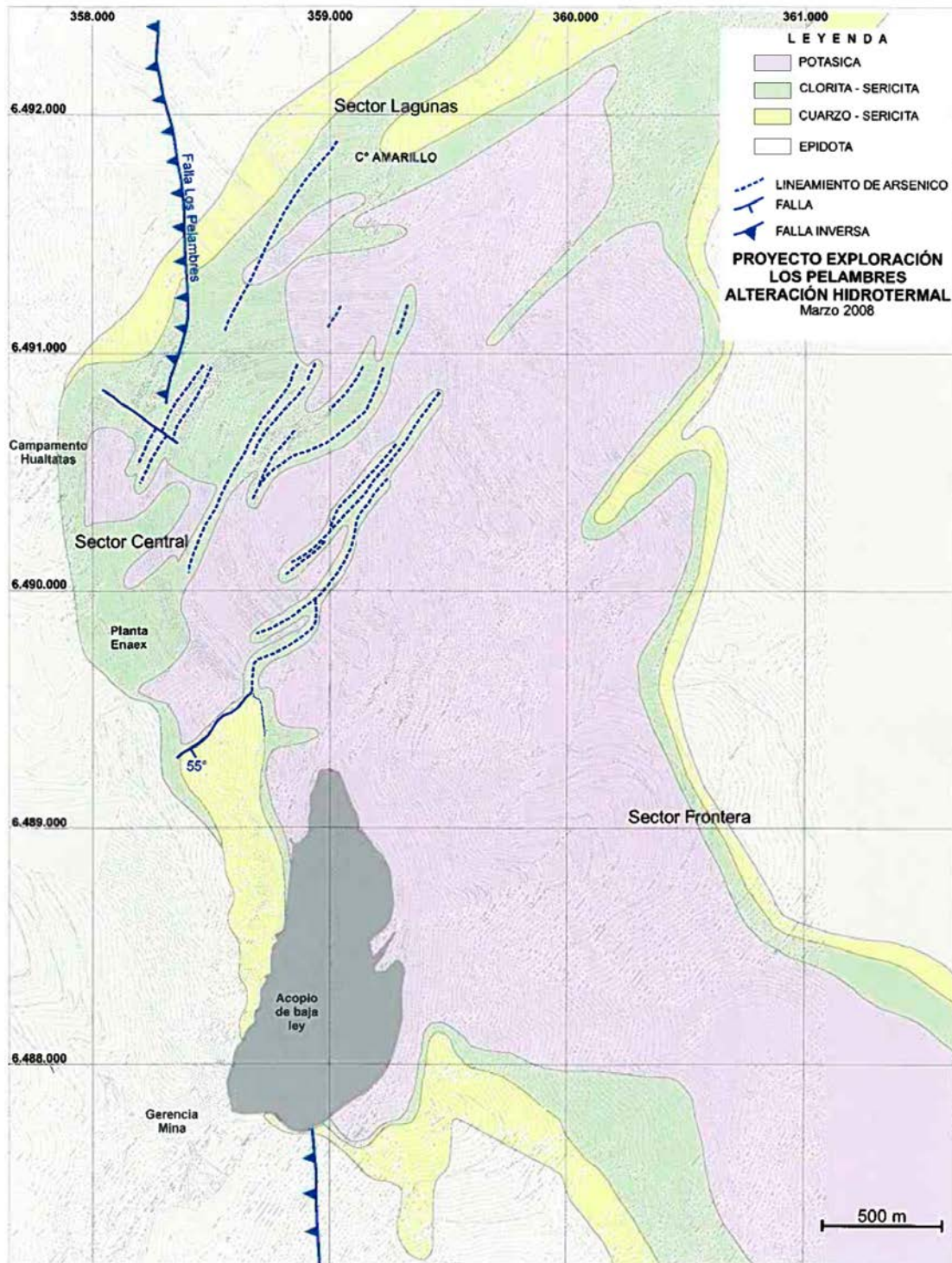


Figura 2.6: Mapa de alteración hidrotermal de Los Pelambres-Frontera. Tomado de Brockway et al. (2008).

recientes de alteración del depósito, no publicados, se modela como una alteración de ocurrencias puntuales, discontinua espacialmente. Se caracteriza principalmente por la presencia de clorita, como reemplazo selectivo de minerales máficos en las litologías ígneas intrusivas, además de sericita de reemplazo en feldespatos.

Alteración Cuarzo-Sericítica

A escala del conjunto de Los Pelambres-Frontera, consiste en un halo de alteración que rodea a la alteración potásica (Fig. 2.6; Brockway et al., 2008), delimitando una zona anular alrededor de la última (Perelló et al., 2012). Al igual que para la alteración clorita-sericita, los nuevos modelos de alteración en Los Pelambres-Frontera la consideran como una alteración discontinua, de ocurrencias puntuales generalmente, con un mayor desarrollo en la zona noroeste del sistema. En Frontera, el desarrollo de esta alteración es débil. Brockway et al. (2008) definieron dos eventos en esta alteración: el primero, ligado a la ocurrencia de vetillas ED (Sillitoe, 2006), de características similares a las vetillas T4, pero posteriores; y el segundo, ligado a alteración de asociación mineralógica cuarzo-sericita-pirita, con presencia de vetillas tipo D (ver más adelante), con turmalina subordinada. Localmente existen claras evidencias de sobreposición de alteración sericítica sobre la potásica, por lo que no es raro encontrar coexistencia de minerales de alteración de las alteraciones hidrotermales antes nombradas, así como también coexistencia de la mineralización de sulfuros típica de cada alteración.

Alteración Propilítica

La alteración propilítica forma una amplia zona que rodea el sistema de pórfidos. La descripción expuesta a continuación es parte de la hecha por Atkinson et al. (1996). Andesitas adyacentes a Los Pelambres se encuentran alteradas a arcillas-clorita-yeso, con presencia local de epidota. Al sureste de Los Pelambres, la alteración propilítica consiste en vetillas y cúmulos de epidota. No se conoce con certeza los límites de esta alteración.

2.2.6. Mineralización

La mineralización de Cu y Mo en Los Pelambres-Frontera, así como también la de sulfuros, está vinculada directamente, en primer lugar a brechas hidrotermales y vetillas, lo que constituye la mineralización hipógena del depósito; y en segundo, a horizontes de enriquecimiento secundario, correspondientes a eventos supérgenos.

Mineralización primaria

La mineralización hipógena de Los Pelambres-Frontera ocurre principalmente en brechas hidrotermales y vetillas, siendo estas últimas portadoras de elementos de interés (Cu, Mo)

a escala del sistema completo, mientras que las brechas hidrotermales son más acotadas espacialmente.

Brechas hidrotermales

Como indicado antes, las brechas hidrotermales en Los Pelambres-Frontera se encuentran en estrecho vínculo con pórfidos interminerales y los fluidos hidrotermales exsuetos de ellos. Según Brockway et al. (2008) el relleno de las brechas hidrotermales consiste en cuarzo, feldespato-K, anhidrita, biotita, turmalina, calcopirita (ej.: brecha hidrotermal de la Fig. 2.5C) y bornita, alcanzando abundancias importantes de estos dos últimos minerales en algunos casos. Habitualmente las brechas hidrotermales son clastosoportadas y suelen ser polimícticas (Perelló et al., 2012).

Vetillas

Inicialmente, se contaba con descripciones de vetillas del pórfido Cu-Mo Los Pelambres, del trabajo de Atkinson et al. (1996), que establecía un orden temporal en las vetillas observadas: de más antiguas a más jóvenes: vetillas de cuarzo granular, vetillas de mica verde, vetas “tipo 4” ricas en Cu, vetillas con halo de feldespato-K, vetillas de cuarzo con estructura de peineta y vetillas con halo de sericita. Trabajos posteriores (Brockway et al., 2008; Perelló et al., 2012) modificaron la clasificación, temporalidad e importancia relativa de vetillas antes nombradas, esto último en términos de mineralización de Cu (Mo-Au), y ampliaron la clasificación al recientemente descubierto depósito Cu-Au Frontera. Es esta última clasificación, en específico la de Perelló et al. (2012), la que será utilizada en el presente trabajo.

Se definen seis tipos de vetillas, entre los cuales se ha definido temporalidad relativa mediante relaciones de corte. Los seis tipos son: *Early Biotite* (EB), mica verde, tipo 4, tipo A, tipo B y tipo D, ordenadas temporalmente de más tempranas a más tardías. Además se han definido las vetillas “*Early D*” (tipo D tempranas), y en la zona de Frontera, vetillas tempranas de actinolita-magnetita. Las vetillas más abundantes en Los Pelambres-Frontera son las tipo 4, A, B, ED y D, las que se describen a continuación.

Vetillas tipo 4 (T4)

Descripción basada en el trabajo de Atkinson et al. (1996). Se trata de vetillas de cuarzo con halos oscuros, los cuales son entre 5 a 10 veces más anchos que el relleno central de las vetillas (Fig. 2.8A). Este relleno central generalmente consiste en cuarzo de textura granular, con pequeñas cantidades de bornita y calcopirita. Ocasionalmente, el relleno puede tener mica verde, biotita, feldespato-K, magnetita, pirita, molibdenita, turmalina y/o anhidrita. En contraste, el halo gris oscuro-verdoso consiste en una mezcla de grano fino de mica verde, biotita, cuarzo, feldespato-K y sulfuros de Fe-Cu (principalmente bornita y calcopirita). Localmente puede ocurrir magnetita en los halos. Los halos pueden variar en tamaño, desde 1 mm de ancho, hasta aproximadamente 1 m, mientras que el relleno llega hasta algunos cm de ancho. Son similares a las vetas tipo C de El Salvador (Gustafson y Quiroga, 1995) y a las EDM (*Early Dark Micaceous*) de Butte, Montana (Brimhall, 1977).

Las vetillas T4 tienen una amplia distribución en Los Pelambres-Frontera (Fig. 2.7A), con

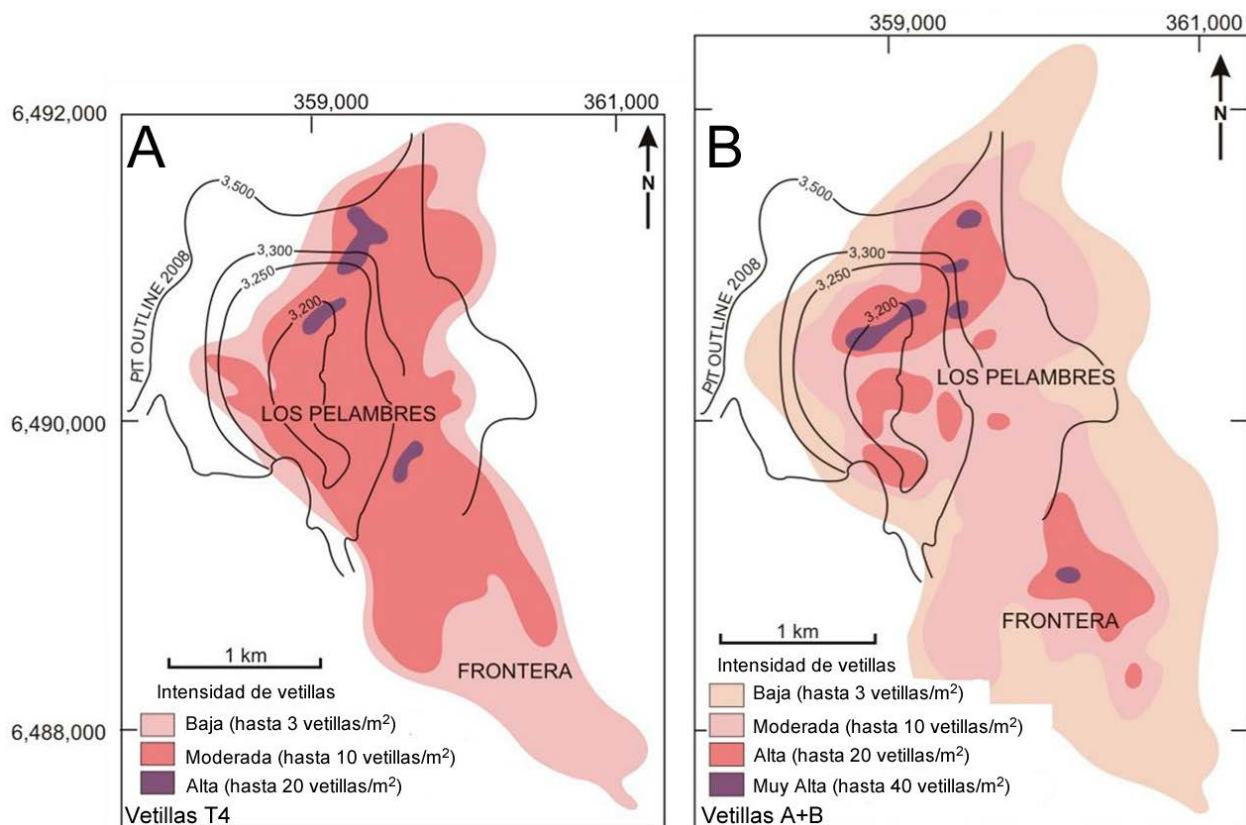


Figura 2.7: Mapas de intensidad de vetillas, tomados de Perelló et al. (2012). A: vetillas T4. B: vetillas A + vetillas B.

mayor frecuencia en partes centrales de Frontera, y flanco NE-E del actual rajo de la mina (sector Los Pelambres). Existen zonas de Los Pelambres en las cuales se observan vetillas T4 sin un vínculo obvio con centros hidrotermales o pórfidos interminerales (Perelló et al., 2012), por lo que cabe la posibilidad que parte del evento de generación de vetillas T4 esté relacionado con fluidos derivados de partes del stock Los Pelambres.

Vetillas tipo A

Consisten en vetillas de cuarzo con textura granular, con cantidades variables de anhidrita, bornita y calcopirita, además de molibdenita presente localmente (Fig. 2.8B). Presentan halos de feldespatos potásico blanco (de reemplazo de plagioclasas), con escasa bornita y calcopirita. Algunas vetillas tipo A no poseen el halo de feldespatos-K, situación descrita por Atkinson et al. (1996), donde se clasificaron estas vetillas como “vetillas de cuarzo granular”. Así como hay vetillas A sin halo, también las hay sin sulfuros de Fe-Cu. El espesor de las vetillas A es usualmente del orden de milímetros.

Al igual que las vetillas T4, vetillas A y B son de amplia distribución en Los Pelambres-Frontera (Fig. 2.7B), y los sectores de mayor frecuencia de estas últimas son similares a los de T4 (centro de Frontera y flanco NE-E de actual rajo), pero se agrega una zona de alta frecuencia de vetillas A y B, coincidente con el fondo del actual rajo de la mina, situación corroborada con el posterior estudio de sondajes de la zona (ver “características geológicas de zonas anómalas”).

En los trabajos más recientes (ej.:Perelló et al., 2012) se les atribuye un mayor rol en cuanto a la mineralización de Cu del conjunto Los Pelambres-Frontera, por sobre el 5 a 10 % Cu atribuible a estas vetillas planteado por Atkinson et al. (1996).

Vetillas tipo B

Llamadas por Atkinson et al. (1996) como “vetillas de cuarzo con estructura de peineta”. Son vetillas de cuarzo con texturas de relleno, usualmente suturas centrales y texturas de peineta (Fig. 2.8C). Son suaves y de bordes rectos, con mayor continuidad que las vetillas antes descritas. Comúnmente ocurre en ellas molibdenita, que localmente es abundante. Vetillas tipo B contienen la mayoría del Mo de Los Pelambres-Frontera (al menos 60 % del Mo total; Perelló et al., 2012). Generalmente las vetillas tipo B se presentan sin halos de alteración, pero cuando los tienen, éste corresponde a uno delgado de feldespatos-K o sericita. Aparte del relleno de cuarzo y molibdenita, también puede ocurrir feldespatos-K, normalmente a modo de sutura central de la vetilla, o en bordes; y en menores cantidades, anhidrita, calcopirita, bornita.

Normalmente vetillas tipo B tienen espesores de algunos mm hasta algunos centímetros, pero pueden llegar a tener hasta 40 cm de grosor en algunos casos, situación observada en el estudio de zonas de interés definidas en este trabajo.

Hay menor frecuencia de vetillas tipo B en Frontera que en Los Pelambres, y las de Frontera tienen menores contenidos de molibdenita que sus pares de Los Pelambres. Esta observación apoya la diferencia de signatura geoquímica y tipo de depósito tipo pórfido cuprífero propuesto para los dos depósitos: signatura Cu-Mo de Los Pelambres, y Cu-Au para Frontera.

Vetillas tipo “Early D” (ED)

Descripción tomada de Brockway et al. (2008). Clasificadas por Sillitoe (2006) como vetillas “Early D”, consisten en vetillas de sulfuros, con halos verdes, compuestos por muscovita, clorita, sericita verde y biotita. Tienen escaso cuarzo, y los sulfuros que pueden contener son: pirita, calcopirita, cantidades variables de molibdenita, y localmente bornita. Se parecen a las vetillas T4, y se distinguen de éstas por su temporalidad.

Vetillas tipo D

Consisten en vetillas con relleno de pirita y cuarzo, y con halo tipo mosaico de sericita, cuarzo y pirita (Fig. 2.8D). Algunas de estas vetillas contienen anhidrita, turmalina, molibdenita y/o calcopirita (Atkinson et al., 1996). Ocasionalmente, contienen esfalerita. Las vetillas D obliteran la textura original de las rocas en las que están emplazadas, en mayor grado o de forma similar a la obliteración causada por vetillas T4. Halos son de espesores variables: desde el orden de cm hasta metros.

Las vetillas D se concentran en mayor medida en el sector noroeste de Los Pelambres, donde la frecuencia de estas vetillas es mayor, y donde existe un mayor desarrollo de alteración cuarzo-sericítica (Fig. 2.6), evidenciando la estrecha relación entre vetillas D y esta alteración.

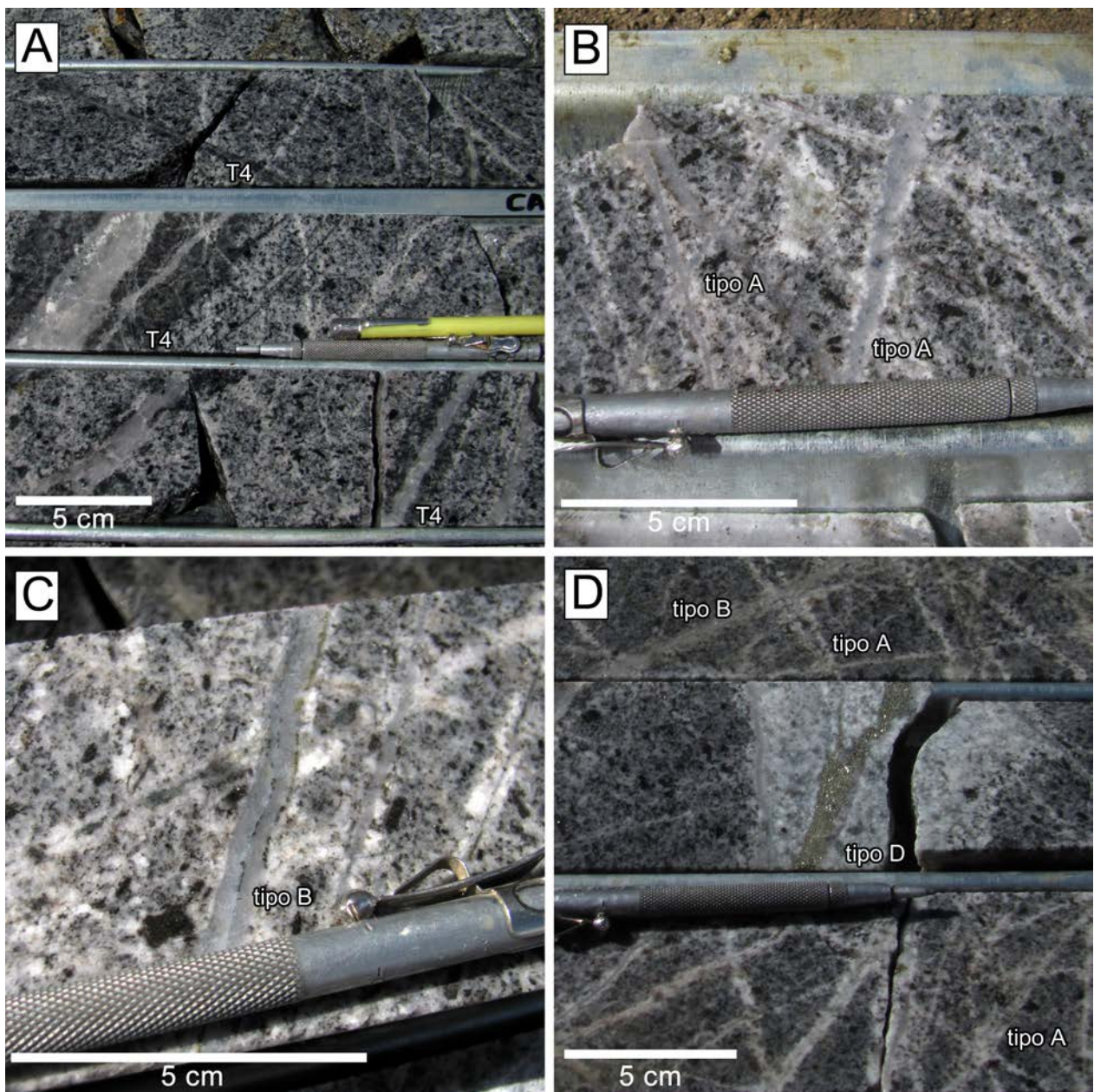


Figura 2.8: Algunas vetillas importantes de Los Pelambres-Frontera. A: vetillas T4. B: stockwork de vetillas A. C: vetilla B con sulfuros (bornita) en sutura central. D: vetilla D, con superposición a evento previo de vetillas A y B.

En esta zona, las vetillas D y la alteración sericítica aprovechan los corredores estructurales definidos por el sistema de lineamientos NE-SW descritos antes. No obstante lo anterior, las vetillas D también pueden ser halladas, en menores frecuencias, en zonas de alteración potásica predominante, como es mostrado en la Figura 2.8D.

Edades Re-Os en molibdenita

En el trabajo de Perelló et al. (2012) se reportan 12 edades Re-Os en molibdenita de Los Pelambres-Frontera, las cuales abarcan entre $11,81 \pm 0,06$ y $10,14 \pm 0,04$ Ma (Mioceno tardío). Lo anterior sugiere, en el caso de que las molibdenitas estudiadas no hayan tenido

Os inicial, que eventos de mineralización se extendieron por aproximadamente 1,7 Ma, donde las edades más jóvenes corresponden a molibdenita de Frontera. Edades obtenidas en trabajos anteriores, mediante Re-Os en molibdenita de Los Pelambres, en específico las del trabajo de Bertens et al. (2006), son incluidas en el rango de edades indicado antes.

Mineralización secundaria

Además de los contenidos de Cu atribuibles a mineralización primaria, en Los Pelambres-Frontera se constata la presencia de niveles de enriquecimiento secundario caracterizados por la ocurrencia de calcosina secundaria, con menor covelina. El desarrollo de los niveles de calcosina secundaria es distinto para Los Pelambres y Frontera: en Frontera, el desarrollo de este nivel es vestigial (Perelló et al., 2011), con calcosina en pátinas sobre sulfuros primarios (bornita, calcosina y, en algunos casos, piritita). Por otro lado, en Los Pelambres, el desarrollo del horizonte de enriquecimiento secundario es mayor, pero no es uniforme: depende de geomorfología y estructuras presentes. La potencia de este nivel varía desde unos 6 metros, bajo el piso de valles glaciares en forma de U (Sillitoe, 1973), hasta unos 200 m en zonas próximas a halos piritosos, pudiendo alcanzar localmente unos 350 m (Atkinson et al., 1996). La base del nivel de enriquecimiento supérgeno coincide, de modo general, con el techo de un nivel de anhidrita, que caracteriza las zonas hipógenas del sistema. En Los Pelambres, la distancia entre el techo de nivel de anhidrita y la base de enriquecimiento supérgeno disminuye, desde los bordes del depósito, hacia el sector central, donde esta distancia es casi nula.

Además de este nivel de enriquecimiento secundario, también se observa el desarrollo de una capa lixiviada en el depósito, caracterizada por goethita, y en zonas, jarosita, con oxidación parcial o total de sulfuros. Esta capa lixiviada grada, a mayores profundidades, a un horizonte con presencia de óxidos de Cu, que incluyen malaquita y copper pitch en Frontera, y malaquita en Los Pelambres, además de azurita, crisocola, chalcantita y brocantita (Perelló et al., 2012).

2.3. Oro en Los Pelambres-Frontera – Trabajos Previos

En Los Pelambres-Frontera, se han destacado dos zonas anómalas de oro (Fig. 2.9): la primera, confinada al pórfido Frontera; y la segunda, en el flanco NE - E del pórfido Cu-Mo Los Pelambres, en el sector Central. No existe una continuidad entre las dos anomalías, pero esta observación puede ser solo aparente (Brockway et al., 2008), producto de los datos con los que se contaba en el trabajo antes citado.

La anomalía de oro ligada a Frontera, definida por concentraciones de oro mayores o iguales a 0,05 ppm, consiste en una zona elongada norte-sur a noroeste, que posee aproximadamente 3 km en el sentido antes mencionado, y que posee un núcleo central de mayor ley de Au (>0,1 ppm Au) que se extiende por aproximadamente 1 km. Por otro lado, la anomalía de oro presente en el flanco NE de Los Pelambres se ha descrito como más pequeña que la de Frontera: se extiende en el sentido norte-sur por ~1km, y está definida, al igual

que la anomalía en Frontera, por una envolvente $>0,05$ ppm Au. En esta zona se encuentran algunos valores de Au que llegan hasta 0,1 ppm. Se han descrito también anomalías de Au en sondajes aislados, como el caso del centro hidrotermal DAM-01 (Brockway et al., 2008), ubicado en el flanco NW del rajo actual, cercano al fondo del mismo, que corresponde a un centro rico en bornita (Perelló et al., 2012).

En Frontera, el estilo de mineralización es similar al descrito para Los Pelambres, pero las zonas de mayor concentración de oro, en Frontera, presentan mayores contenidos de magnetita que las de Los Pelambres. Es importante señalar que se ha notado una relación directa entre magnetita hidrotermal y mayores concentraciones de oro, indicada en trabajos como el de Perelló et al. (2012). Esta relación puede deberse a que magnetita hidrotermal precipita en condiciones de baja fugacidad de S, hecho que puede mermar eventualmente el transporte de Au como complejo bisulfurado (ver Anexo A), y hacer que el oro precipite. Respecto de esta relación, en Los Pelambres-Frontera existe una excepción: el centro hidrotermal DAM-01, de Los Pelambres, que no presenta magnetita asociada (Perelló et al. 2013).

En Frontera, en las zonas de Au anómalo hay importante presencia de magnetita hidrotermal, de 2 a 3% (Brockway et al., 2008), acompañando a mineralización de bornita y calcopirita principalmente, sulfuros que serían huésped del oro en el depósito (Perelló et al., 2012). Como las anomalías de oro en Frontera están ligadas a asociaciones de bornita mayor o igual a calcopirita, existe una correlación con las leyes de cobre (Brockway et al., 2008). En este mismo sentido, las vetillas T4 y A serían las cuales alojan el oro del sistema (Perelló et al., 2011, 2012), por lo que las vetillas T4 representan la primera introducción significativa de oro en el sistema (Perelló et al., 2012). Estas vetillas de Frontera se diferencian de sus símiles de Los Pelambres en la mineralización de magnetita hidrotermal antes mencionada.

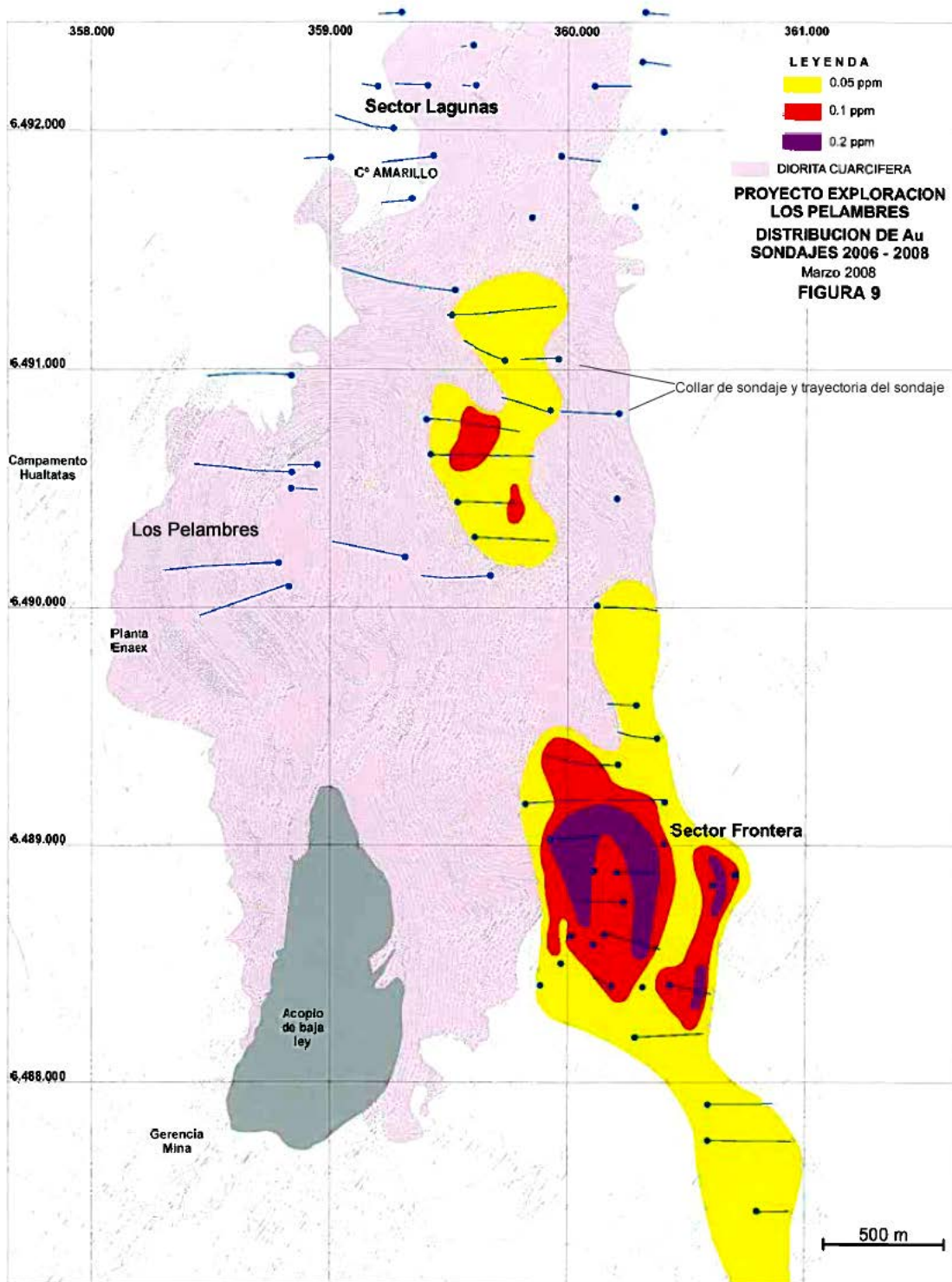


Figura 2.9: Distribución espacial de oro de Los Pelambres-Frontera, según Brockway et al. (2008).

Capítulo 3

Marco Teórico

A continuación se presenta un extracto de una compilación de información acerca de Au en depósitos tipo pórfido cuprífero. La versión completa, que incluye información acerca de controles fisicoquímicos en el transporte y precipitación de Au, e implicancias respecto a sulfuros en depósitos minerales, puede ser consultada en los Anexos A y B del presente trabajo.

3.1. Oro en depósitos tipo pórfido cuprífero

3.1.1. Origen del oro

Evidencia de inclusiones fluidas muestran que el oro, y otros elementos (Cu, As, entre otros) son introducidos a los sistemas porfíricos por fluidos de origen magmático (Bodnar, 1995; Heinrich et al., 1999). Estos fluidos se generan mediante exsolución a partir del stock magmático vinculado al pórfido cuprífero, por primera o segunda ebullición. En la exsolución del fluido, varios elementos incompatibles son capturados y concentrados por éste, incluyendo Cu, Au y Ag, así como también S y Cl. Posteriormente Au es transportado, como indicado en la sección anterior. Cuando S es removido del fluido hidrotermal, durante la precipitación de sulfuros de cobre-hierro y hierro, el oro también precipita (Williams-Jones y Heinrich, 2005), habitualmente como solución sólida. En este sentido, el oro entra al sistema de pórfido, principalmente en eventos de alteración tempranos y de alta temperatura, como es el caso de alteración potásica (Kesler et al., 2002).

3.1.2. Relaciones entre oro y otras características geológicas

En los trabajos de Perelló y Cabello (1989) y Jones (1992) se presentan las relaciones entre oro y características geológicas en depósitos tipo pórfido cuprífero “enriquecidos en Au”

(contenido de Au \geq 0,3 ppm, en el trabajo de Perelló y Cabello, 1989). Estas características son alteración hidrotermal, zonación de metales y minerales, y litología, entre otras. El oro comúnmente está asociado al núcleo de alteración potásica de un sistema (Perelló y Cabello, 1989; Jones, 1992), en donde es común una buena correlación Au – Cu (Zona Central Cu-Au; Jones, 1992 y referencias contenidas en el mismo); pero también puede estar asociado a alteración cuarzo sericitica, habitualmente superpuesta a alteración potásica inicial; y a alteración de arcillas-sericita-clorita y argílica avanzada (Perelló y Cabello, 1989). Respecto a zonación de Au respecto a zonas de otros elementos, aparte de la relación mencionada previamente entre Cu y Au en la zona central de pórfidos cupríferos, puede haber una zona enriquecida en Au en una posición intermedia, entre la zona rica en Cu y una zona enriquecida en Pb y Zn (Zona Intermedia de Au; Jones, 1992 y referencias contenidas en el mismo), zona coincidente parcialmente con la zona de pirita periférica de algunos pórfidos cupríferos. Si bien las relaciones antes expuestas son la generalidad, no siempre se cumplen.

Las características exactas de litología de un depósito tipo pórfido cuprífero generalmente son propias de cada depósito (ej.: roca de caja), por lo que vínculos Au – litología deben ser estudiados para cada pórfido cuprífero en particular. Sin embargo, existen características litológicas en común entre ellos, como la presencia de intrusiones porfídicas, y en algunos casos, brechas magmático-hidrotermales o hidrotermales. Respecto a las brechas, éstas pueden llegar a tener importante mineralización de mena, así como también altas leyes de Au. Se ha planteado que brechas tempranas tienden a tener mayor contenido de Au que brechas de eventos tardíos (Tosdal et al., 2009).

3.1.3. Ocurrencia de oro en pórfidos cupríferos

En cuanto a la ocurrencia del Au en los depósitos tipo pórfido cuprífero, éste se da principalmente como solución sólida en sulfuros Cu-Fe, en particular, en bornita (Kesler et al., 2002; USGS, 2010), la cual habitualmente contiene oro en un orden de magnitud por sobre calcopirita (Kesler et al., 2002); y también como partículas de Au nativo libre (Perelló y Cabello, 1989). En el estudio realizado por Kesler et al. (2002), se obtuvieron concentraciones de oro en bornita de alrededor de 1 ppm. El oro también está ligado a la bornita como inclusiones de oro nativo dentro del mineral y/o en los bordes (Perelló y Cabello, 1989; Kesler et al., 2002). No debe quitársele importancia a calcopirita como portador del Au en un pórfido cuprífero, ya que habitualmente está en mayor abundancia que la bornita, y por esto puede representar una fuente económicamente importante de oro (Ballantyne et al., 1997), incluso en depósitos con abundancia en bornita. Adicionalmente, en casos donde la bornita es escasa en eventos de alteración tempranos, el oro se asocia a calcopirita y/o a otros sulfuros (ej.: Perelló et al., 1995). Ocurrencia de oro en otros tipos de minerales, entre ellos telururos, selenuros y minerales con bismuto, es muy rara (Ballantyne et al., 1997). En el trabajo de Perelló y Cabello (1989) se menciona que se ha constatado asociación de partículas de Au nativo con pirita y molibdenita, en Island Copper, y asociación de Au con sulfosales, en Afton. Trabajos realizados en el depósito tipo pórfido Cu-Au Esperanza (González, 2007) han detectado algún grado de asociación, no especificado, entre magnetita y oro.

Eventos tardíos de alteración pueden removilizar cobre y oro de la asociación original

bornita-calcopirita del depósito, y fijarlo en otros lugares (Kesler et al., 2002). Tal es el caso de la alteración sericítica pervasiva, que puede formar una nueva asociación de sulfuros: calcopirita-pirita, minerales que también pueden ser huésped de oro (ej.: Reich et al., 2013). El reciente trabajo de Reich et al. (2013) pone de manifiesto la importancia de la pirita como mineral huésped para elementos traza en los sistemas tipo pórfido cuprífero. El oro en pirita (arsenical) puede presentarse en dos formas: incorporado en la estructura cristalina del mineral (Reich et al., 2005; Simon et al., 1999), o como inclusiones minerales de oro, como por ejemplo, oro nativo (Palenik et al., 2004; Reich et al., 2005).

A pesar de la baja reactividad química del oro, eventos supérgenos pueden eventualmente removilizar el oro, como visto antes. En este caso, el oro es liberado de los sulfuros primarios presentes en el pórfido Cu, transportado, y precipitado posteriormente, en especial en el nivel de enriquecimiento supérgeno, incorporándose a sulfuros secundarios como digenita o covelina, entre otros. Estos minerales pueden tener altas concentraciones de Au, incluso mayores a las de los minerales primarios del mismo depósito. En los casos en que el oro se comporta como elemento inmóvil, el Au se enriquece en el nivel de oxidación, por concentración residual, es decir, remoción de sulfuros y ganga soluble (Boyle, 1979). En este caso, el mineral supérgeno de oro es Au nativo. En particular, puede ocurrir enriquecimiento secundario de oro en niveles de óxidos de hierro, con Au alojado, en particular, en hidróxidos – óxidos de Fe. En este caso, las partículas minerales de Au poseen “alta fineza” (Hough et al., 2011), es decir, son partículas con concentraciones de Au que tienden al 100 %, dado que se Au se concentra debido a su baja solubilidad relativa vs. Ag, por ejemplo (Hough et al., 2009).

Es por todo lo anterior que el Au en un depósito puede estar ligado, según los procesos hidrotermales que han ocurrido en él, a distintas zonas de alteración hidrotermal, a distintos horizontes generados por procesos supérgenos, o a distintas fases minerales. Además, una ocurrencia importante de oro en estos depósitos es en la forma de Au nativo, por lo que se debe cuantificar cuánto Au está ligado a minerales, y cuando Au está libre, con fines de obtención del elemento en procesos mineros.

Capítulo 4

Metodologías

Con la finalidad de lograr los objetivos antes planteados, en la introducción, se realizaron estudios que emplean datos pre-existentes de Au y Ag de Los Pelambres-Frontera. Estos datos, en su gran parte, corresponden a resultados de análisis químicos de muestras obtenidas a partir de campañas de sondaje. Más adelante se explicitan las características de las bases de datos utilizadas. Posteriormente, y a modo general, estas bases de datos son robustecidas en información y utilizadas para estudio univariable de Au, y en la comparación de Au con otras características geológicas de interés. Por último, y a partir de los pasos antecedentes, se genera un plan de muestreo y análisis de zonas anómalas de Au en Los Pelambres-Frontera. A continuación se detallan las metodologías empleadas en cada etapa del trabajo.

4.1. Bases de datos

Para el estudio de la distribución espacial de Au en Los Pelambres-Frontera, así como también el de relaciones bivariantes entre elementos de interés y comparación con otras características geológicas, se cuenta con dos bases de datos de análisis de Au y Ag en sondajes: Base de Datos Histórica (BDH) y Base de Datos Nueva (BDN), las cuales están conformadas por datos previos al presente estudio. El número de análisis involucrados de oro, en ambas bases de datos, se resumen en la Tabla 4.1. En la Tabla 4.1 se incluyen también datos de Base de Datos Integrada (BDI), que corresponde a la base de datos que comprende BDH y BDN. Más adelante se expone la validez de combinar ambas bases de datos en la BDI, así como los

Tabla 4.1: Datos de muestras analizadas por Au, según base de datos.

Base de datos	Nº análisis de Au	Metros de testigo analizados	Nº Sondajes
Nueva (BDN)	6.777	13.551,85	165
Histórica (BDH)	15.223	93.996,55	542
Total (BDI)	22.000	107.548,40	707

alcances que tiene hacerlo.

4.1.1. Base de Datos Nueva (BDN)

La BDN considera datos geoquímicos obtenidos a partir de muestras de testigos diamantinos, principalmente. Los sondeos de esta base de datos fueron realizados entre los años 2006 y 2012. Consiste en 6.777 análisis de Au y Ag, cada uno de ellos georreferenciado según el tramo de sondeo obtenido. Para Au, los análisis se realizaron mediante la técnica de ensayo al fuego con posterior lectura mediante espectrometría de absorción atómica (FA-AAS), en muestras de 30g, utilizando crisoles exclusivos; en el laboratorio ActLabs, periodo 2012-2013. El límite de detección del método analítico, para Au, es 0,01 ppm. BDN tiene un soporte muestral de 2 metros en casi todos los casos.

Los sondeos comprendidos en la BDN están ubicados, en su mayoría, en los flancos NE y E del actual rajo (Fig. 4.1A). Existen unos pocos en el flanco SE, otros al N del rajo (entre 91000 N y 92000 N) y algunos, relativamente cortos, ubicados en el fondo del rajo. Cabe notar que la BDN no incluye sondeos en el sector Frontera, y esto constituye una diferencia

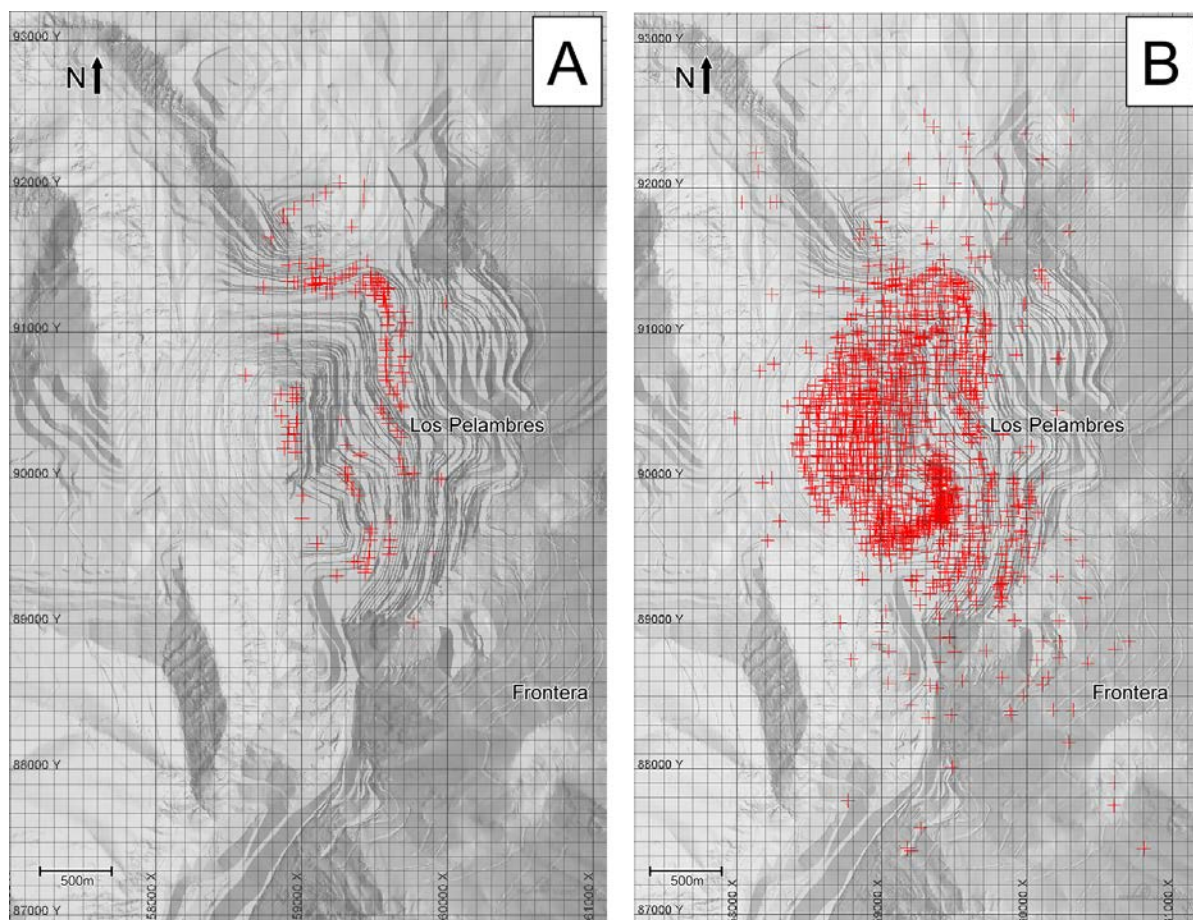


Figura 4.1: Ubicación de collares de sondeos de bases de datos en Los Pelambres-Frontera. Collares se denotan con cruces rojas. A: BDN. B: BDH.

importante con la BDH (Fig. 4.1B). Además, en la Figura 4.1A se puede constatar que la distribución de sondajes no es homogénea, sino que orientada deliberadamente a ciertos blancos.

4.1.2. Base de Datos Histórica (BDH)

Las muestras analizadas para la BDH, en contraste, se extrajeron de testigos diamantinos, y material obtenido por método de aire reverso, cutting, de sondajes que se llevaron a cabo entre los años 1980 y 2007. Esta última característica sugiere que parte de los datos de BDH corresponden a volúmenes de roca que ya han sido extraídos por la operación minera. La BDH comprende todos los datos analíticos de Au anteriores a los de la BDN (15.223 valores), pero no se tiene información sobre los métodos analíticos utilizados en la totalidad de las muestras para determinar las concentraciones de Au. Se caracteriza por no tener un soporte muestral constante, a diferencia de la BDN.

4.1.3. Base de Datos Integrada (BDI)

Como expuesto antes, la BDI presenta heterogeneidad en tipos de análisis por Au, así como también en el soporte muestral. Este último varía entre 0,35 y 66 metros, con un promedio de 4,88 metros por tramo analizado.

4.1.4. Comparación entre BDH y BDN

Además de las diferencias entre BDN y BDH expuestas anteriormente, como número de sondajes y muestras involucradas, existen otras importantes, como la distribución espacial de los datos de ambas bases de datos (Fig. 4.1). Con respecto a esto, en la distribución espacial de las muestras de la BDH (Fig. 4.1B) es posible notar que ésta abarca mayor área sondeada que la BDN (Fig. 4.1A), al menos en términos de distribución de collares de sondaje. Es posible observar que en la BDH se encuentra sondeado hacia el sureste del rajo: hacia el sector Frontera. Por otro lado, existen zonas donde se tienen datos tanto provenientes de BDH como de BDN. En particular, esto ocurre notoriamente en el flanco NE-E del actual rajo. Es importante notar al respecto que las muestras provenientes de sondajes del actual fondo del rajo, incluidas en la BDN, no comparten zona con muestras de la BDH, como la Figura 4.1 parece indicar: las muestras de esta figura, que están graficadas el rajo, son de elevaciones mayores a las muestras del fondo de la mina.

Dicho lo anterior, es relevante conocer si es que existe buena correlación de valores, entre las dos bases de datos, en zonas compartidas, con la finalidad de realizar observaciones a partir de una base de datos integrada. Para lo anterior, se consideran “datos comparables” aquellos que estén estrechamente relacionados, en un sentido espacial. La condición impuesta de comparación entre muestras de la BDN y la BDH es que disten entre ellas a lo más en 30

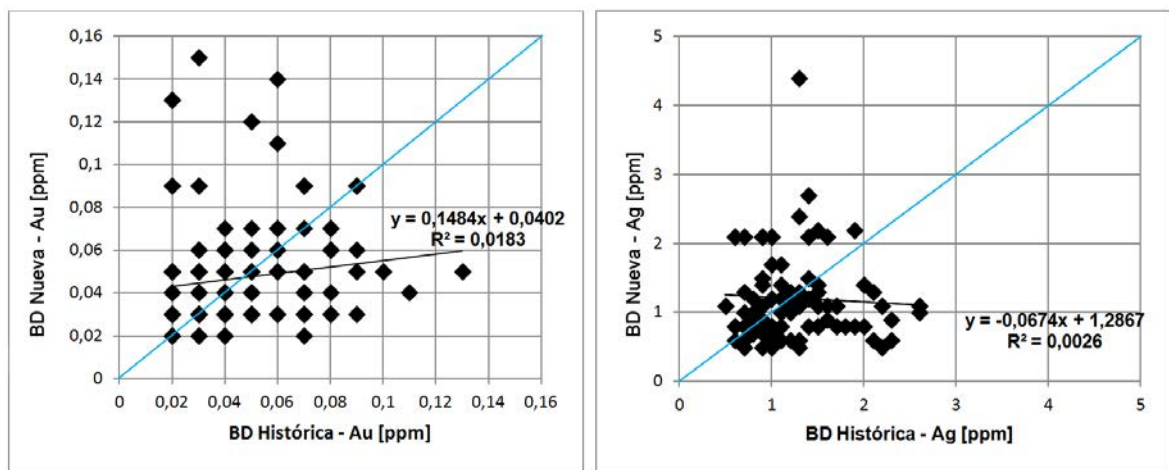


Figura 4.2: Correlación “muestra a muestra” entre datos próximos de BDN y BDH, para concentraciones de Au y Ag.

metros. Con esta condición, se compararon las leyes de Au de 178 muestras cercanas y 119 muestras para Ag. La comparación se hizo de dos formas: muestra a muestra, y comparación global.

En la comparación muestra a muestra (Fig. 4.2) se nota que para Au la correlación es débil (aunque presenta tendencia positiva), y es aún menor para Ag. Sin embargo, cuando se analizan todos los datos juntos, los promedios de leyes de Au y Ag entre BDN y BDH son muy similares (Tabla 4.2). Lo anterior evidencia una correlación macro entre leyes de BDN y BDH, es decir, podrían eventualmente definir las mismas zonas anómalas.

Por lo expuesto en el marco teórico, se conoce que una ocurrencia importante de Au es como granos de oro nativo, de distribución heterogénea a escala pequeña; o inclusiones del mismo en minerales, especialmente sulfuros. Este tipo de ocurrencia puede provocar un efecto pepita, alterando los resultados de análisis de Au en muestras con granos de oro, y, en particular, puede hacer que muestras muy cercanas tengan leyes de Au completamente diferentes. Además, para sondajes se constata que muestras contiguas, pertenecientes al mismo sondaje, presentan en muchos casos leyes de oro muy distintas entre sí. Es por lo anterior, que es esperable los resultados del análisis muestra a muestra expuesto aquí.

Considerando que a escala mayor las leyes de Au (y Ag) son bastante coincidentes entre BDN y BDH (ver sección “distribución espacial de Au”), que la BDN no comprende el sistema Los Pelambres-Frontera en su completitud, y que las distribuciones espaciales de oro suelen

Tabla 4.2: Correlación general entre datos próximos (< 30 metros) de BDN y BDH, para concentraciones de Au y Ag.

	Promedio Au [ppm]	Promedio Ag [ppm]
BDH	0,0467	1,260
BDN	0,0466	1,252
Diferencia [%]	0,12 %	0,60 %

ser heterogéneas a pequeña escala, se hace posible y necesario combinar las bases de datos en una sola, en la BDI, en función de detectar anomalías de Au a escala del depósito completo.

4.1.5. Robustecimiento de las bases de datos

Adición de elementos químicos

La preparación de las bases de datos integradas, de cinco elementos químicos (Au, Ag, Cu, Mo, As), que fueron utilizadas para el estudio de la distribución espacial y bivariable de oro y plata en Los Pelambres-Frontera, fue lograda mediante composición en Maptek Vulcan (v.8.0.2), a partir de bases de datos separadas en formato isis. Algunas leyes de ciertos tramos de sondaje no son completadas automáticamente por el proceso en Vulcan. Estas leyes fueron actualizadas manualmente, usando Microsoft Excel 2010, mediante promedios ponderados de leyes de tramos más pequeños que están contenidos en los tramos sin ley; e implementando un código en Matlab (v. 7.12.0.635 [R2011a]) para casos con otras condiciones, menos frecuentes.

Se considera que el límite de detección de los análisis, en la base de datos integrada, es: 0,01 ppm Au, 0,1 ppm Ag, 0,01 wt. % Cu, 1 ppm As y Mo. Por lo anterior, a los valores de Au y Ag menores al límite de detección se les asignó 0,005 y 0,05 ppm, respectivamente, por convención. Todos los valores negativos en la base de datos (ej.: -1, -9) fueron reemplazados por celdas en blanco ('null') para evitar ser considerados. Esto es porque se asume que valores negativos representan falta de análisis químicos o de datos representativos.

Adición de información geológica

A cada dato de Au de BDI se le añadió información sobre litología, alteración hidrotermal, rangos de intensidad de vetillas y cantidad absoluta de vetillas, según la disponibilidad de esta información para cada tramo de sondaje. El criterio para asignar la información a cada tramo es coincidencia total, y en los casos donde esto no fue posible, se asignó la información más representativa para el tramo de sondaje (ej.: la litología que esté en mayor proporción). Además, información sobre unidades geológicas y abundancia de sulfuros (briquetas) también fue incorporada. Lo anterior fue realizado exportando las bases de datos de cada información geológica de interés desde Vulcan, para luego, mediante algoritmo implementado en Matlab, asignar información a cada tramo.

Datos sobre unidad geológica (UG) no fueron empleados en el estudio, debido a que definición de UG está hecha para Los Pelambres, y no para Frontera. Datos sobre abundancia de sulfuros tampoco fueron utilizados directamente (muestra a muestra), debido a que cada dato de abundancia mineral medida con briquetas representa volúmenes de roca en los cuales la distribución de Au es muy heterogénea.

4.2. Sistema de coordenadas

El sistema de coordenadas utilizado en todas las figuras originales, georeferenciadas, de este trabajo, es el sistema “coordenadas mina”, debido a que la información espacial de las bases de datos de sondajes, modelos litológicos y de alteración, entre otros, está en aquel formato.

Este sistema de coordenadas corresponde a una abreviación de las coordenadas del sistema de coordenadas proyectadas UTM WGS84 zona 19S, correspondiente a Los Pelambres-Frontera; por ende, ambas pueden ser utilizadas de la misma forma para medir distancia (metros) y como escala. La coordenada mina corresponde a los últimos 5 dígitos de la coordenada UTM, tanto en coordenadas norte como en este. Las coordenadas N pueden tener el sufijo Y, y las E, X.

Para transformar de coordenadas mina a coordenadas UTM WGS84 19S, se debe anteponer “64” a la coordenada N, y “3”, a la E.

4.3. Metodologías para análisis univariable y espacial de Au

Para el estudio univariable y espacial de Au (y Ag) en Los Pelambres-Frontera, se generaron y analizaron gráficos de análisis univariable, estadística univariable, vistas en planta y en perfil de distribución espacial de datos. Con esto, se definen zonas anómalas de Au en el sistema. Luego, fue generado un mapa de isoleytes de Au y sólidos de oro y plata altos para Los Pelambres-Frontera.

La estadística no ponderada de las bases de datos es calculada mediante ioGAS (v. 4.5.1). Para la obtención de parámetros estadísticos ponderados, se utilizan las siguientes expresiones:

$$\bar{x}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$
$$\sigma_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x}_w)^2}{\sum_{i=1}^n w_i}}$$

donde \bar{x}_w y σ_w son la media ponderada y la desviación estándar ponderada, respectivamente. El valor x_i representa la ley del elemento estudiado, del tramo i ; y w_i , el largo del tramo i , que es el factor de ponderación de las ecuaciones anteriores. En particular, estas expresiones se utilizan para calcular la media y la desviación estándar de cada uno de los 5 elementos químicos de la BDI.

Los gráficos de análisis univariable de Au y Ag (gráficos log-normal y de frecuencia acumulada), así como también las vistas en planta y perfil de estos datos, se lograron usando ioGAS. La distinción de poblaciones en los gráficos de análisis univariable fue realizada visualmente.

Los mapas y perfiles de isoplejes de Au fueron creados en Surfer (v. 9.11.947), mediante krigeaje lineal, utilizando todas las muestras disponibles en la BDI. Los intervalos de isoplejes son similares a las de Brockway et al. (2008).

A partir de poblaciones definidas en el estudio de análisis univariable de Au y Ag, fueron definidas dos poblaciones de datos para Au y tres poblaciones para Ag (ver sección de análisis univariable de Au). Con esto en consideración, se define la población de mayores leyes de Au como “Au alto” ($[Au] \geq 0,1$ ppm) y la población de mayores leyes de Ag como “Ag alto” ($[Ag] \geq 2$ ppm). La definición antes hecha tiene como criterio, además del de poblaciones, definir límites apropiados de concentraciones, para los elementos químicos antes mencionados, tal que definan de buena forma zonas anómalas, y tal que éstas sean útiles para comparación con otras características geológicas. Con esta definición, Geología CMLP creó sólidos de Au y Ag altos (com. escrita M. Garay, 2013), mediante Leapfrog (v.2.4.5.17) que representan volúmenes en Los Pelambres-Frontera que cumplen la condición antes descrita.

4.4. Metodologías para análisis de correlación bivaria- ble de Au

El análisis bivaria-ble de Au (y Ag) fue realizado gráficamente, generando y estudiando tendencias en gráficos de dispersión entre Au y otros elementos químicos. Estos gráficos se obtienen utilizando ioGAS, así como también información sobre densidad de puntos en cada nube de datos, y rectas de mejor ajuste a los datos, con valores R^2 que en algunos gráficos se explicitan.

Algunos gráficos de relaciones bivaria-bles fueron estudiados empleando leyes normalizadas a *Z-Score* (valor Z), mediante la siguiente fórmula:

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

donde Z_i es el valor Z de la ley del tramo de sondaje i , del elemento estudiado; x_i es la ley del elemento, \bar{x} y σ , el promedio y la desviación estándar, respectivamente. El estudio de leyes sin normalizar, y normalizadas, es igualmente válido: en ocasiones se normaliza para mejorar aspecto del gráfico.

Cuando se visualizaron tendencias claras en un diagrama de dispersión, los datos que la seguían se seleccionaron usando ioGAS, y luego se visualizaron espacialmente. Así, en algunos casos se atribuyen ciertas tendencias bivaria-ble a determinados sectores dentro de Los Pelambres-Frontera.

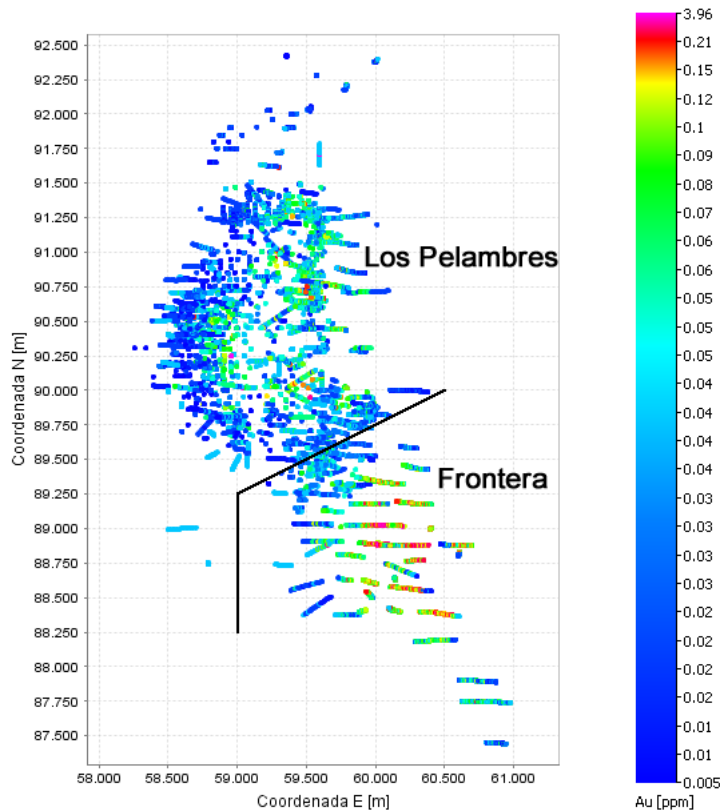


Figura 4.3: Criterio de separación de BDI en bases de datos de Los Pelambres y Frontera.

Dado que Los Pelambres tiene características distintas a Frontera, la BDI se analizó completa, en primera instancia, y luego se estudió por separado: BDI se separa en BD Los Pelambres y BD Frontera. La separación arbitraria entre Los Pelambres y Frontera (Fig. 4.3) está dada por dos planos verticales, cada uno definido por una recta de las siguientes:

$$[N] = 0,5 [E] + 60500$$

$$[E] = 59000$$

Donde $[N]$ corresponde a la coordenada N (coordenadas mina), y $[E]$, a la E. Rectas definidas en el plano coordenada E – coordenada N (vista en planta).

4.5. Metodologías para comparación de Au y mineralogía, litología, alteración hidrotermal y vetillas

Esta comparación se efectuó, en parte, utilizando modelos tridimensionales computacionales de ciertas variables geológicas. Estos modelos 3D se denominan “sólidos”, y los criterios que los definen se exponen en el capítulo de Distribución y Ocurrencia de Au en Los

Pelambres-Frontera. A grandes rasgos, la comparación entre Au y otras variables geológicas se hizo de dos formas: 1.- comparación visual entre sólidos de Au (y Ag) altos y sólidos de característica geológica a comparar; y, 2.- mediante datos estadísticos de BDI y modelo de bloques de 2013, de Los Pelambres-Frontera, separados en Los Pelambres y Frontera según el mismo criterio expuesto para el estudio de análisis de correlación bivariable de Au. Todas las comparaciones visuales entre sólidos de Au-Ag altos y otras características fueron realizadas usando Vulcan, mientras que las comparaciones estadísticas, en Excel. Todos los sólidos utilizados en la comparación mediante Vulcan fueron creados por Geología MLP (com. escrita M. Garay y B. Riquelme, 2013). El software empleado para la generación de los sólidos antes nombrados es Leapfrog. Cabe notar que en la comparación visual de los sólidos con otras características geológicas, en Vulcan, el software utiliza rutinas de sombreado e iluminación que puede hacer que el color de representación de cada sólido sea variable dentro de un rango acotado, pero que no invalida su utilización con fines de comparación. Superposición de sólidos en la vistas mediante Vulcan también puede provocar el efecto antes descrito.

Para la comparación con mineralogía, se compararon sólidos de Au-Ag altos con sólidos de abundancia mineral alta, definidos al efectuar el modelamiento de sulfuros para estimación de ley de concentrado en Los Pelambres-Frontera (Garay, 2013). La definición exacta de cada sólido se encuentra en la sección “Relación entre zonas anómalas de Au y abundancia de sulfuros”. Adicionalmente, y para comparar Au y Ag altos con horizontes supérgenos, se compararon con sólido de horizonte de enriquecimiento secundario y con sólido de nivel de anhidrita. Mediante Vulcan, se confeccionaron secciones W-E a partir de estos sólidos. Por último, Au alto se comparó con algunas zonas mineralógicas (Garay, 2013), que corresponden a volúmenes de roca caracterizados por una abundancia mineral relativa, de sulfuros, en específico (ej.: zona mineral de bornita \geq calcopirita). La información sobre zonas minerales está contenida en el modelo de bloques de Los Pelambres-Frontera, por lo que se visualizó directamente en Vulcan.

Las relaciones entre Au y Ag alto y litología-alteración hidrotermal se realizaron visualmente, en el caso de litología, usando sólidos de litología creados según el modelo litológico actual de Los Pelambres-Frontera, y en el caso de alteración, mediante sólidos de alteración hidrotermal que consideran a las lavas de la Formación Pachón, del sector Frontera, como alteradas hidrotermalmente (alteración potásica), y no como rocas córneas asociadas a metamorfismo de contacto. Estadísticamente, el estudio se hizo utilizando gráficos de barra que muestran ley promedio de Au-Ag por litología y alteración, a partir de modelo de bloques de Los Pelambres-Frontera, debido a que éste presenta la ventaja de dividir las zonas anómalas en partes iguales (bloques) de los que se pueden calcular abundancias relativas de litología y alteración hidrotermal. También se consideran datos de BDI, los cuales se usaron en la discusión, pero no son mostrados gráficamente.

En contraste con los anteriores, la comparación visual de vetillas y zonas de Au-Ag anómalo se hizo directamente con gráficos de intensidad de vetillas de Perelló et al. (2012). La estadística de Au-Ag vs vetillas, por otro lado, se realizó exclusivamente con datos de la BDI. En esta base de datos se tienen dos tipos de datos de vetillas, como explicado antes: rangos de intensidad de vetillas, donde se agrupan vetillas A+B y ED+D; y conteo de vetillas por tramo, donde se poseen datos de vetillas T4, A, B, ED y D. Los rangos de intensidad de vetillas comprenden datos de amplia distribución en Los Pelambres-Frontera, mientras que

solo 6176 de los 22000 datos de BDI poseen conteo absoluto de vetillas (número exacto de vetillas en cada tramo, por tipo).

4.6. Metodologías para caracterización geológica de zonas anómalas de Au

Una vez completado el estudio de datos preexistentes de Au y Ag de bases de datos, y comparados estos datos con otras características geológicas también en otras bases de datos, se escogieron tramos de sondajes representativos de cada zona anómala de Au para realizar caracterización geológica de las mismas. Los sondajes de los cuales se escogieron tramos se explicitan en la sección “Caracterización geológica de zonas anómalas de Au” En estos tramos de sondaje, de 25 metros cada uno, se efectuó remapeo de algunas características geológicas relevantes: litología, tipo de alteración hidrotermal, porcentaje de sulfuros, mineralización, estilo de mineralización, mineralización hipógena o supérgena, tipo de vetillas presentes, intensidad del vetilleo y abundancia relativa entre tipos de vetillas, razones entre minerales de mena y presencia o ausencia de magnetita. Todo lo anterior se realizó con el apoyo de mapeos previos de cada sondaje. Adicionalmente, se caracterizaron geológicamente algunas zonas con bajos contenidos en Au, y otras con altos contenidos en Au y As.

4.7. Plan de muestreo y análisis químicos y mineralógicos

Según criterios de zonas anómalas de Au, y características geológicas de las mismas, se definieron tramos de sondaje para obtención de muestras, que están estrechamente ligados a testigos de sondajes a partir de los cuales se realizó la caracterización geológica de zonas anómalas de Au. Se extrajeron dos tipos de muestras, con dos finalidades distintas:

23 muestras fueron tomadas para analizar concentraciones de Au de cada mineral de interés en la muestra, para medir contenido total de sulfuros y abundancias modales de minerales, y para medir concentración total de Au y Ag en la muestra. Lo anterior, además, puede ser usado para cálculo de Au no ligado a los minerales de interés que se analizan por Au. Estas muestras fueron preparadas según el protocolo de preparación mecánica AU1 (Fig. 4.4), que se describe más adelante en esta sección, y de donde se obtuvieron submuestras, las cuales se utilizaron para fines de análisis químicos y mineralógicos.

Por otro lado, otras dos muestras compuestas se extrajeron con la finalidad de estudio de partículas minerales de Au en concentrados de minerales pesados. Estas muestras fueron preparadas según el protocolo de preparación mecánica AU2 (Fig. 4.5), que se describe más adelante en esta sección.

El detalle de la ubicación de cada muestra, es decir, sondaje del cual proviene la muestra,

y el tramo en específico de la misma, se detalla en la sección de análisis. La ubicación de cada uno de estos sondajes se explicita en la sección “Caracterización de zonas anómalas de Au”. También se detallan los minerales de interés a separar de cada muestra.

4.7.1. Muestras de protocolo AU1

Las 23 muestras que fueron preparadas según el protocolo de preparación mecánica AU1 tienen en promedio una masa de 7,24 kg cada una, masa que es lograda a partir de parte de testigos diamantinos, lo que a su vez se obtienen cortando tramos de 4 metros a partir de testigos de sondajes de diámetro HQ. Para testigos de sondaje de menor diámetro, fueron usados tramos más largos para lograr masas similares. La totalidad de los testigos de sondaje escogidos para obtención de muestras se encontraban cortados por la mitad, longitudinalmente, por lo que se extrajo la mitad del testigo disponible, es decir, las muestras consisten en cuartos longitudinales de testigo de sondaje, y el cuarto de sondaje restante queda como registro del testigo, en testigoteca. El corte de los testigos para muestras de protocolo AU1 fue realizado por Geatacama (sala de corte – El Quillay).

Una vez obtenidos los cuartos de testigos de cada muestra, se aplicó el protocolo AU1 para la obtención de submuestras. En la Figura 4.4 se explicita el protocolo AU1, el cual considera pasos intermedios de chancado, pulverización y división de la muestra. El protocolo AU1 fue ejecutado por Alfred H. Knight (AHK-El Quillay) para las 23 muestras antes mencionadas. Antes de la preparación mecánica de las muestras, AHK realizó pruebas de protocolo en muestras de prueba, de características similares a las originales. La reducción de tamaño de partícula fue realizada usando un chancador de mandíbulas, y la división, empleando un divisor rotatorio.

Un 75 % de la muestra original fue utilizada para separación de minerales de interés, procedimiento realizado en el Laboratorio de Separación de Minerales, del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, para posterior análisis de contenidos de Au en cada fase mineral separada, análisis que se realizaron en Andes Analytical Assay. El resto de la muestra fue empleada para análisis de composición mineralógica modal, estudio realizado por Brockway y Franquesa (B&F) Consultores, y para análisis químicos de Au-Ag y litogeoquímica, que se llevaron a cabo en Andes Analytical Assay.

4.7.2. Muestras de protocolo AU2

Las dos muestras que son preparadas según el protocolo AU2 tienen en promedio 14,08 kg cada una. Cada muestra está compuesta de 5 tramos de diferentes sondajes de la misma zona anómala de Au. Cada uno de estos tramos es de 1,5 metros, dando un total de 7,5 metros de cuarto de testigo de sondaje por muestra. El procedimiento de corte es idéntico que para las muestras del protocolo AU1. La ejecución del protocolo AU2 también fue llevada a cabo por AHK, empleando los mismos equipos mencionados antes. El protocolo AU2 es explicitado en la (Fig. 4.5). Un 83 % de la muestra fue utilizada para el estudio de partículas de minerales

PROTOCOLO AU1: ESTUDIO DE CONCENTRACIÓN DE AU EN MINERALES DE INTERÉS, SEGÚN COMPOSICIÓN MINERALÓGICA MODAL Y CONCENTRACIONES DE AU Y AG EN MUESTRAS

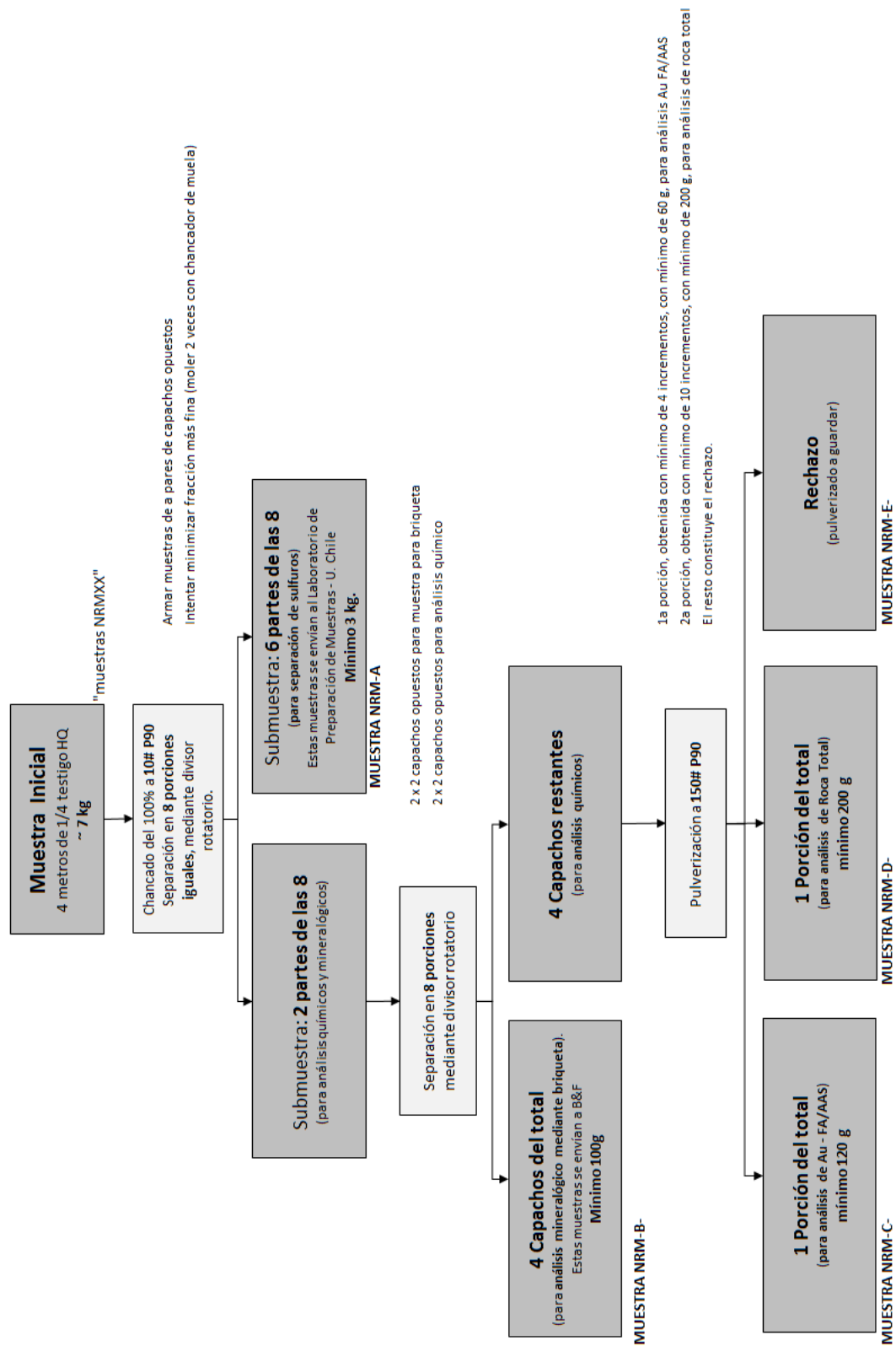


Figura 4.4: Protocolo de preparación mecánica AU1.

PROTOCOLO AU2: ESTUDIO DE MINERALES DE Au EN CONCENTRADOS DE MINERALES PESADOS

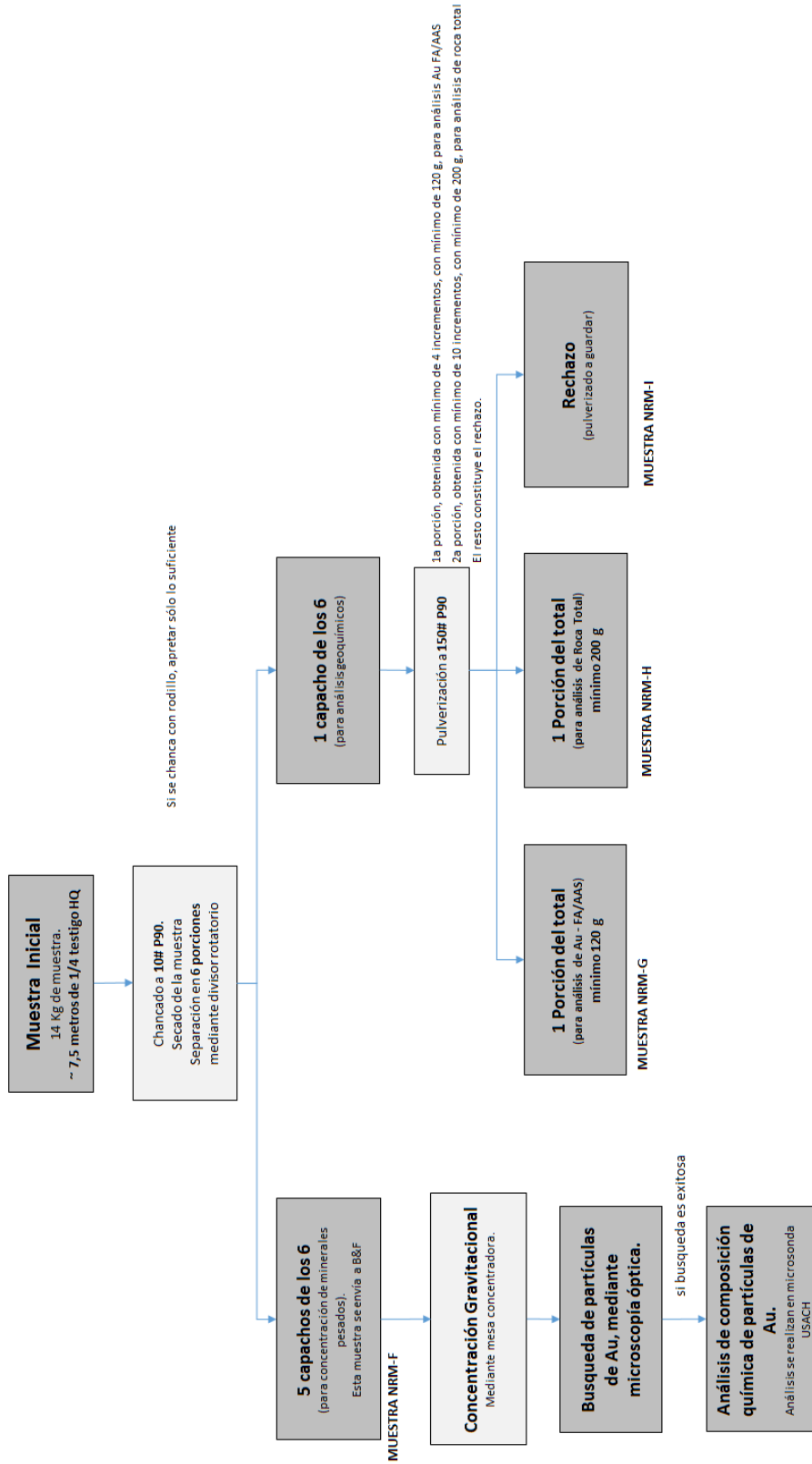


Figura 4.5: Protocolo de preparación mecánica AU2.

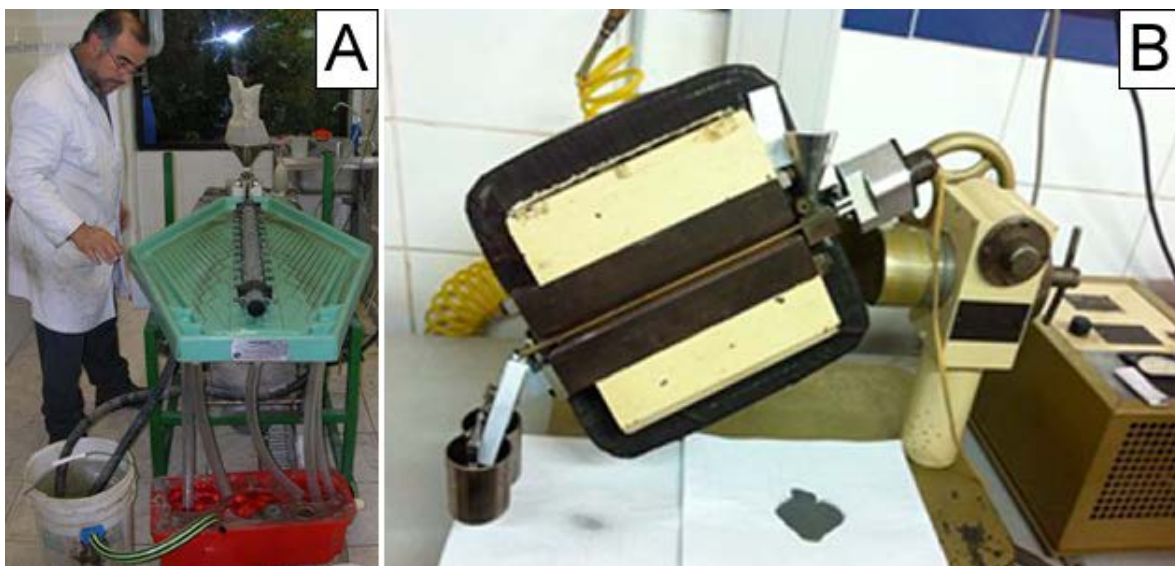


Figura 4.6: Equipamiento del Laboratorio de Separación de Minerales del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. A: mesa concentradora Gemeni mk2. B: separador magnético. Imágenes tomadas de Universidad de Chile (2013), documento alojado en la página web del laboratorio.

de Au, estudio realizado por B&F Consultores.

4.7.3. Separación de minerales de interés y posterior análisis químico por Au

Como indicado antes, la separación de minerales de interés se realizó en el Laboratorio de Separación de Minerales del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Los minerales a separar fueron sulfuros de Fe y Cu-Fe, además de magnetita, por las razones expuestas en el marco teórico. En particular, los minerales a separar y luego analizar son: bornita, calcopirita, pirita, calcosina, covelina, molibdenita y magnetita, según éstos ocurran en cada muestra.

El procedimiento de separación de minerales, según lo indicado en Universidad de Chile (2013), comienza con el chancado y tamizado de la muestra. Como el material enviado al laboratorio ya está chancado (ver protocolo AU1, Fig. 4.4), solo es tamizado. Posteriormente el material es lavado y concentrado utilizando una mesa concentradora modelo Gemeni Table mk2 (Fig. 4.6A), de donde se extrae la fracción pesada de la muestra, que contiene los minerales buscados. Luego, el material es secado con lámpara infrarroja. Una vez seca la submuestra, se procede a separar los minerales magnéticos usando un separador magnético (Fig. 4.6B). En esta etapa es separada la magnetita de la muestra. Separada la fracción magnética de la muestra, se procede a separar los minerales más pesados, sulfuros en este caso, mediante líquidos densos: inicialmente bromoformo ($2,8 \text{ g/cm}^3$) y luego yoduro de metileno ($3,3 \text{ g/cm}^3$). Finalmente, la separación entre sulfuros se realiza manualmente mediante lupa binocular.

El resultado del procedimiento anterior es un separado de sulfuros o magnetita, es decir, un material consistente en 100 % el mineral indicado, de una masa de aproximadamente 500 mg. Esta cantidad de material no es compatible con métodos analíticos de Au por ensayo al fuego y lectura mediante espectrometría de absorción atómica, debido a que estos métodos requieren una cantidad de muestra igual o superior a 30 gramos para asegurar resultados significativos. Para esta masa, los separados de minerales fueron analizados mediante ensayo al fuego y lectura exclusiva para Au mediante ICP-AES, en Andes Analytical Assay. El límite de detección informado de esta técnica es de 0,3 ppm. Control de calidad de este análisis se puede encontrar en el Anexo C.

4.7.4. Análisis mineralógico modal

Para el estudio mineralógico modal de cada muestra, se envió material chancado a B&F Consultores, donde este material se redujo en tamaño de partícula para confección de briquetas, las cuales se analizaron mediante microscopio óptico con luz reflejada. Se realizó una briqueta por muestra. Los resultados del estudio de briqueta fueron comparados con análisis químicos de cada muestra, realizados por encargo de B&F Consultores (son análisis químicos adicionales a los contemplados en este estudio), donde se ajustaron las composiciones modales a las químicas. En este estudio se contemplaron dos muestras duplicadas. Control de calidad de este análisis se puede encontrar en el Anexo C.

4.7.5. Análisis químicos de Au-Ag y litogeoquímica

Los análisis químicos de Au y Ag en roca total y litogeoquímica están contemplados para las muestras del protocolo AU1. Estos análisis fueron realizados en Andes Analytical Assay. Control de calidad de este análisis se puede encontrar en el Anexo C.

Au en roca total fue analizado por ensayo al fuego con lectura mediante espectrometría de absorción atómica en muestras de 50 gramos. Para estos análisis, Andes Analytical Assay reporta límites de detección de 0,01 ppm y límite superior de 5 ppm. Ag en roca total fue analizado por digestión ácida (agua regia) y lectura mediante espectrometría de absorción atómica. El límite de detección de esta técnica es de 0,1 ppm, mientras que el límite superior es de 50 ppm.

Los análisis de litogeoquímica comprenden una batería de elementos mayores y metales base a analizar mediante ICP-AES. La técnica utilizada fue fusión alcalina con Na_2O_2 , para batería de elementos mayores; y digestión ácida de cuatro ácidos ($\text{HNO}_3 - \text{HCl} - \text{HClO}_4 - \text{HF}$) para elementos menores. En el caso de Cu, el método presenta límite superior de confianza de 1,0 wt. %, por lo que en los casos en que la muestra presentó mayor concentración de Cu, se analizó mediante espectrometría de absorción atómica.

El estudio de Au y Ag en roca total consideró envío de estándares secundarios a laboratorio (material de referencia CU187 de WCM Minerals, 0,51 ppm Au, 12 ppm Ag), blancos

(material de referencia AuBlank, de Rocklabs, <0,002 ppm Au, matriz de óxidos) y duplicados. Los estándares secundarios tienen un índice de confiabilidad de 95 %. Por otra parte, en el estudio de litogeoquímica también se utilizó el material de referencia CU187, como estándares secundarios para Cu y Mo (0,38 wt. % Cu, 0,019 wt. % Mo). Se incluyen certificados de material de referencia en el Anexo D.

4.7.6. Estudio de partículas de minerales de Au

Este estudio fue realizado por B&F Consultores, a partir de las muestras del protocolo AU2. El estudio de ocurrencias de minerales de Au fue orientado a la fracción pesada de cada muestra, dadas las posibles ocurrencias de Au vistas en el marco teórico.

Cada una de las dos muestras se chancó, mediante molienda controlada, a una granulometría de 65# Ty. Este material fue posteriormente concentrado gravitacionalmente mediante mesa, proceso que entrega, como productos, una fracción concentrada, una mixta y un rechazo. El procedimiento fue realizado por AYS Metalurgia, por encargo de B&F Consultores. Cada uno de estos productos, incluida la muestra original (cabeza), fueron analizados por Au, estudios llevados a cabo por Metalquim, por encargo de B&F Consultores. Posteriormente, a partir de la fracción pesada de cada muestra, se confeccionaron 5 briquetas; y a partir de la fracción mixta, se confeccionó una briqueta de cada muestra. Éstas fueron estudiadas usando microscopía óptica, con el fin de hallar posibles partículas de Au y examinar sus asociaciones minerales. La cantidad de briquetas confeccionadas fue arbitraria: se buscó maximizar las posibilidades de hallar partículas de Au.

Las partículas halladas fueron posteriormente analizadas mediante microsonda electrónica, en la Universidad de Santiago, para conocer su composición química exacta (de elementos más abundantes en cada partícula) y así además comprobar que se tratan de partículas con altos contenidos en Au. Con el procedimiento anterior se puede conocer los contenidos de Ag en partículas de Au (posible electrum).

Capítulo 5

Distribución y ocurrencia de Au en Los Pelambres-Frontera

5.1. Distribución espacial de Au en Los Pelambres - Frontera

Con la finalidad de estudiar y actualizar la distribución espacial de concentraciones de oro en Los Pelambres-Frontera se utiliza la Base de Datos Nueva (BDN) en primera instancia, dada la calidad superior de los datos de BDN con respecto a la Base de Datos Histórica (BDH). Debido a que una revisión de BDN por sí sola no es válida para todo Los Pelambres-Frontera, debido a una distribución no uniforme de datos (ver metodologías), posteriormente se estudia la Base de Datos Integrada (BDI). Para mayores detalles respecto a las bases de datos empleadas, consultar la sección de metodologías.

5.1.1. Distribución espacial de Au – BDN

Los datos estadísticos de Au y cuatro elementos más se muestran en la Tabla 5.1. Se tiene una media de 0,048 ppm Au, lo que representa un enriquecimiento de 24 veces el valor promedio cortical, según el valor reportado por Dill (2010), el cual es $[Au] = 0,002$ ppm. El 5 % de las muestras presenta $[Au] \geq 0,1$ ppm, mientras que 25 % de ellas tiene $[Au] \geq 0,06$ ppm. Concentraciones menores e iguales al límite de detección (0,01 ppm) constituyen los valores de fondo de Au, los que ayudan a la delimitación gráfica de zonas anómalas (ver más adelante).

El análisis univariable de leyes de Au se muestra en la Figura 5.1, a partir de gráficos de frecuencia acumulada y log-normal (Figs. 5.1A y 5.1B, respectivamente), con la finalidad de distinguir poblaciones de datos. En la Figura 5.1A se aprecia que en el 10 % superior del gráfico, las leyes aumentan de una manera que pareciera ser exponencial. Esto constituye una

Tabla 5.1: Datos estadísticos BDN

Parámetro Estadístico	Au [ppm]	Ag [ppm]	Cu [wt %]	Mo [ppm]	As [ppm]
Número de muestras analizadas	6777	6777	6777	6777	6274
Mínimo	0,005	0,05	0,01	2,5	5,0
Máximo	1,100	163,10	5,01	8410,0	9564,0
Media (pond.)	0,048	1,43	0,66	156,4	46,8
Mediana	0,040	1,20	0,60	86,0	10,0
Desviación Estándar (pond.)	0,038	2,31	0,33	286,4	236,2
Rango Intercuartil	0,030	1,00	0,33	131,5	16,0
Percentil 1	0,005	0,05	0,11	8,0	5,0
Percentil 5	0,010	0,30	0,27	16,0	5,0
Percentil 10	0,020	0,50	0,35	23,0	5,0
Percentil 25	0,030	0,80	0,46	40,5	5,0
Percentil 75	0,060	1,80	0,79	172,0	21,0
Percentil 90	0,080	2,50	1,04	338,0	69,0
Percentil 95	0,100	3,00	1,23	506,0	169,0
Percentil 99	0,180	5,00	1,85	1091,1	730,5

diferencia con lo que sucede en el resto de la distribución, donde se da un aumento gradual en leyes, de manera lineal. Lo anterior es reflejo de que una pequeña parte de la población tiene leyes muy superiores a la del resto (asimetría positiva), algo típico de la distribución de elementos menores (Isaaks y Srivastava, 1989). Mientras que el gráfico de probabilidad acumulada muestra una notable doble tendencia de datos, el gráfico log-normal (Fig. 5.1B) la muestra en forma menos clara, ya que los datos se ubican en una recta de la que no se diferencian poblaciones inmediatamente. Es por lo antes mencionado que los datos de concentración de oro pueden ser divididos en dos poblaciones: datos con $[Au] \geq 0,1$ ppm, y datos con concentraciones menores (división dada por línea segmentada roja en la Fig. 5.1).

A partir de las Figuras 5.2A, 5.3 y 5.4, se puede visualizar que existen tres zonas que

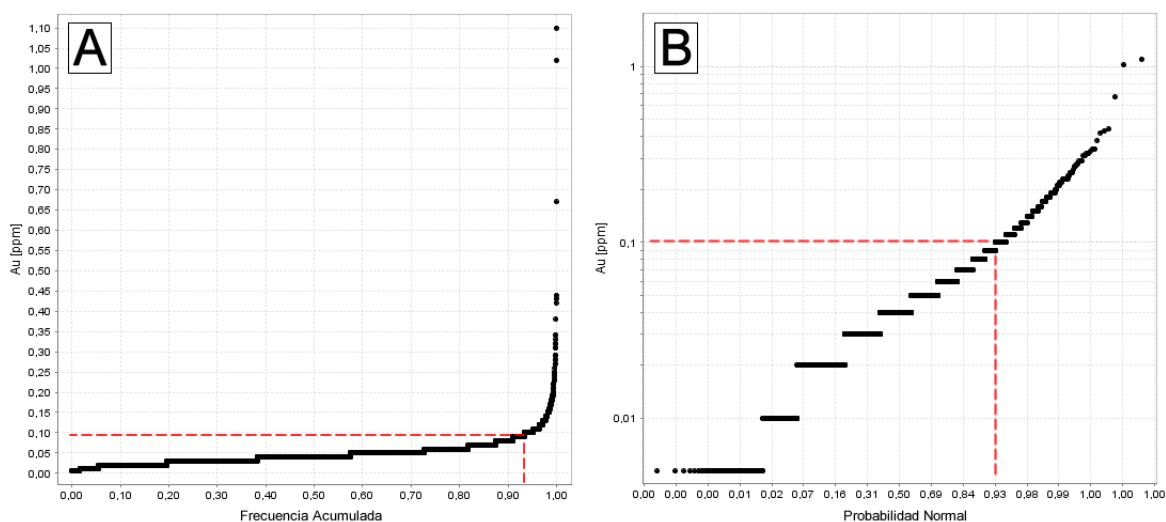


Figura 5.1: Gráficos de análisis univariable de Au – BDN. Línea roja segmentada representa división de población de datos. A: gráfico de frecuencia acumulada. B: gráfico log-normal Au.

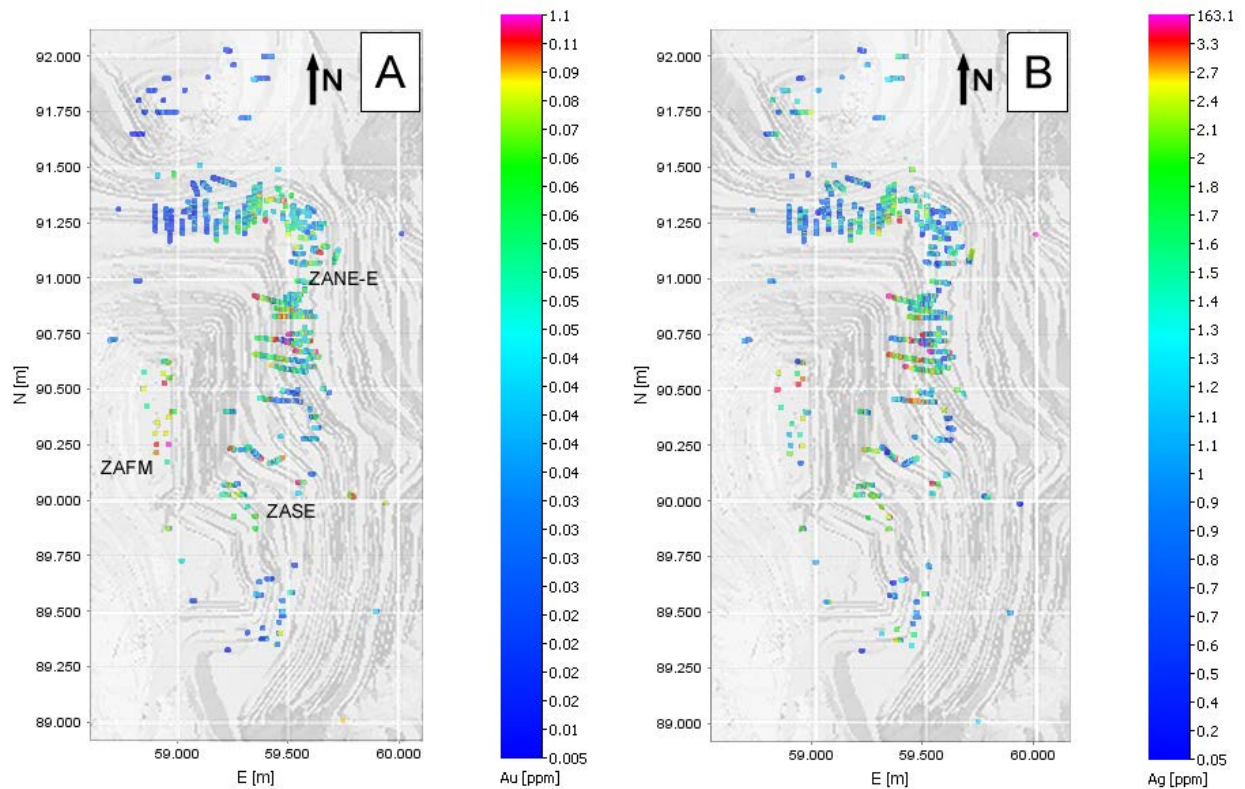


Figura 5.2: Vista en planta de datos de [Au] y [Ag] - BDN. A: [Au], ppm. B: [Ag], ppm.

concentran las muestras de mayor ley de Au ($[Au] \geq 0,05$ ppm) de la distribución antes mostrada: la primera, en el flanco NE-E del rajo (en adelante, llamada Zona Anómala Noreste-Este, ZANE-E); la segunda, en el fondo de la actual mina (en adelante, llamada Zona Anómala Fondo Mina, ZAFM); y la tercera, al sureste del fondo del actual rajo, en adelante, Zona Anómala Sur Este (ZASE), de menores leyes de oro que las otras dos zonas.

La ZANE-E consiste en una anomalía de Au, con algunos tramos de sondaje que presentan $[Au] \geq 0,05$ ppm, pero diluido por tramos de menor ley. Presenta muestras anómalas entre 2950-3400 metros de elevación s.n.m. (Figs. 5.3 y 5.4), y es de dimensiones aparentes mayores a ZAFM. ZANE-E ya había sido definida antes por algunos trabajos del depósito (ej.: Brockway et al., 2008).

La ZAFM representa una anomalía no acotada a mayores profundidades (menores elevaciones), ya que solo se han hecho sondajes cortos en ella. ZAFM es definida por menor cantidad de datos que ZANE-E. Con los datos disponibles a fines de enero de 2013, esta zona comprende 100 metros en profundidad (2800-2900 metros de elevación s.n.m., Figs. 5.3 y 5.4). Existe también la posibilidad que ZAFM y ZANE-E sean solo un único cuerpo enriquecido relativamente en Au, considerando la ausencia de muestras entre estos dos, al menos en la BDN. ZAFM constituye una nueva zona anómala, con leyes habituales de $Au \geq 0,05$ ppm. ZAFM es una generalización de las anomalías aisladas detectadas en trabajos pasados (Brockway et al., 2008; Perelló et al., 2012), asociadas al centro hidrotermal sin magnetita DAM-01.

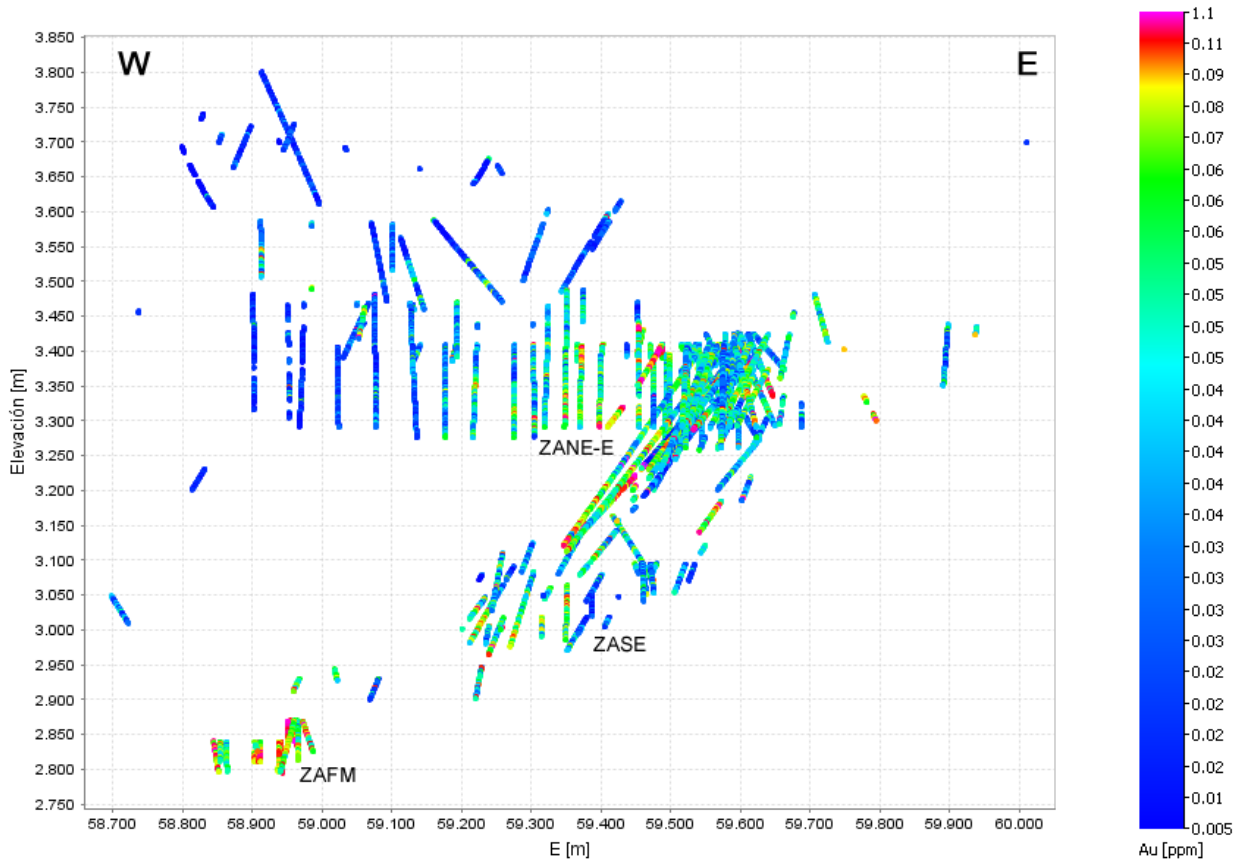


Figura 5.3: Vista hacia el N de datos de [Au] - BDN. [Au] en ppm.

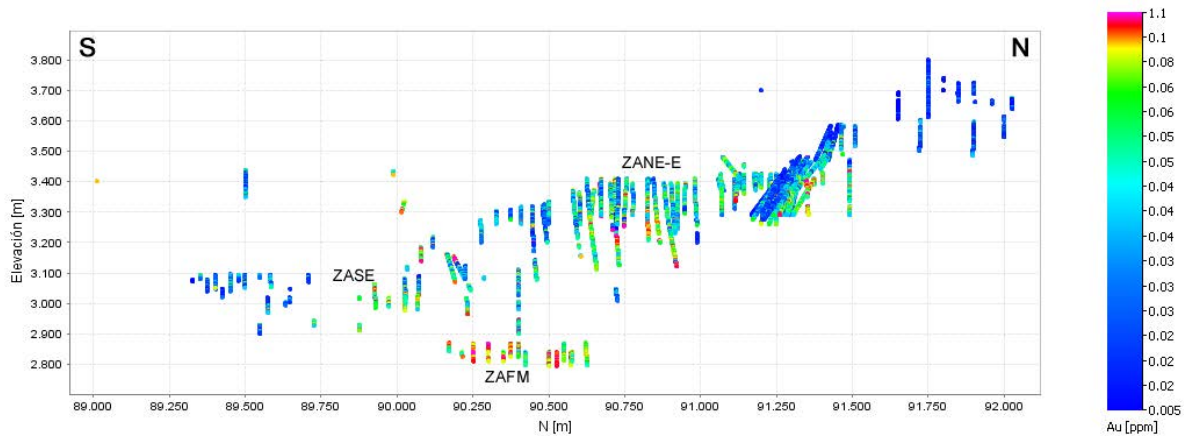


Figura 5.4: Vista hacia el W de datos de [Au] - BDN. [Au] en ppm.

Por último, ZASE es el más pequeño de los tres sectores anómalos (en vista planta, Fig. 5.2A), así como también la zona anómala que menores leyes de Au presenta, con pocos valores de concentración de oro que superan 0,1 ppm. Al igual que ZAFM, también constituye una nueva zona anómala, que podría corresponder a una extensión de las zonas antes mencionadas. Comprende datos de muestras obtenidas de elevaciones de entre 2900 – 3100 m s.n.m. (Figs. 5.3 y 5.4)

Plata – BDN

La ley promedio de Ag en los datos de la BDN es 1,43 ppm (Tabla 5.1). Este valor es aproximadamente 18 veces la concentración promedio de plata en la corteza terrestre (0,08 ppm; Dill, 2010). El 10% superior de la distribución tiene leyes de Ag por sobre 2,5 ppm. El gráfico de distribución univariable de la plata en BDN (Fig. 5.5) es similar a la del oro, en vista de frecuencia acumulada (Fig. 5.5A). En gráfico log-normal (Fig. 5.5B), se aprecian tres poblaciones de datos: Ag bajo 2 ppm, entre 2 ppm y 6 ppm, y sobre 6 ppm. Es importante mencionar que la población de $[Ag] \geq 6$ ppm representa menos del 1% de los datos.

En cuanto a delimitación de zonas anómalas de plata a partir de BDN, se aprecia que, a grandes rasgos, Ag sigue patrones espaciales similares a Au (Fig. 5.2B), es decir, las zonas definidas antes para oro, son válidas también para Ag, lo que sugiere alguna una relación genética entre ambos, exclusivamente para estas zonas. Cabe notar, sin embargo, que existen ocurrencias anómalas de plata que no son correspondidas por anomalías de oro, por ejemplo, en los datos analíticos de muestras que están al norte de ZANE-E, y las muestras de más al norte de la BDN.

5.1.2. Distribución espacial de Au – BDH y BDN integradas

El resumen de parámetros estadísticos de la BDI se resume en la Tabla 5.2. El oro conserva el mismo estilo de distribución univariable de leyes que la BDN (Fig. 5.6), y la ley media de estos datos es similar a la de la BDN (comparar Tablas 5.1 y 5.2). Sin embargo, los percentiles superiores (>90) de la distribución de Au de la BDI presentan leyes superiores del elemento con respecto a BDN. En este sentido, el 10% superior de las muestras tiene leyes sobre 0,13

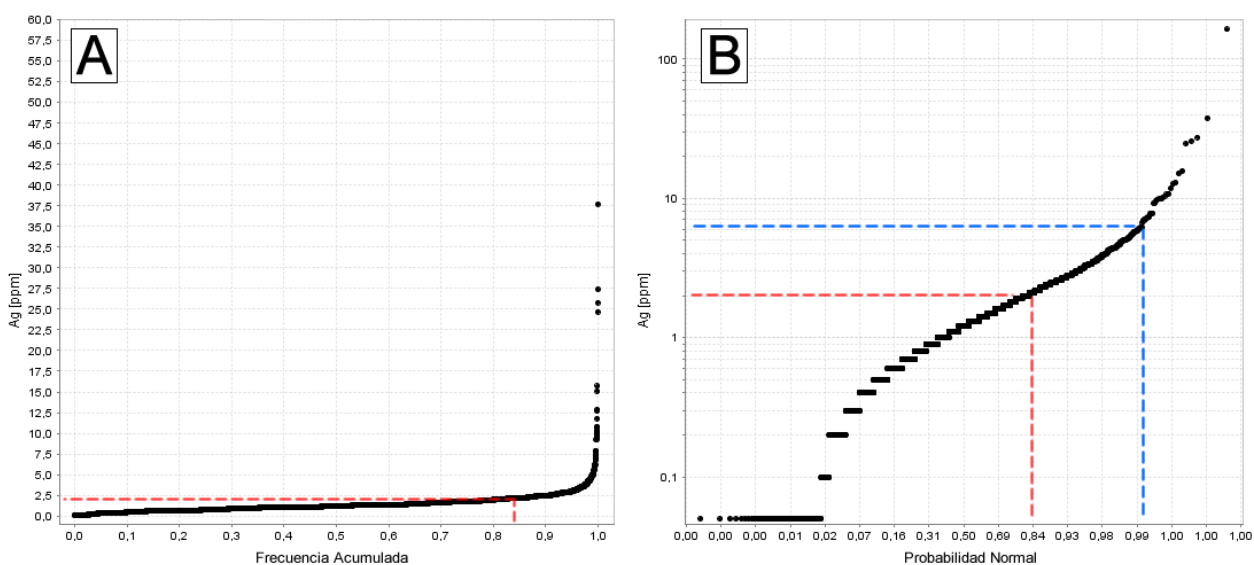


Figura 5.5: Distribución univariable de Ag – BDN. Líneas segmentadas representan división de poblaciones de datos. A: gráfico de frecuencia acumulada. B: gráfico log-normal Ag.

Tabla 5.2: Datos estadísticos BDI

Parámetro Estadístico	Au [ppm]	Ag [ppm]	Cu [wt %]	Mo [ppm]	As [ppm]
Número de Muestras Analizadas	22000	21772	21949	21949	17874
Mínimo	0,005	0,05	0,01	2,5	1,1
Máximo	3,960	209,00	5,01	8410,0	9564,0
Media (pond.)	0,046	1,24	0,60	139,0	28,0
Mediana	0,040	1,00	0,49	56,0	5,0
Desviación Estándar (pond.)	0,053	1,60	0,36	176,2	155,5
Rango Intercuartil	0,040	1,10	0,43	113,0	9,3
Percentil 1	0,005	0,05	0,02	5,0	5,0
Percentil 5	0,010	0,25	0,05	9,0	5,0
Percentil 10	0,020	0,50	0,11	12,0	5,0
Percentil 25	0,030	0,60	0,28	23,0	5,0
Percentil 75	0,070	1,70	0,71	136,0	14,3
Percentil 90	0,130	2,40	0,95	276,0	35,0
Percentil 95	0,180	3,00	1,13	404,1	83,0
Percentil 99	0,330	5,00	1,62	820,9	465,3

ppm Au. En el gráfico de frecuencia acumulada de Au (Fig. 5.6A), puede notarse que el aumento de leyes de estilo exponencial comienza a menor percentil (entre percentiles 70 y 80) que en la distribución de BDN.

En las Figuras 5.7A, 5.8 y 5.9 se visualizan anomalías de Au, establecidas por $[Au] \geq 0,05$ ppm, en dos agrupaciones principales: (1), en el sector Los Pelambres, que incluyen a las antes definidas ZASE, ZAFM y ZANE-E; y (2), en el sector Frontera, sector anómalo que no estaba representado en la BDN. La zona anómala de Frontera, se ubica al sureste del actual rajo de la mina, al sureste de ZASE, y corresponde en ubicación al pórfido Cu-Au Frontera, tratado en trabajos como el de Brockway et al. (2008) y Perelló et al. (2011), entre otros.

Las anomalías de Los Pelambres mantienen la morfología observada a partir de la BDN.

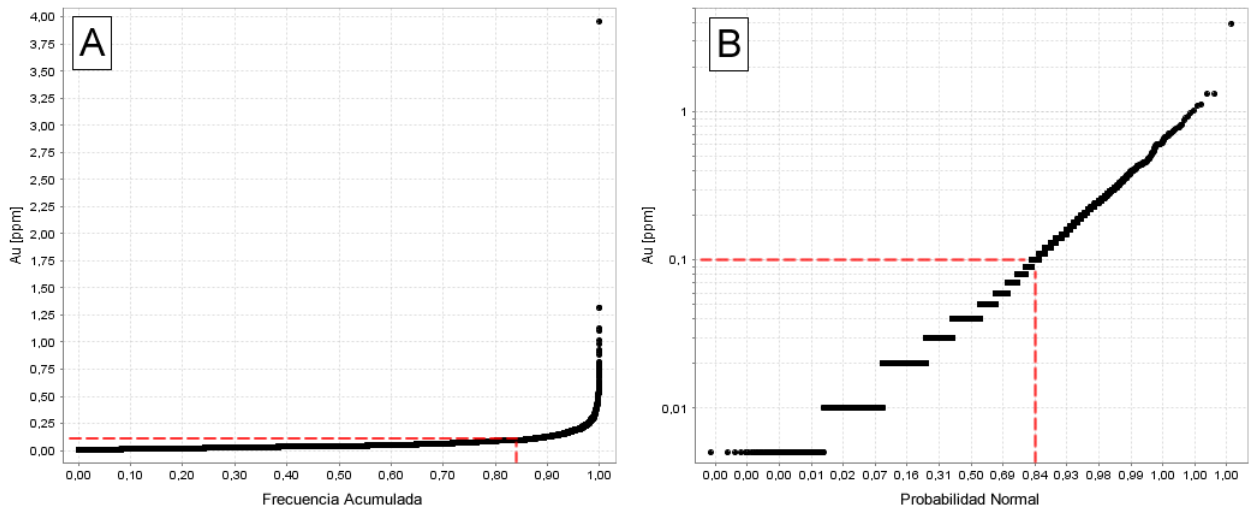


Figura 5.6: Gráficos de análisis univariable de Au – BDI. Línea roja segmentada representa división de población de datos. A: gráfico de frecuencia acumulada. B: gráfico log-normal Au.

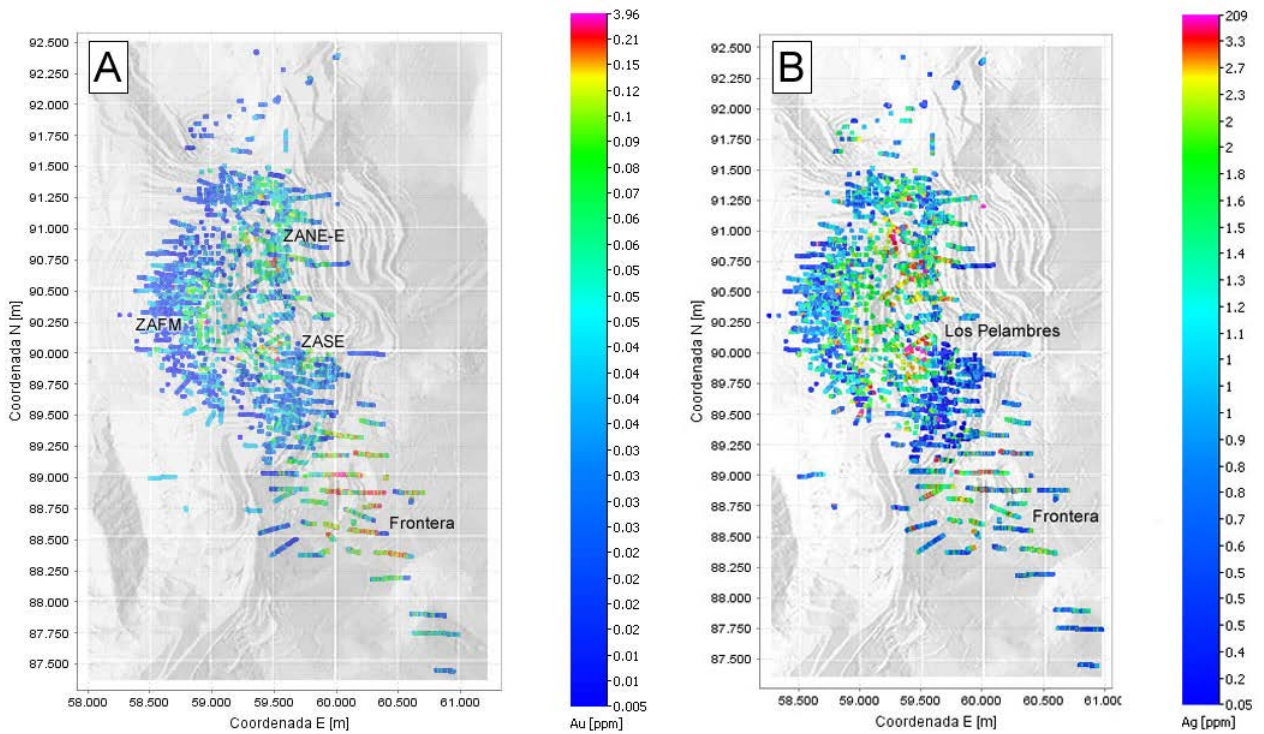


Figura 5.7: Vista en planta de datos de [Au] y [Ag] - BDI. A: [Au], ppm. B: [Ag], ppm.

La zona anómala Frontera consiste en el sector anómalo de mayor volumen en el conjunto Los Pelambres-Frontera, con una potencia máxima (no acotada) en la vertical de aproximadamente 900 metros, con elevaciones entre 2800 y 3700 m s.n.m (Figs. 5.8 y 5.9). En planta, tiene un aspecto redondeado, con un diámetro aproximado de 1km, y una leve prolongación en dirección sureste (Fig. 5.7A). Frontera no solo es más grande que las anomalías de Los Pelambres también tiene leyes más altas: en Frontera son frecuentes las leyes de oro mayores a 0,1 ppm.

Plata – BDI

La ley promedio de Ag en la BDI es 1,24 ppm (Tabla 5.2), algo inferior al reportado para la BDN. El 10 % de muestras con mayor ley de Ag tienen leyes mayores a 2,4 ppm.

El comportamiento univariable de Ag, visto mediante gráfico de frecuencia acumulada (Fig. 5.10A), muestra similitudes al comportamiento de la BDN. Sin embargo, en el gráfico log-normal (Fig. 5.10B), se muestran algunas diferencias: se sigue haciendo la distinción en tres poblaciones de datos, pero la definición de estas poblaciones, y el comportamiento de los datos en ellas es distinto. Las poblaciones de datos de [Ag], para la BDI son: datos con [Ag] menor a 0,5 ppm, datos con [Ag] entre 0,5 y 2 ppm, y datos con más de 2 ppm Ag. El quiebre en 2 ppm se mantiene, pero los datos de la población de concentración superior en la BDI tienen comportamiento exponencial, a diferencia del comportamiento lineal, para la misma población, en la BDN.

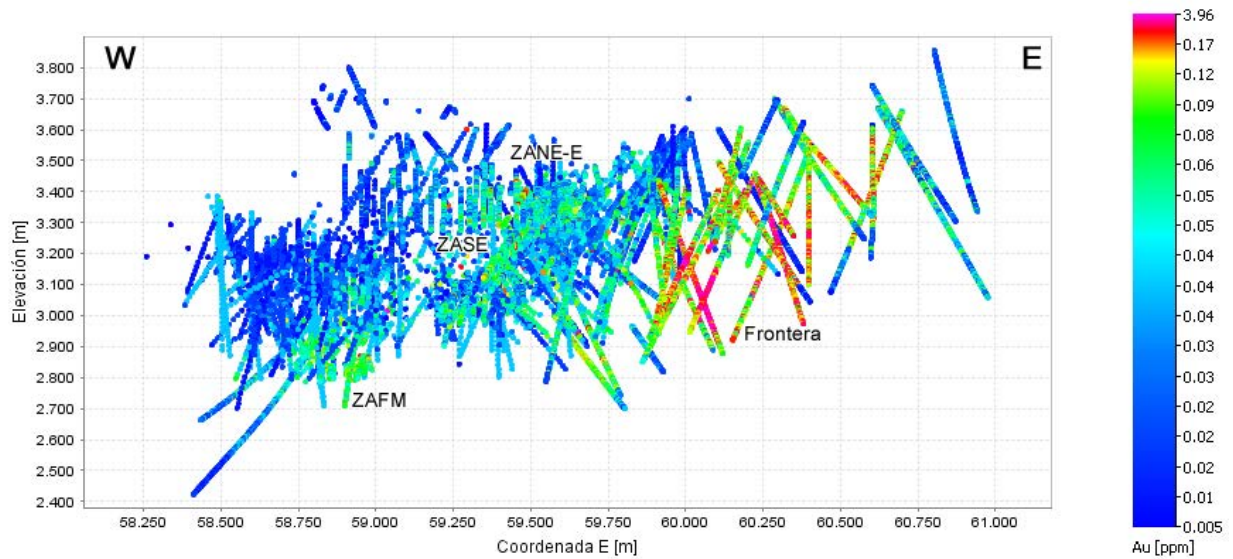


Figura 5.8: Vista hacia el N de datos de [Au] - BDI. [Au] en ppm.

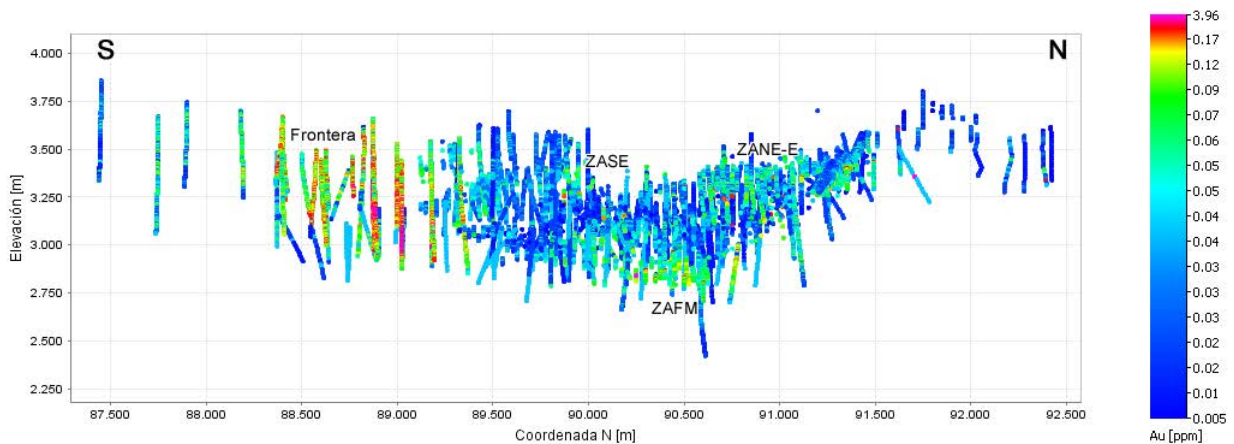


Figura 5.9: Vista hacia el W de datos de [Au] - BDI. [Au] en ppm.

A partir de la vista en planta de Ag en BDI (Fig. 5.7B), se delimita la zona anómala Frontera, independiente de los datos de oro. Esto insinúa cierta relación genética, o al menos espacial, entre oro y plata en zonas anómalas de oro. En Los Pelambres, por otra parte, se constata la presencia de valores elevados de Ag en las zonas definidas antes a partir de BDN, pero al mismo tiempo se observan ocurrencias anómalas de Ag al suroeste de Los Pelambres, más al W que ZAFM, lugares donde las concentraciones de oro no son tan altas.

Lo observado a partir de BDI y BDN para Ag, sugiere que si se halla una zona anómala de Au, lo más probable es que tenga concentraciones elevadas de Ag también, pero la relación no es válida en sentido inverso.

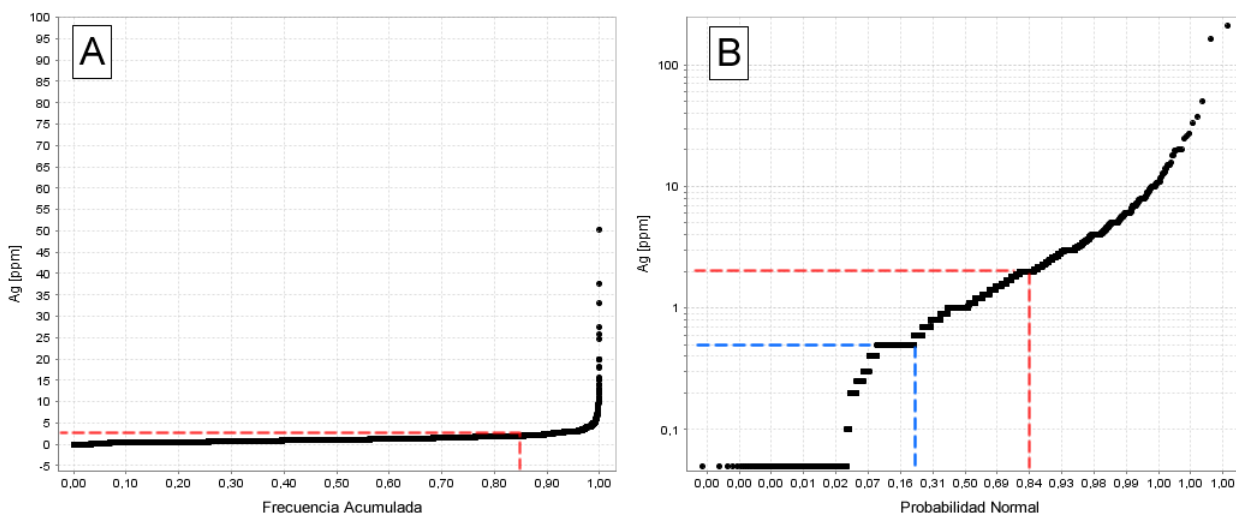


Figura 5.10: Gráficos de distribución univariante de Ag – BDI. Líneas segmentadas representan división de poblaciones de datos. A: gráfico de frecuencia acumulada. B: gráfico log-normal Ag.

5.1.3. Mapa de isopleyas de Au y zonas anómalas

Con objetivo de definir de manera más gráfica las anomalías de Au presentadas en los párrafos precedentes, los datos de la BDI se emplearon para la creación de mapas de isopleyas de Au (Fig. 5.11, ver metodologías para detalles). Es necesario indicar que los tres cálculos de isopleyas mostrados en la Figura 5.11 son independientes, por lo que puede haber diferencias entre ellos.

Del mapa de isopleyas de Au, en conjunto a las figuras de visualización espacial de datos de BDI (Figs. 5.7A, 5.8 y 5.9), se destacan dos grandes zonas de anomalías de oro: la mayor, correspondiente a Frontera; y una agrupación de zonas de anomalías en Los Pelambres, la que incluye las antes mencionadas ZAFM, ZANE-E y ZASE. No se observa continuidad entre las anomalías de Los Pelambres y Frontera.

Claramente, la anomalía de Frontera representa una anomalía mayor, en sentido espacial y de leyes de oro, a la de Los Pelambres. Levemente alargada en la N-S, abarca, en planta, $\sim 1,5$ kms en el sentido N-S, y ~ 1 km en su parte más ancha, en el sentido O-E. Esta zona presenta una extensión vertical promedio, no acotada inferiormente, de 800m. Presenta núcleos notorios con leyes de oro iguales o mayores a 0,4 ppm.

La anomalía de Los Pelambres, no está bien definida geoméricamente, dada su condición de agrupamiento de anomalías, lo que es una diferencia con el aspecto bien zonado de Frontera. En planta, ocupa un área cercana a 1 km^2 . Como dicho antes, la anomalía de Los Pelambres incluye ZANE-E, ZAFM, y ZASE; descritas en el análisis de la BDN. Se ha mantenido la nomenclatura de estas zonas para correlacionar de buena forma las observaciones de BDN y BDI. En esta zona, destacan algunos núcleos de mayor ley de oro con $[\text{Au}] \geq 0,1$ ppm. La anomalía de Los Pelambres está fuertemente representada por la BDN.

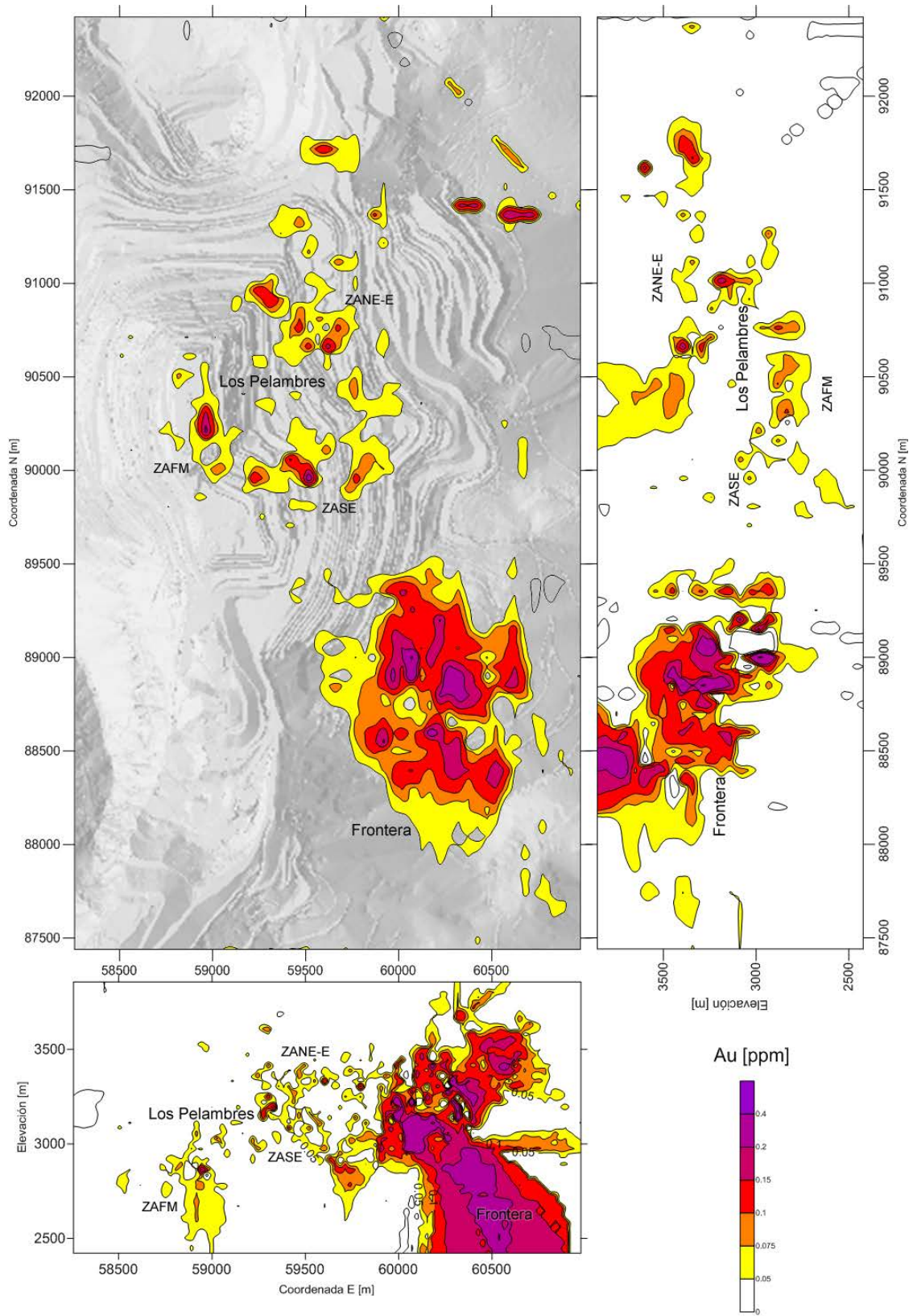


Figura 5.11: Mapa de isoleyes de Au, de Los Pelambres-Frontera. [Au] en ppm.

5.1.4. Definición y construcción de sólidos de Au “alto”

Con la finalidad de poseer datos de zonas anómalas de Au georreferenciadas, en tres dimensiones, y de utilidad en la comparación de estas ocurrencias con otras características geológicas de interés (ver más adelante), se construyen cuerpos tridimensionales georreferenciados –sólidos-, que representan los volúmenes que contienen los datos de mayores leyes de Au (“oro alto”, $[Au] \geq 0,1 \text{ ppm}$) y Ag (“plata alta”, $[Ag] \geq 2 \text{ ppm}$) de Los Pelambres-Frontera (Fig. 5.12). La determinación de la ley de corte para la definición de los sólidos de Au – Ag alto se trata en la sección de metodologías, pero tiene que ver con las poblaciones de datos detectadas antes usando gráficos de distribución univariable, y con leyes apropiadas para visualizar e individualizar ciertas zonas de Los Pelambres-Frontera.

Es posible observar, a partir de comparación de estos sólidos de Au-Ag alto y el mapa de isoleyes de Au, además de las vistas en planta de concentraciones de Au-Ag, que se siguen delimitando las mismas zonas anómalas definidas en un principio (Frontera y Los Pelambres: ZANE-E, ZAFM y ZASE), con gran similitud de forma entre el mapa de isoleyes y los sólidos de Au. Por esto, es válido utilizar los sólidos para los fines indicados antes.

Al comparar las formas de los sólidos de Au y Ag alto, se ve que la morfología en Frontera

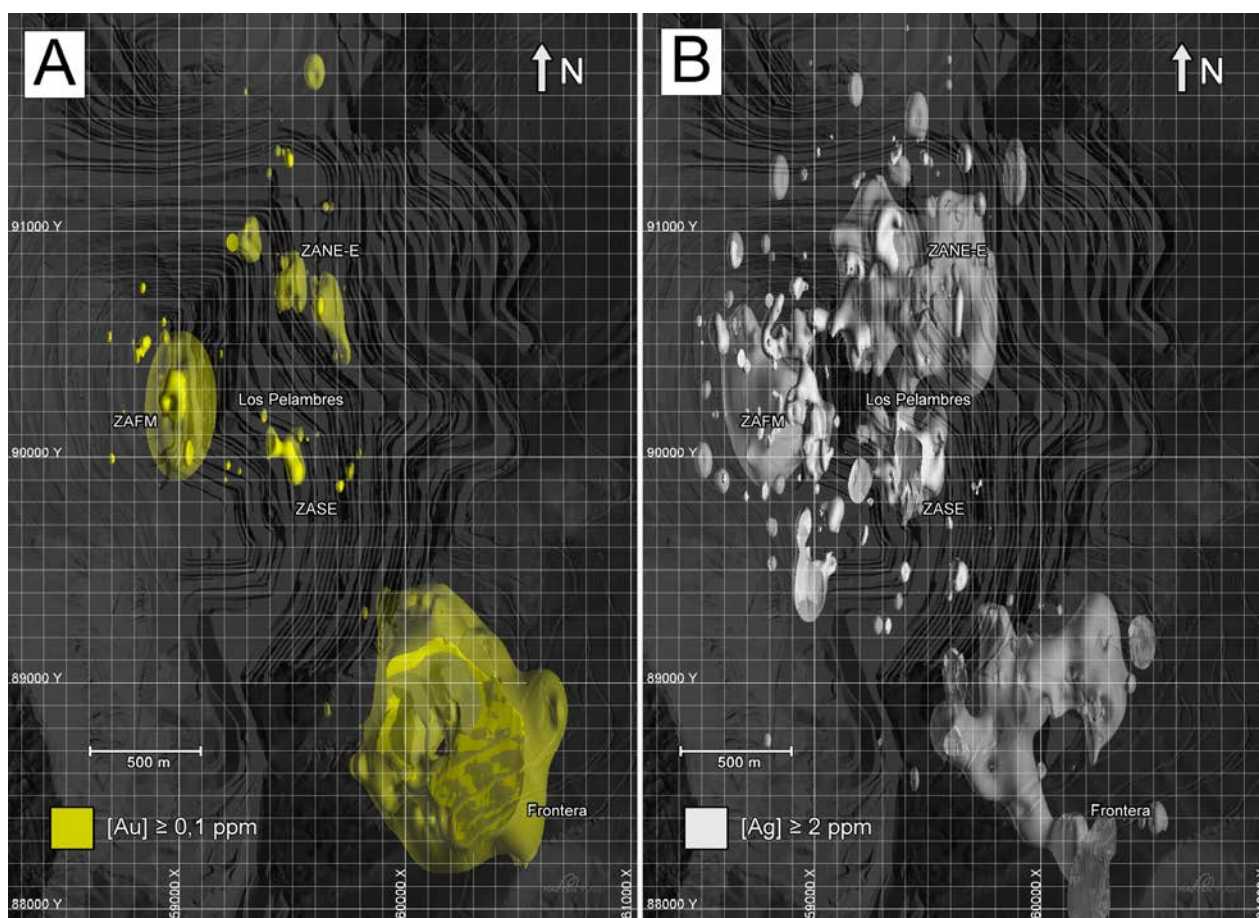


Figura 5.12: Sólidos de Au – Ag altos. A: Au alto. B: Ag Alta.

es muy distinta entre los dos elementos: sólido de Au alto prácticamente contiene al sólido de Ag alto de Frontera y, mientras la forma del sólido de Au alto se aproxima a un elipsoide, con leve elongación N-S, el sólido de Ag alto pareciera ser un sólido compuesto: por una anomalía de Ag de orientación NW-SE, que conforma el flanco W del sólido, y por otra anomalía localizada al NE de Frontera. Destaca la ausencia de concentraciones anómalas de Ag al SE de Frontera. Estas observaciones sugieren ocurrencias y controles distintos para Au y Ag en Frontera, que en el caso de Ag, pudiera incluso ser un control ligado de alguna forma a estructuras.

Por otro lado, en Los Pelambres los sólidos de Ag alto involucran un mayor volumen que los de Au alto, y contienen a las anomalías de Au de Los Pelambres. Además, se visualizan muchas anomalías que no se correlacionan con altas concentraciones de oro, que son de características puntuales, y están a mayores cotas que ZAFM. Destaca un corredor anómalo de Ag, de orientación N-S, ubicado justo al E de ZAFM, pero a mayor elevación. Este corredor de Ag ya fue explotado por la operación minera.

5.2. Análisis de correlación bivariable de Au

Se debe conocer la relación de concentraciones de Au con respecto a las concentraciones de otros elementos de interés en el depósito, con la finalidad de reconocer posibles procesos geológicos u ocurrencias comunes de Au y minerales relacionados a los elementos químicos en estudio. Estos elementos de interés corresponden a Ag, Cu, Mo y As. Cada dato de Au de las bases de datos cuenta también con la información de concentración de los elementos químicos antes indicados. Para mayores detalles sobre las características de esta base de datos, consultar la sección de metodologías.

En el caso de Cu y Mo, su importancia radica en que son los elementos por los cuales se explota primariamente el depósito Los Pelambres, por lo que un vínculo positivo entre estas variables implicaría que los mismos procesos extractivos de Cu y Mo, serían extensibles a Au también. Adicionalmente, es conocido, en la literatura geológica, el vínculo entre sulfuros de Cu-Fe y Au (ej.: bornita y calcopirita, ver marco teórico).

La correlación entre Au y As se estudia en función de posibles minerales que contienen ambos (ej.: piritita arsenical, digenita supérgena). También se desea investigar posibles relaciones similares a las que se dan en algunos ambientes epitermales, a partir de transporte mediado por vapor (ver Anexo A).

Por último, se estudia el vínculo entre Au y Ag debido a que son dos elementos cuya ocurrencia aún no ha sido estudiada en profundidad en Los Pelambres-Frontera, además de posibles ocurrencias conjuntas documentadas, como por ejemplo en digenita supérgena (ver marco teórico) o posibles partículas de electrum u oro nativo con contenidos de Ag que son de común ocurrencia en depósitos tipo pórfido cuprífero.

5.2.1. Análisis de correlación bivariable de Au – BDI

En primer lugar, se estudian las correlaciones bivariantes de Au utilizando la BDI, para reconocer tendencias a escala del conjunto Los Pelambres-Frontera. En las Figuras 5.13 y 5.14 se muestran gráficos de dispersión de Au y los elementos químicos antes mencionados. Los gráficos de la Figura 5.14 son los mismos que la Figura 5.13, solo que se ha incorporado información sobre densidad de datos, para mejorar visualización de datos.

De inmediato, destaca la gran dispersión de los datos en los cuatro gráficos, lo que debe ser tomado en cuenta al interpretar las relaciones entre elementos, especialmente en el caso Au-Ag (Fig. 5.13A). Sin embargo, nubes de datos presentan algunas tendencias generales, que han sido indicadas con líneas segmentadas.

Au y Ag, a modo general, presentan una correlación positiva, es decir, a mayores leyes de Au se tendrán leyes mayores de Ag. Lo anterior puede insinuar una ocurrencia en común de Au y Ag (alguna fase que albergue ambos) o un proceso mineralizador que ubique a Au y Ag de forma independiente en la roca. Por otra parte, Au y Mo presentan relación negativa (Fig. 5.13C), lo que sugiere que molibdenita no es una fase que alberga Au, de forma importante, en Los Pelambres-Frontera. En los casos de Au-Cu y Au-As, se tienen nubes de dispersión de datos que delinean, de forma gruesa, dos tendencias para cada elemento (Figs. 5.13B y 5.13D, respectivamente).

El gráfico de correlación bivariable de Au-Cu presenta dos tendencias de correlación positiva entre los dos elementos. Estas dos tendencias se diferencian en que sus pendientes son diferentes. En particular, la tendencia indicada por la línea segmentada azul en la Figura 5.13B, representa sectores de Los Pelambres-Frontera en los que se tienen las mayores leyes de Au, esto a bajas leyes de Cu. Como resultado de lo anterior, la tendencia antes indicada se representa como una de baja pendiente en el diagrama: a leves aumentos de Cu, se tienen altos contenidos de Au. Un posterior estudio de los datos que siguen esta tendencia (ver metodologías), indica que los mismos se ubican casi en su totalidad en Frontera, en tramos someros de testigos de sondaje (Fig. 5.15). Estudio de características geológicas de las zonas anómalas (ver sección del mismo nombre, más adelante), sumado a lo anterior, sugieren que la tendencia de baja pendiente se asocia con zonas de lixiviación de Frontera, en donde Cu ha sido removido parcialmente o totalmente de la roca, mientras que Au puede haberse comportado como elemento inmóvil. Los datos correspondientes a la tendencia positiva de mayor pendiente sugieren una relación directa entre la mineralización de Cu (sulfuros Cu-Fe) y los contenidos en Au.

A diferencia de la distribución Au-Cu, Au-As muestra una tendencia positiva, y otra negativa. La tendencia positiva (línea segmentada roja en la Figura 5.13D) involucra muestras en las cuales las concentraciones de Au son relativamente bajas, generalmente bajo 0,1 ppm Au, mientras que la tendencia negativa agrupa a las muestras con mayor ley de Au. Por esto, la generalidad en Los Pelambres-Frontera es que las zonas con mayores anomalías de Au (mayores a 0,1 ppm Au) tienen contenidos acotados en As (menores a ~100 ppm As). Por otra parte, los datos de la tendencia positiva se ubican, en su mayoría, en el flanco N y NE del actual rajo, es decir, corresponden en parte a la ZANE-E (no mostrado). La

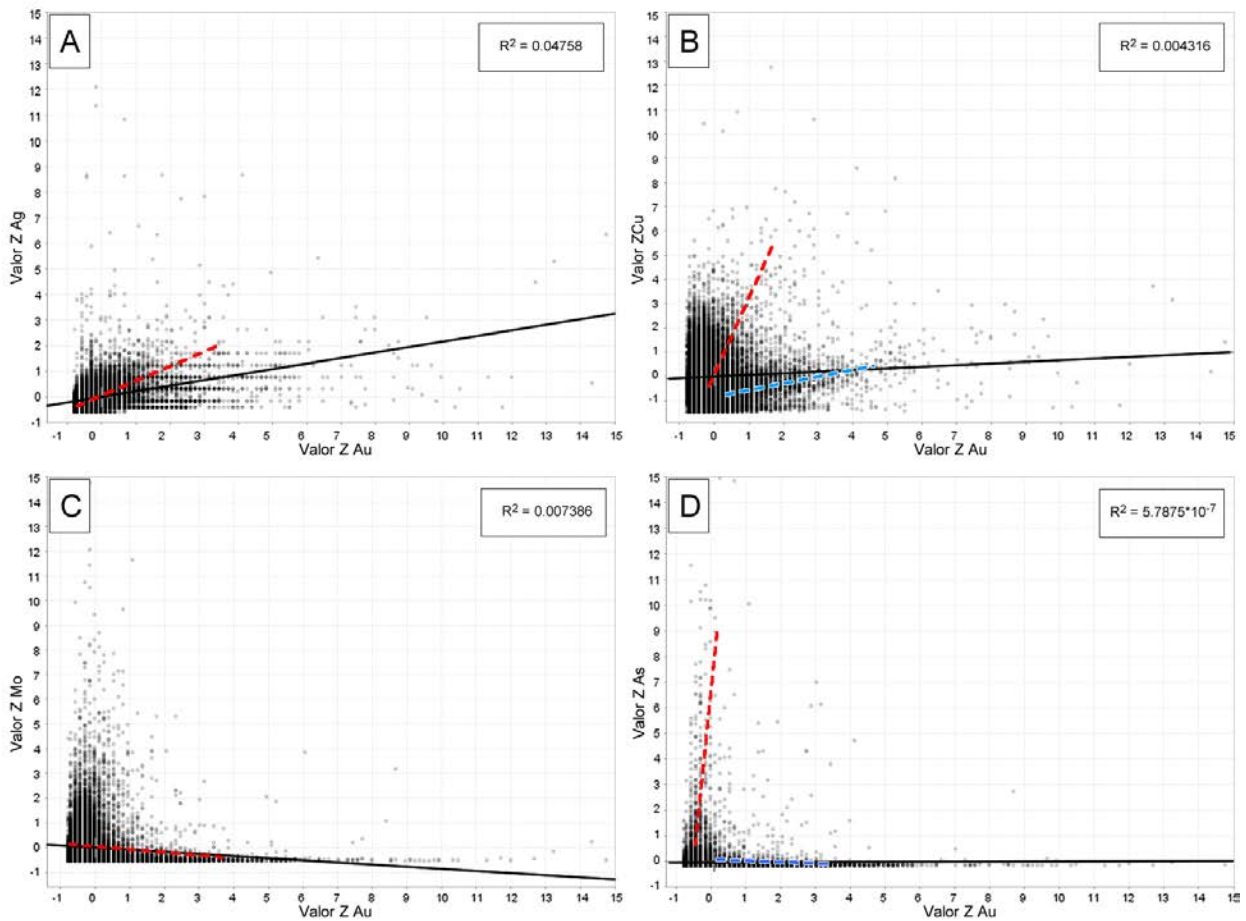


Figura 5.13: Diagramas de dispersión de Au respecto a elementos químicos de interés. Datos de BDI (Los Pelambres-Frontera). Línea continua corresponde a la de mejor ajuste a los datos. Líneas segmentadas marcan tendencias generales. Valores normalizados. A: Au-Ag. B: Au-Cu. C: Au-Mo. D: Au-As.

ocurrencia de Au en estas zonas con alto As puede estar vinculada a los lineamientos de As de Los Pelambres (ver marco geológico), así como también a la ocurrencia de pirita arsenical o calcosina/digenita en estos sectores (ver más adelante, características geológicas de zonas anómalas).

Análisis de correlación bivariable de Au - BDI - datos filtrados según litología y alteración hidrotermal

Estudio de correlación bivariable también se hizo para datos de BDI filtrados por litología y alteración hidrotermal. Para datos correspondientes a Pórfido A, Pórfido B y brechas hidrotermales se visualizan tendencias bivariables que son iguales a las mostradas para BDI completa. En particular, los datos de Pórfido A incluyen la tendencia de Au - Cu correspondiente a roca lixiviada de Frontera. Por otro lado, datos correspondientes a Pórfido D presentan tendencias de correlación positiva entre Au - Ag y Au - Cu (no mostradas) que son más claras que las de otras litologías.

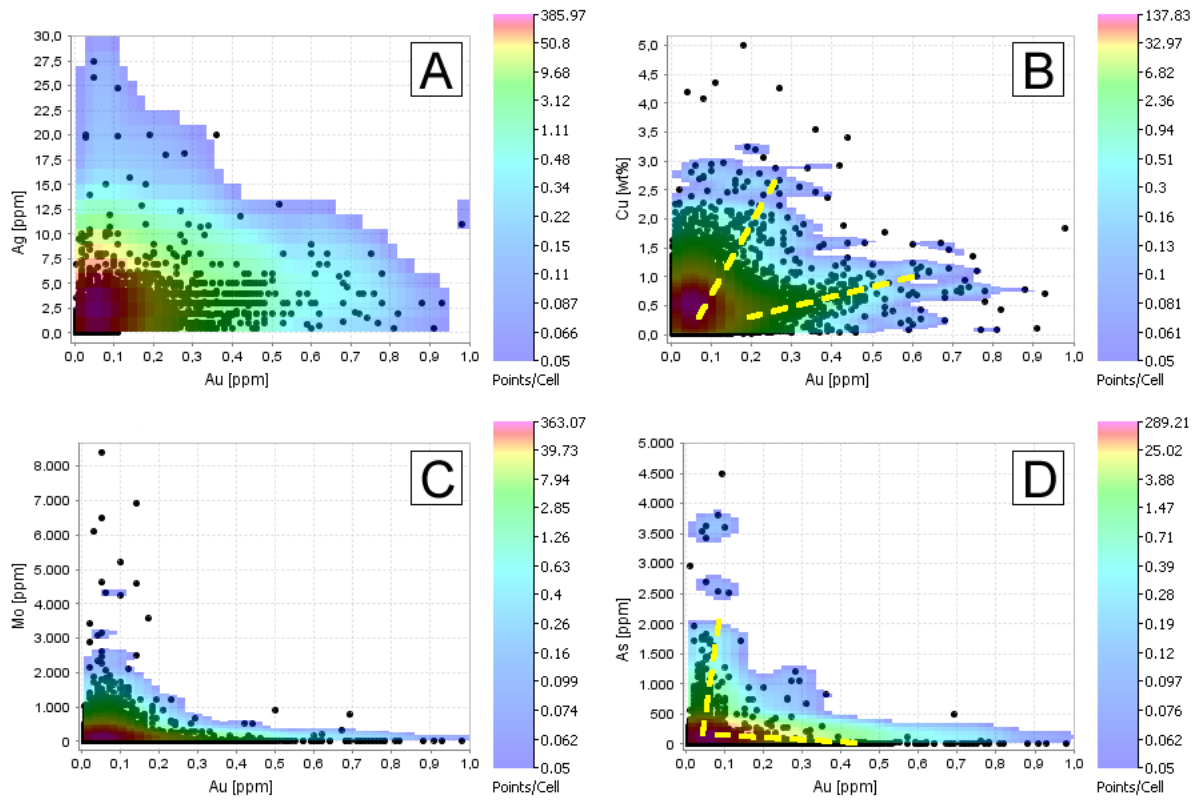


Figura 5.14: Diagramas de dispersión de Au respecto a elementos químicos de interés, con indicación de densidad de datos. Líneas segmentadas indican tendencias generales de los datos. Datos de BDI (Los Pelambres-Frontera). A: Au-Ag. B: Au-Cu. C: Au-Mo. D: Au-As.

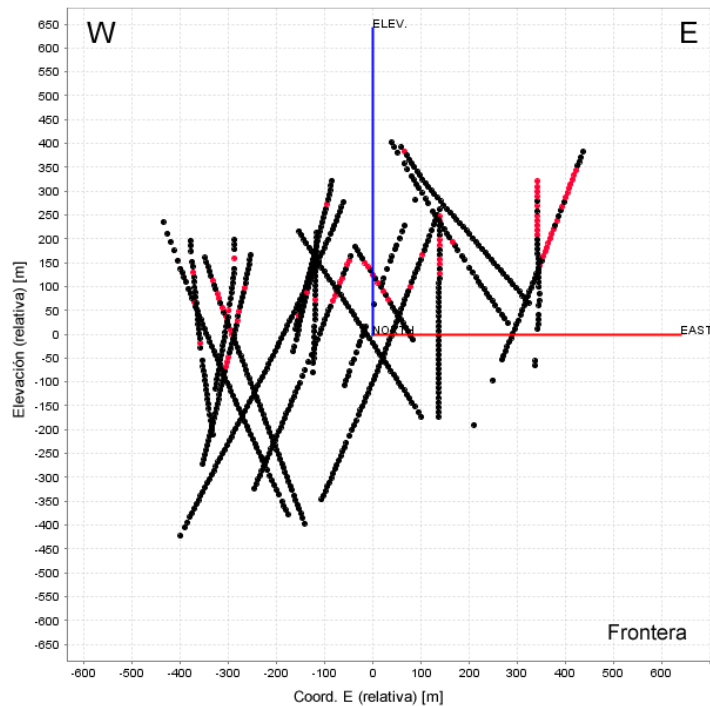


Figura 5.15: Perfil visto hacia el N de muestras correspondientes a Frontera. Puntos rojos corresponden a datos que siguen la tendencia indicada con línea segmentada azul en la Figura 5.13B

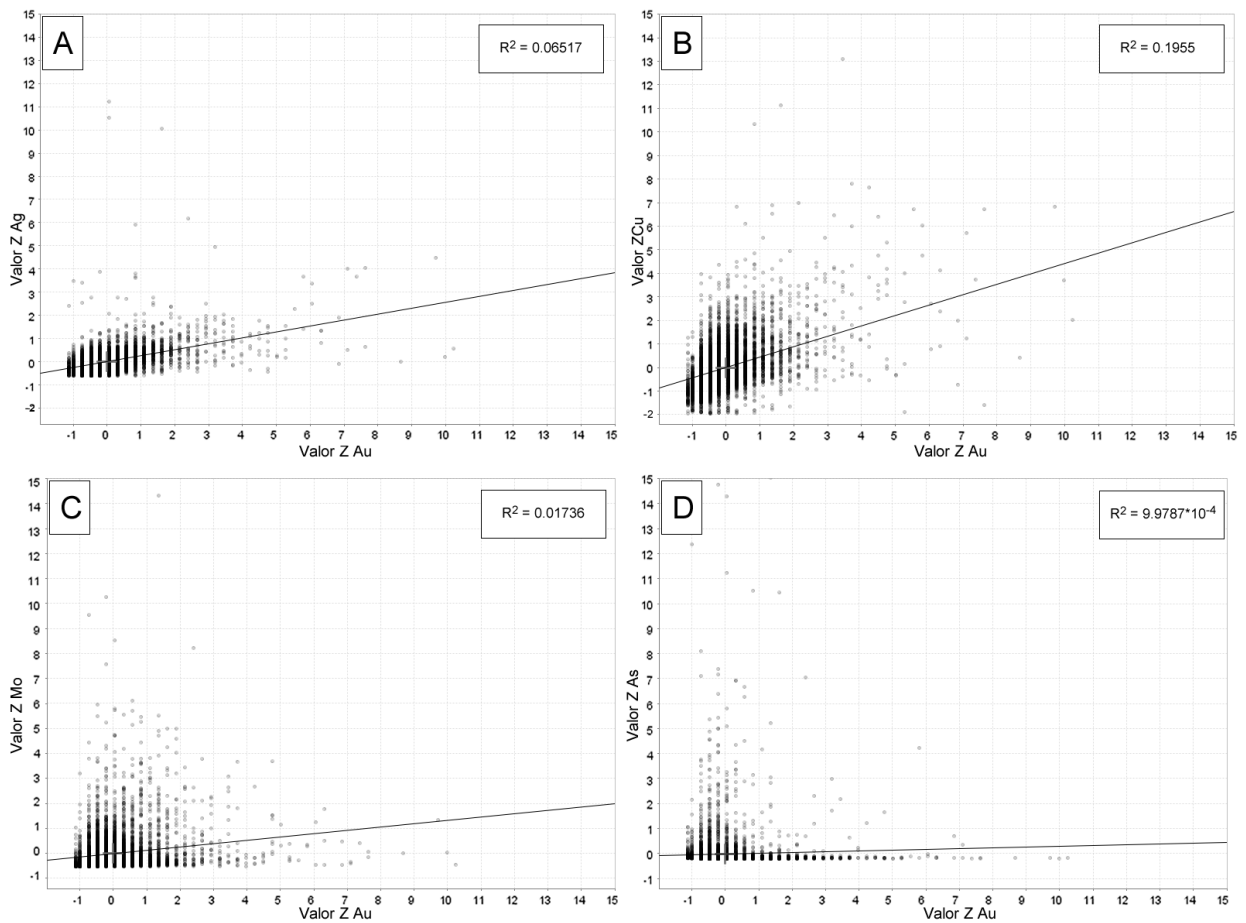


Figura 5.16: Diagramas de dispersión de Au respecto a elementos químicos de interés. Datos de BDN (no incluye Frontera). Línea continua corresponde a la de mejor ajuste a los datos. Valores normalizados. A: Au-Ag. B: Au-Cu. C: Au-Mo. D: Au-As.

El estudio de correlación bivariable entre oro y otros elementos químicos, en datos filtrados por alteración hidrotermal, muestra tendencias similares que las de BDI completa, situación esperada para la alteración potásica, que comprende gran parte de la BDI.

5.2.2. Análisis de correlación bivariable de Au – otras bases de datos

Debido a que en los diagramas de dispersión anteriores se muestran tendencias de datos superpuestas, y a que posiblemente las zonas anómalas de oro, definidas en la sección anterior, tengan características geológicas distintas (ver más adelante), se hace necesario estudiar las correlaciones de Au y otros elementos químicos, diferenciando entre zonas anómalas. Por esto, en primera instancia, se hace uso de la BDN, que representa las zonas anómalas de Los Pelambres, y luego se divide la BDI por sectores, para hacer el mismo estudio (ver metodologías para detalles de la delimitación de sectores).

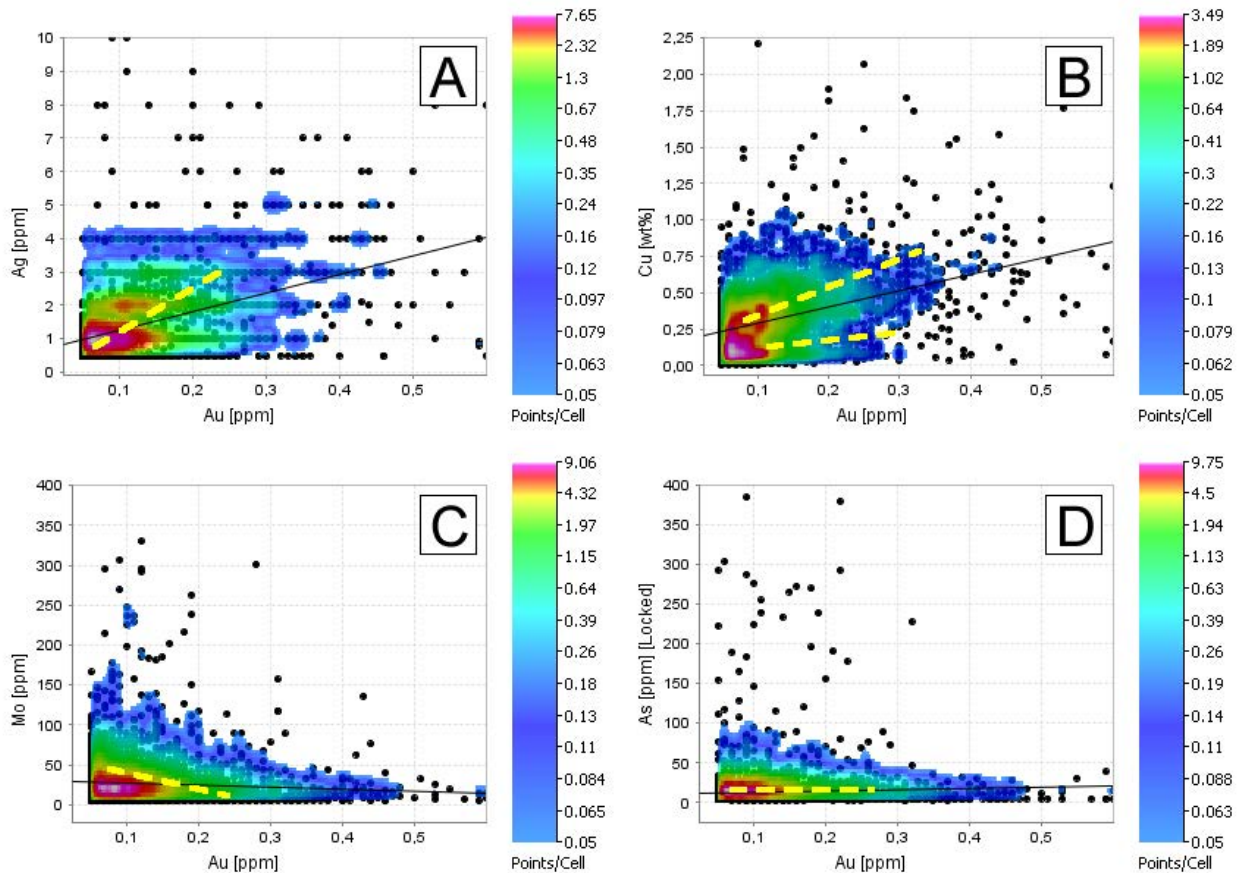


Figura 5.17: Diagramas de dispersión de Au respecto a elementos químicos de interés, con indicación de densidad de datos, de datos del sector Frontera. Líneas segmentadas indican tendencias generales de los datos. A: Au-Ag. B: Au-Cu. C: Au-Mo. D: Au-As.

Análisis de correlación bivariable de Au – BDN (Los Pelambres)

En BDN son claras y evidentes las correlaciones positivas de Au con plata, y en especial, con cobre (Figs. 5.16A-B). En Los Pelambres, no se observa doble tendencia para Cu. La relación con molibdeno es similar en BDN que en BDI (Fig. 5.16C), y la relación de As muestra la misma doble relación (Fig. 5.16D), vinculada con datos ubicados en el flanco N-NE del rajo actual (ZANE-E).

Análisis de correlación bivariable de Au en Frontera

En Frontera (Fig. 5.17), la correlación entre Au y Ag también es positiva (Fig. 5.17A), aunque con una gran dispersión, mayor que en el caso de Los Pelambres. Cu y Au muestran dos tendencias (Fig. 5.17B): ambas positivas, con una de pendiente cercana a cero, la que podría corresponder a zonas completamente lixiviadas de Frontera (vinculando esto con las observaciones hechas antes, para el análisis de correlación bivariable utilizando BDI). Cu y Mo presentan una tendencia claramente negativa (Fig. 5.17C), y Cu-As, una tendencia mayormente negativa (Fig. 5.17D), con algunos datos siguiendo la tendencia positiva, antes

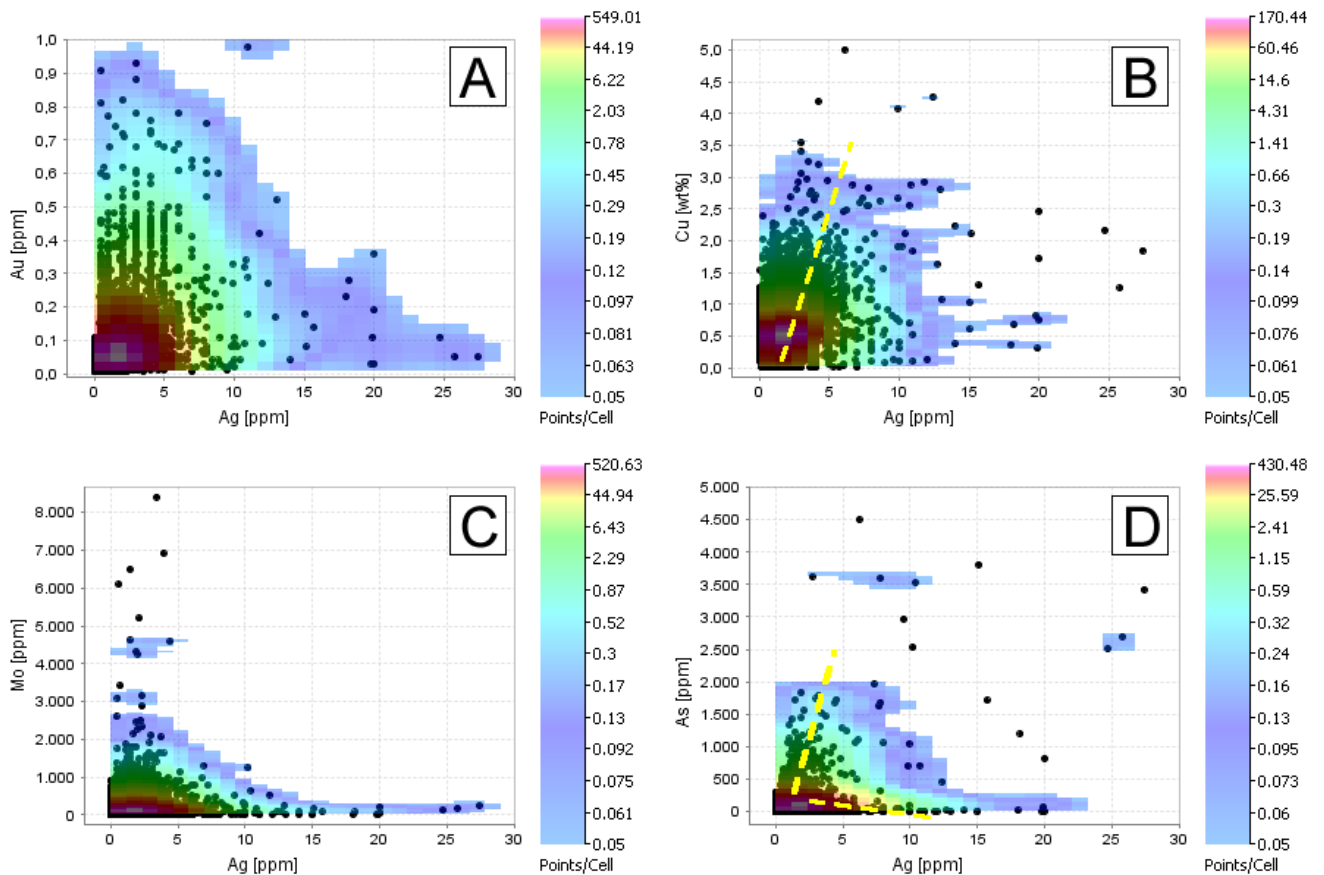


Figura 5.18: Diagramas de dispersión de Ag respecto a elementos químicos de interés, con indicación de densidad de datos. Líneas segmentadas indican tendencias generales de los datos. Datos de BDI (Los Pelambres-Frontera). A: Ag-Au. B: Ag-Cu. C: Ag-Mo. D: Ag-As.

reconocida en Los Pelambres. La tendencia recién nombrada está casi ausente en Frontera.

5.2.3. Análisis de correlación bivariable de Ag – BDI

La posible correlación entre Ag y otros elementos químicos se estudia para los mismos elementos que para Au, con la misma finalidad, a escala de Los Pelambres-Frontera (usando BDI, Fig. 5.18). En particular, se conocen algunos minerales habituales de pórfidos cupríferos, que pueden albergar importantes cantidades de Ag: por ejemplo, digenita supérgena (Reich et al., 2010), pirita (Reich et al., 2013) y electrum, entre otros.

La relación de Ag – Cu muestra solo una tendencia: correlación positiva con alta dispersión (Fig. 5.18B). Es importante notar que no se da la tendencia que mostraba Au para zonas lixiviadas de Frontera (tendencia positiva con baja pendiente en gráfico de dispersión), lo cual puede deberse a bajas concentraciones iniciales de Ag de Frontera, o a un proceso de lixiviación que retiró la plata, junto al cobre, de la roca.

La relación entre Ag y Mo sigue el mismo patrón que la de Au y Mo: tendencia negativa

(Fig. 5.18C), por lo que posiblemente molibdenita no tiene contenidos importantes de plata.

Por otro lado, As y Ag muestran una notoria correlación positiva para buena parte de los datos, aunque también se presenta una tendencia negativa (Fig. 5.18D). Los datos que siguen la tendencia positiva también corresponden al flanco N-NE del actual rajo (Los Pelambres). Esta correlación podría atribuirse a los mismos factores mencionados para Au-As de Los Pelambres.

5.3. Relación entre zonas anómalas de Au y abundancia de sulfuros

La obtención de los sólidos de Au alto y Ag alta posibilita realizar comparación gráfica de anomalías positivas de Au (Ag) con otras características geológicas (ver metodologías). En específico, esto se puede hacer para comparación con mineralogía de sulfuros, empleando sólidos de abundancia mineral, así como también para comparación con horizontes supérgenos, litología y alteración (ver más adelante).

Los sólidos de abundancia mineral son cuerpos tridimensionales que representan sectores de Los Pelambres-Frontera que poseen cierto rango de abundancia de un mineral en específico. La definición de los rangos de abundancia para cada mineral fue realizada por Minera Los Pelambres, según estudio de quiebres de distribuciones de datos, y posterior identificación de poblaciones, en diagramas de distribución univariable log-normal de abundancia mineral (no mostrados). Así, se definen al menos tres poblaciones de datos de abundancia mineral para bornita, calcopirita, pirita, calcosina y covelina: baja, media y alta (Tabla 5.3).

Para una correcta comparación gráfica de sólidos de abundancia mineral, se debe notar que el hecho que ciertas zonas anómalas no coincidan espacialmente con sólidos altos de cierto mineral, no quiere decir que dicho mineral no se encuentre en la asociación presente en las rocas del área, ni tampoco que aquél mineral no tenga implicancias en la ocurrencia de oro.

Tabla 5.3: Rangos de abundancia mineral para sulfuros de interés.

Denominación	Bornita [%peso]	Calcopirita [%peso]	Pirita [%peso]	Calcosina [%peso]	Covelina [%peso]
Alta	> 0,4	> 2,0	> 1,0	> 0,5	> 0,2
Media	0,1 - 0,4	0,4 - 2,0	0,1 - 1,0	0,2 - 0,5	0,05 - 0,2
Baja	< 0,1	< 0,4	< 0,1	< 0,2	< 0,05

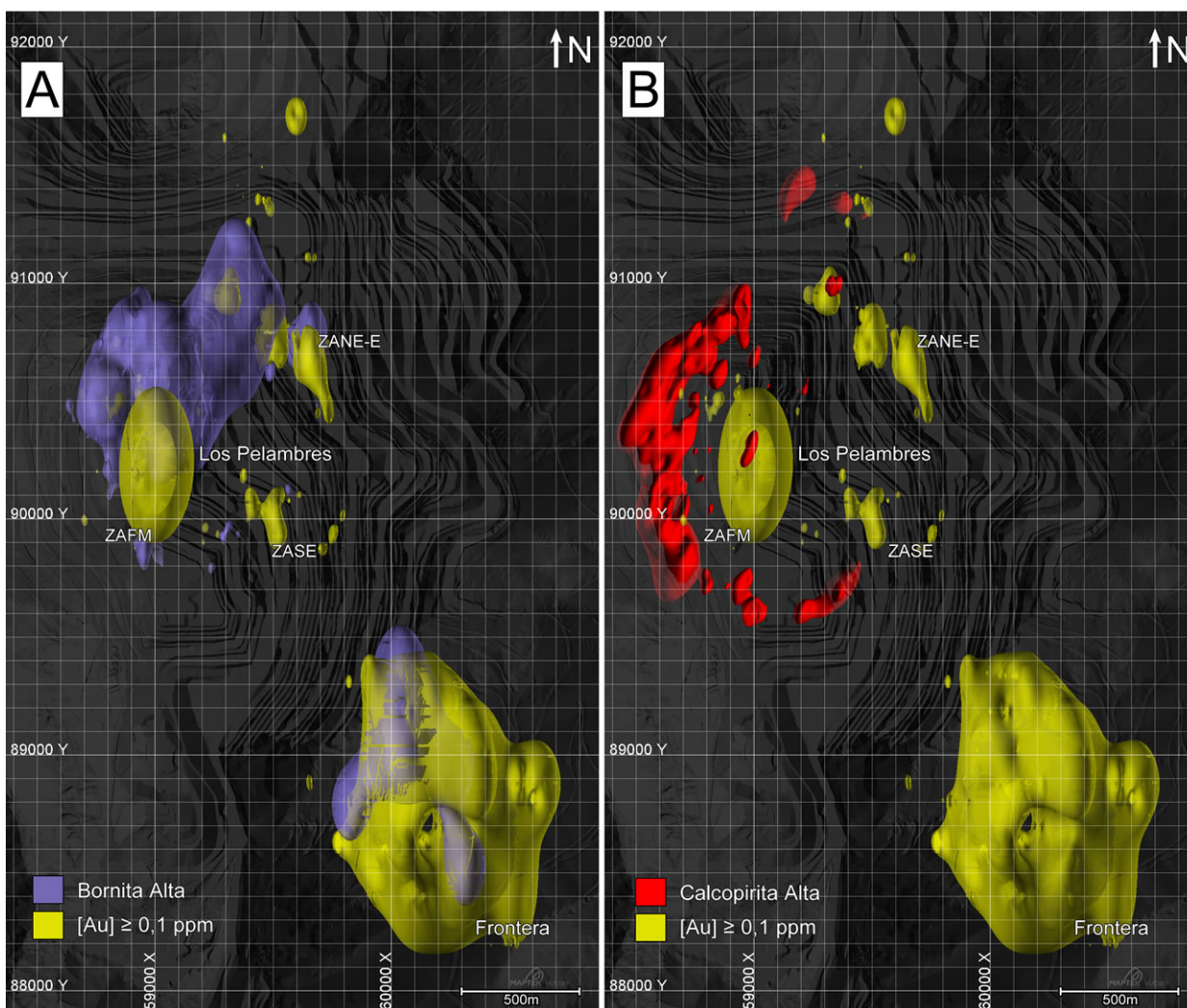


Figura 5.19: Comparación espacial entre sólidos de Au alto y sólidos de abundancia mineral de sulfuros primarios, vista en planta. A: bornita alta. B: calcopirita alta.

5.3.1. Au y sulfuros hipógenos

Los sulfuros hipógenos a comparar con zonas anómalas de Au son bornita, calcopirita y pirita.

Zonas de bornita alta presentan excelente correlación con la anomalía de Frontera (Figs. 5.19A y 5.20A), evidenciando amplia presencia de este mineral en gran parte del depósito, y en específico, en el sector anómalo. En Los Pelambres, ZAFM y ZANE-E están parcialmente incluidas en el volumen con bornita alta, mientras que ZASE no se correlaciona con bornita alta. Es relevante destacar que entre ZAFM y ZANE-E existe una continuación del sólido de bornita alta que no presenta mayor anomalía de oro. Debido a lo anterior, no es directo plantear que todos los sectores con bornita alta tendrán concentraciones altas de oro. Cuando la comparación es hecha con el sólido de bornita media (Fig. 5.20B), se constata que éste encierra gran parte de las grandes zonas anómalas definidas antes, tanto para Los Pelambres como para Frontera. Destacan una zona anómala de Au en Frontera que no está contenida

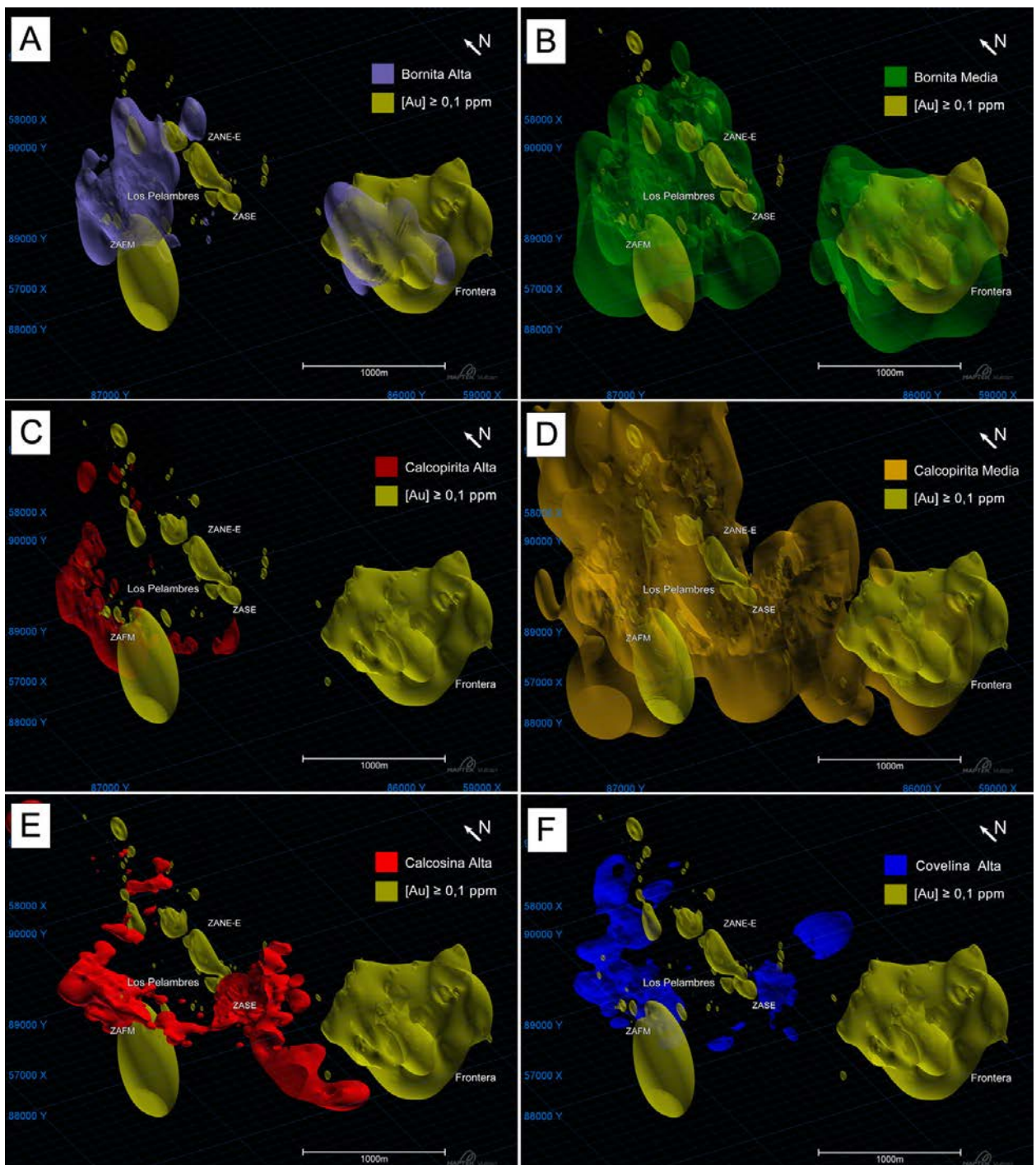


Figura 5.20: Comparación espacial entre sólidos de Au alto y sólidos de abundancia mineral de sulfuros, vista isométrica. A: bornita alta. B: bornita media. C: calcopirita alta. D: calcopirita media. E: calcosina alta. F: covelina alta.

por los sólidos de bornita alta - media (Figs. 5.20A y 5.20B, respectivamente), y partes del sólido de bornita media que no están ligadas a zonas con oro alto.

El volumen con calcopirita alta (Figs. 5.19B y 5.20C), con ocurrencias exclusivamente en Los Pelambres, se presenta como halo del sólido de bornita alta. Por esto, no existe

coincidencia con las anomalías de concentración de oro mayor a 0,1 ppm. Visualizando el sólido de calcopirita media (Fig. 5.20D), se observa que este mineral es transversal a todas las anomalías definidas de oro, coincidiendo en partes con el sólido de bornita alta, indicando coexistencia de bornita y calcopirita en algunas zonas anómalas de Au. Nuevamente, parte de la anomalía de Frontera no es incluida por el sólido de calcopirita alta ni media –el mismo sector no incluido por bornita alta ni bornita media–.

Por último, a partir de la visualización del sólido de pirita alta (Fig. 5.21), es posible notar que sectores con altos contenidos de pirita no coinciden espacialmente con la mayoría de las zonas anómalas de oro: forman un halo distal alrededor de ellas, y así se termina de configurar una zonación de sulfuros, desde el centro de los depósitos hacia afuera, de bornita, calcopirita, y pirita. La excepción a lo anterior está dada por la correlación espacial entre ZASE y sólido de pirita alta, y algunas pequeñas ocurrencias de pirita alta en ZANE-E. ZASE se encuentra en un corredor de pirita alta de orientación NNE-SSW a NE-SW (Fig. 5.21), que recuerda al sistema de estructuras de la misma orientación de Los Pelambres, vinculado a lineamientos de arsénico.

5.3.2. Au y sulfuros supérgenos

Los sulfuros supérgenos de los que se poseen sólidos de abundancia mineral son calcosina y covelina.

En la Figura 5.20E se aprecia el sólido de calcosina alta en comparación a las zonas anómalas de Au, donde es notable la ausencia de calcosina alta en Frontera y ZAFM (a mayor profundidad), la coincidencia con parte de ZANE-E, y la correlación total con ZASE. Una situación similar se da en la comparación con el sólido de covelina alta (Fig. 5.20F), aunque la correlación de éste con ZASE es solo parcial.

5.3.3. Au y horizontes supérgenos

Con la finalidad de estudiar posibles relaciones entre horizontes supérgenos, incluyendo su mineralogía asociada, y concentraciones anómalas de Au, se comparan sólidos de Au alto y nivel de enriquecimiento secundario y nivel con anhidrita (Fig. 5.22). El nivel con anhidrita tiene mucha relación con niveles de mineralización hipógena (ver marco geológico). Los niveles con anhidrita se encuentran siempre a mayor profundidad que la base del nivel de enriquecimiento secundario. Esto es debido a que las condiciones fisicoquímicas de formación del nivel de enriquecimiento supérgeno, son de inestabilidad para la anhidrita, la cual se transforma en yeso.

Se constata que ZAFM se encuentra en su totalidad en horizonte de mineralización hipógena, así como también las porciones inferiores de Frontera y ZANE-E. Por otro lado, la ZASE está contenida en el nivel de enriquecimiento supérgeno de forma completa. Existen partes de Frontera y ZANE-E que también presentan mineralización supérgena.

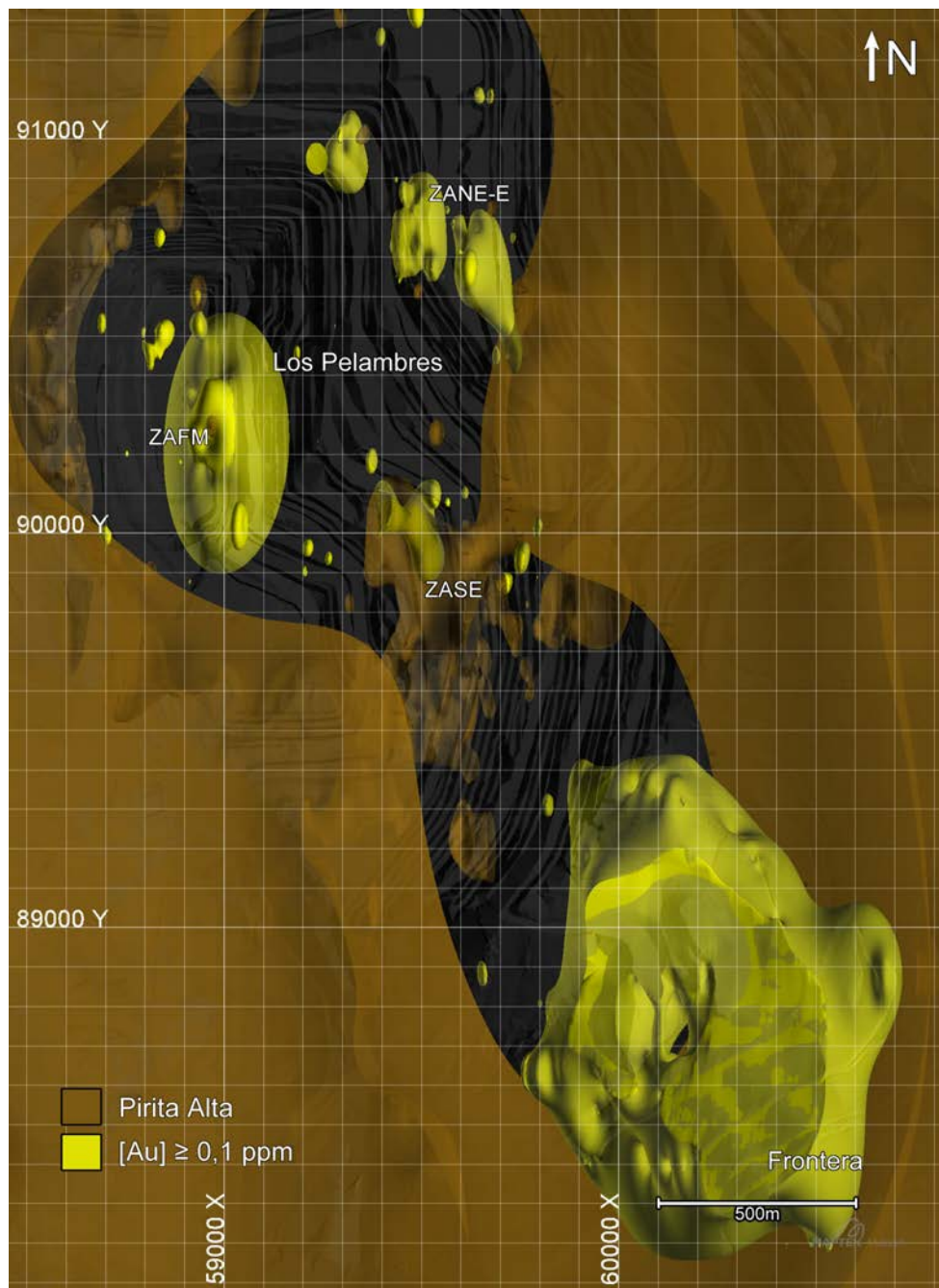


Figura 5.21: Comparación espacial entre sólidos de Au alto y sólidos de abundancia mineral de pirita alta, vista en planta. Color negro representa espacio libre entre sólidos de Au y los de pirita alta

Las morfologías de las anomalías no parecen depender de los horizontes supérgenos en Los Pelambres-Frontera, por lo que no existe relación directa con las concentraciones de oro ni con espacialmente respecto a las anomalías.

Las observaciones anteriores se reafirman al estudiar las concentraciones de Au a lo largo del sondaje MAM025, de Frontera (Fig. 5.23). Este sondaje parte en horizonte lixiviado, sigue por lixiviado parcial (junto a óxidos de Cu) para luego intersectar el horizonte de enriquecimiento secundario de Frontera, finalizando en zona de mineralización primaria. La

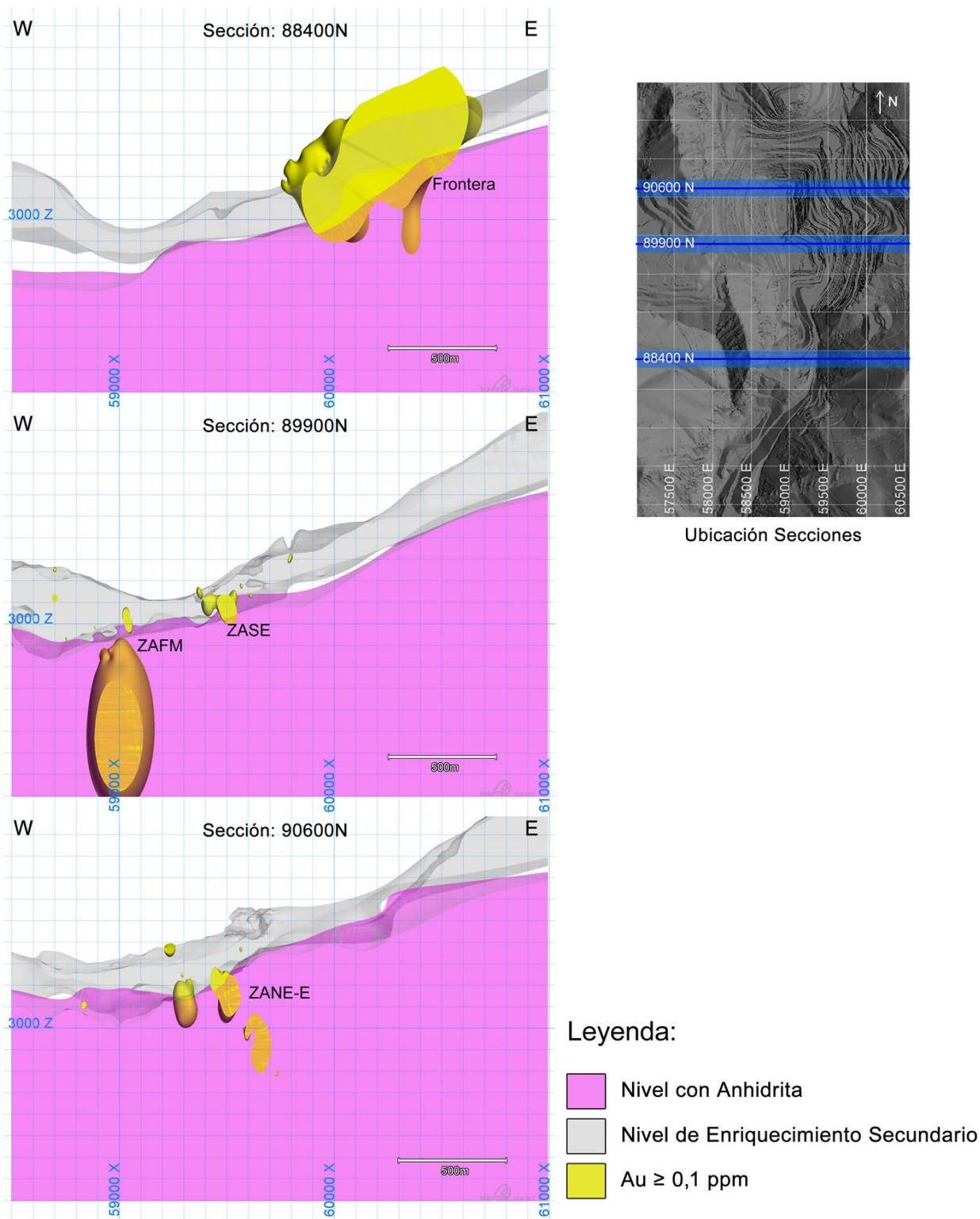


Figura 5.22: Comparación espacial entre sólidos de Au alto y horizontes supérgenos. Vistas en perfiles E-W, con ubicación indicada en la figura.

Frontera: Sondaje MAM025

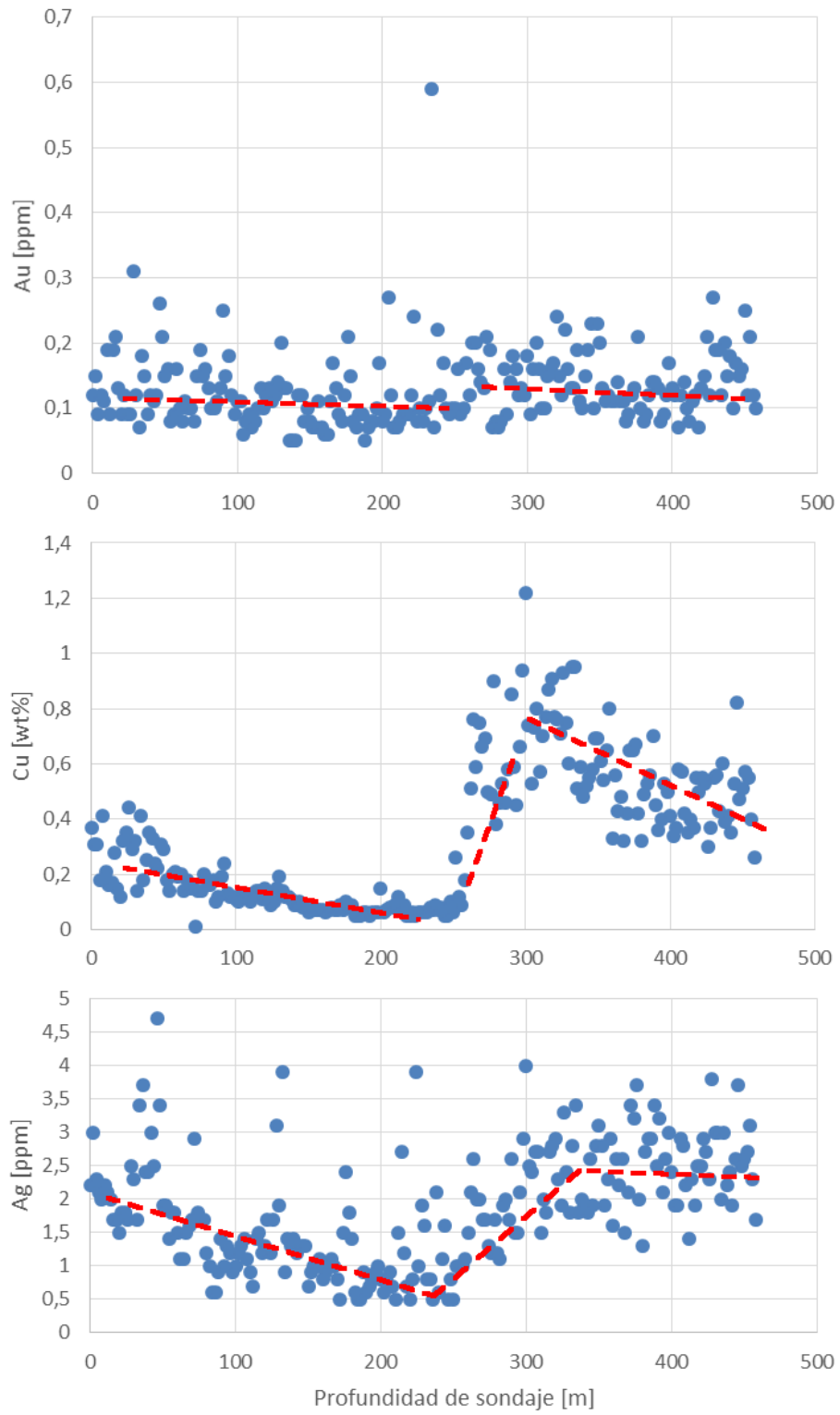


Figura 5.23: Leyes de Au, Ag y Cu a lo largo de sondaje MAM025 de Frontera. Líneas segmentadas rojas explicitan tendencias de los datos.

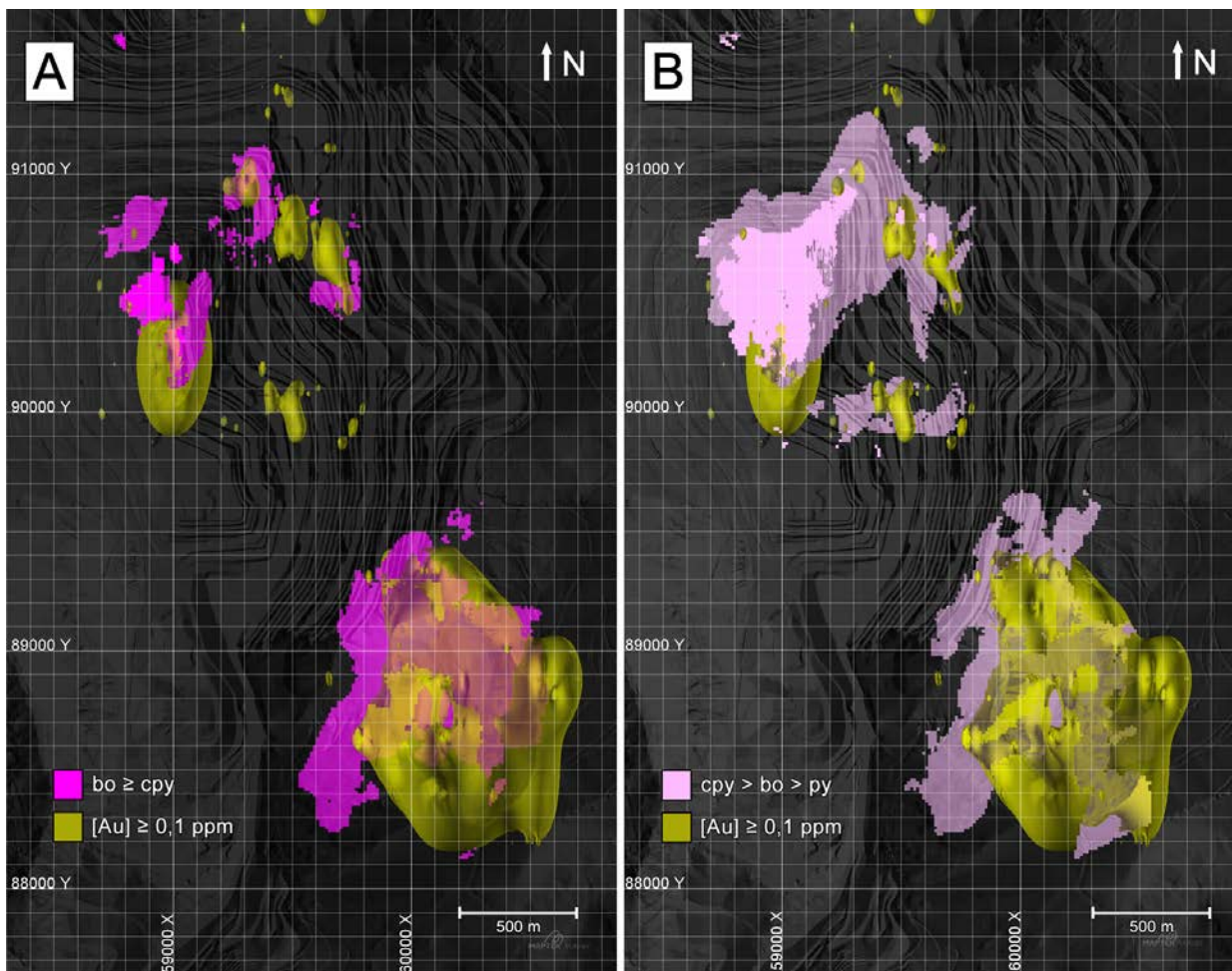


Figura 5.24: Comparación espacial entre sólidos de Au alto y bloques que representan abundancia relativa entre bornita y calcopirita. A: bornita \geq calcopirita. B: calcopirita $>$ bornita $>$ pirita.

concentración de Au a lo largo de este sondaje varía muy poco, a diferencia de Cu, que claramente representa los horizontes antes mencionados. Lo anterior sugiere que Au no es controlado por horizontes supérgenos, por lo que se comportó como un elemento inmóvil (ver marco teórico).

5.3.4. Au y razones entre minerales

Además de estudiar las posibles asociaciones entre anomalías de oro y presencia absoluta de ciertos minerales, se estudia la ocurrencia relativa de un mineral respecto a otro. En particular, se estudia la relación entre bornita y calcopirita, esto motivado por observaciones de mineralogía de sulfuros en zonas anómalas (ver más adelante, características geológicas de zonas anómalas). El volumen caracterizado por tener mayor abundancia de bornita que calcopirita, está fuertemente asociado a los sólidos de oro alto, al menos en vista en planta (Fig. 5.24A). De hecho, delimita casi los mismos sectores, presenta una interrupción entre ZAFM y ZANE-E (al igual que los sólidos de oro), y tiene excelente correlación en Frontera. Sin embargo, no hay coincidencia de zonas $bo > cpy$ con ZASE, probablemente debido a que

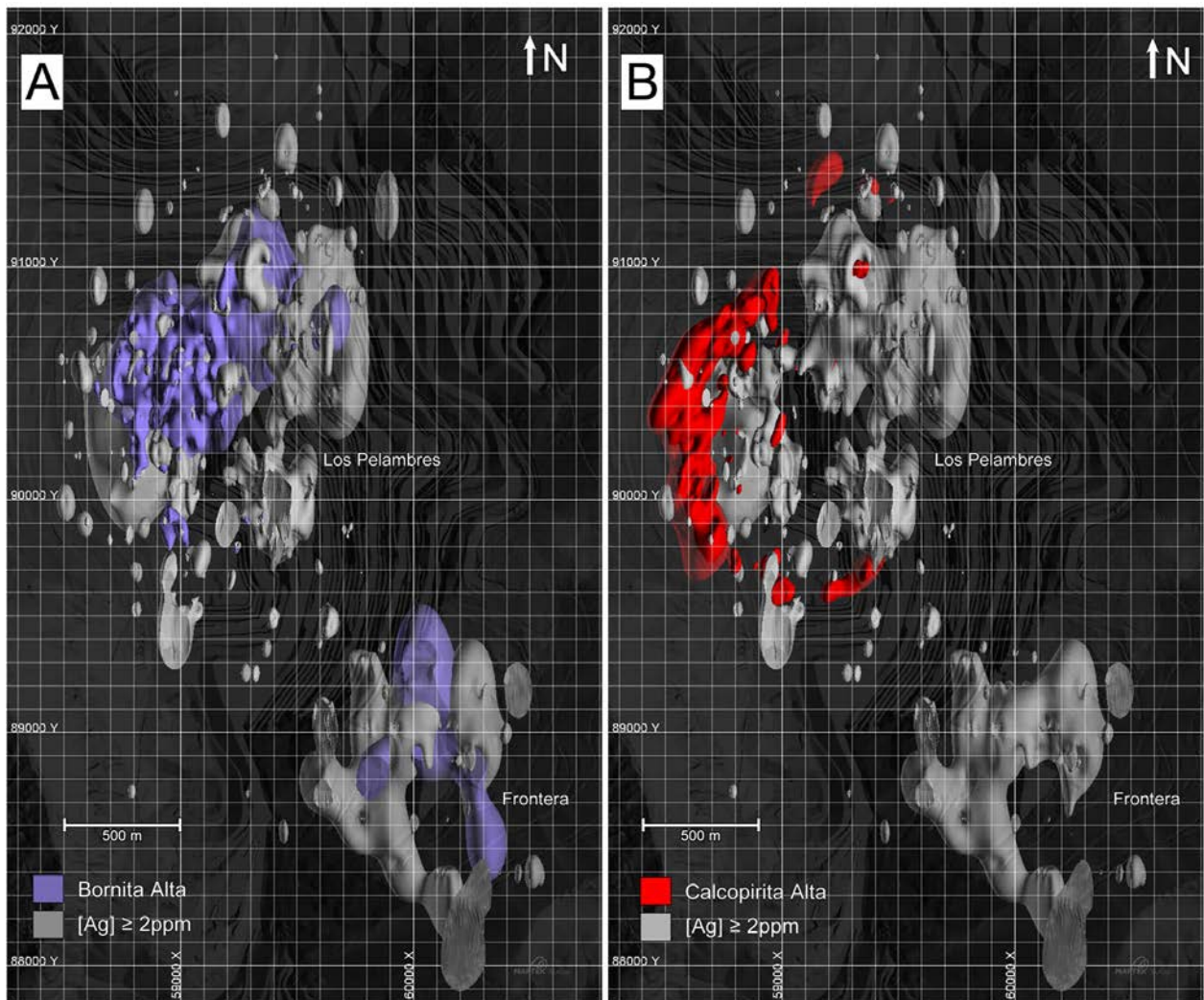


Figura 5.25: Comparación espacial entre sólidos de Ag alto y sólidos de abundancia mineral de sulfuros primarios, vista en planta. A: bornita alta. B: calcopirita alta.

esta zona es conformada por una mineralogía distinta de sulfuros, la cual tiene bornita en muy bajas cantidades (trazas, ver más adelante).

La relación de estas zonas de mayor bornita con ZANE-E, si bien es buena en vista de planta, no es completamente satisfactoria en profundidad.

El volumen definido por la condición calcopirita > bornita > pirita encierra al volumen de bornita > calcopirita y se mezcla con este último (Fig. 5.24B), sugiriendo que las zonas anómalas de Au tienen proporciones variables de bornita/calcopirita. Esto último puede ser una de las razones de porqué la ZANE-E no está completamente relacionada a $bo > cpy$. Cabe destacar que este volumen, con mayor calcopirita relativa, se relaciona a ZASE, y al resto de las anomalías antes definidas, pero abarca un volumen entre ZAFM y ZANE-E que no presenta valores anómalos de oro.

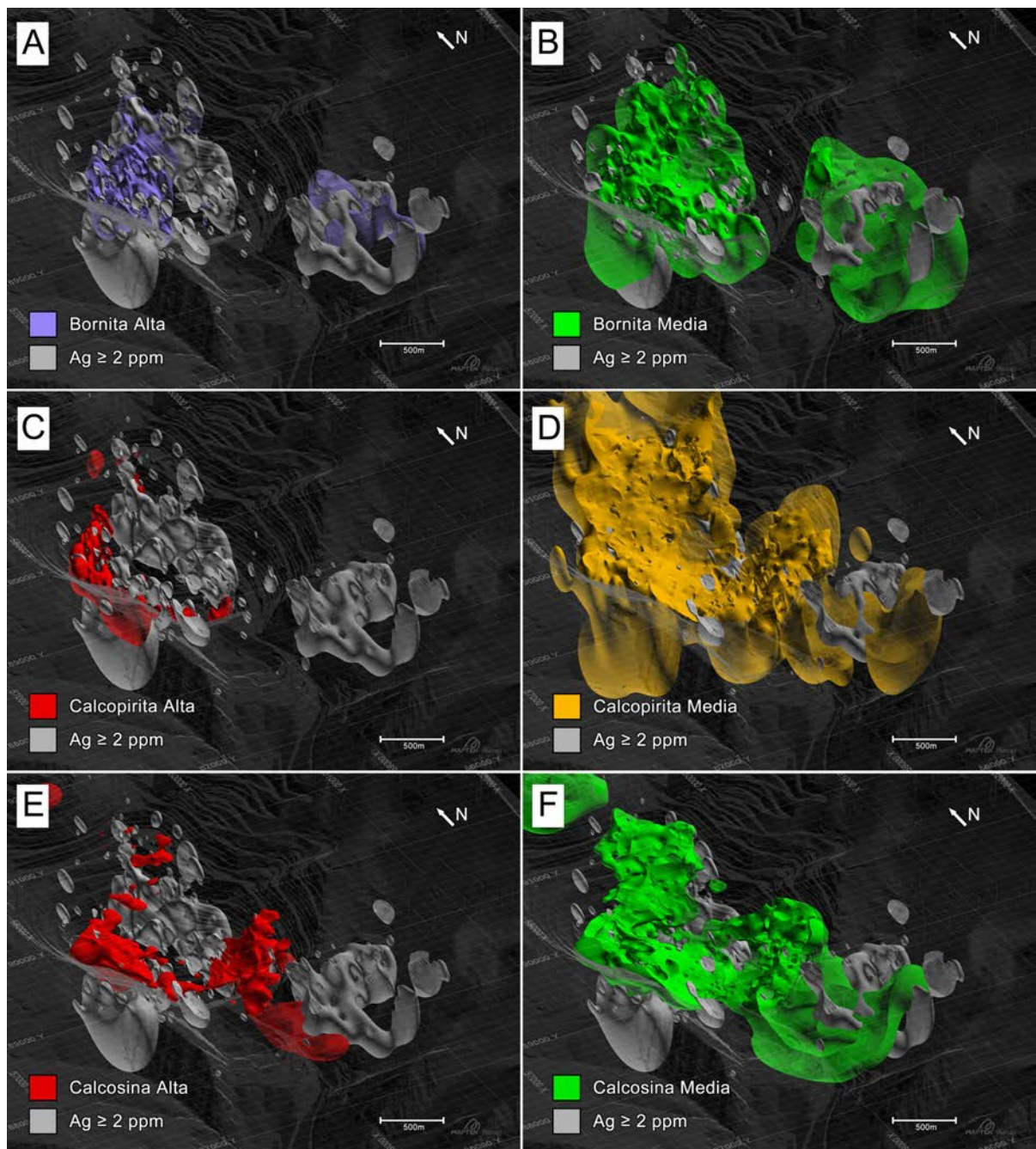
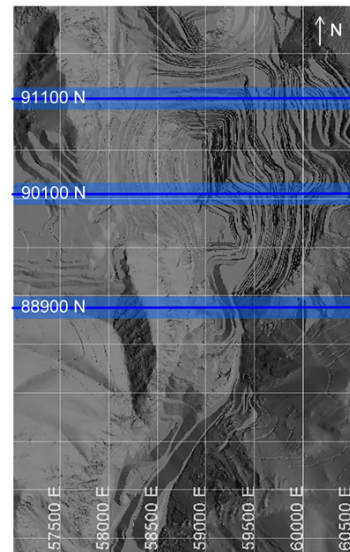
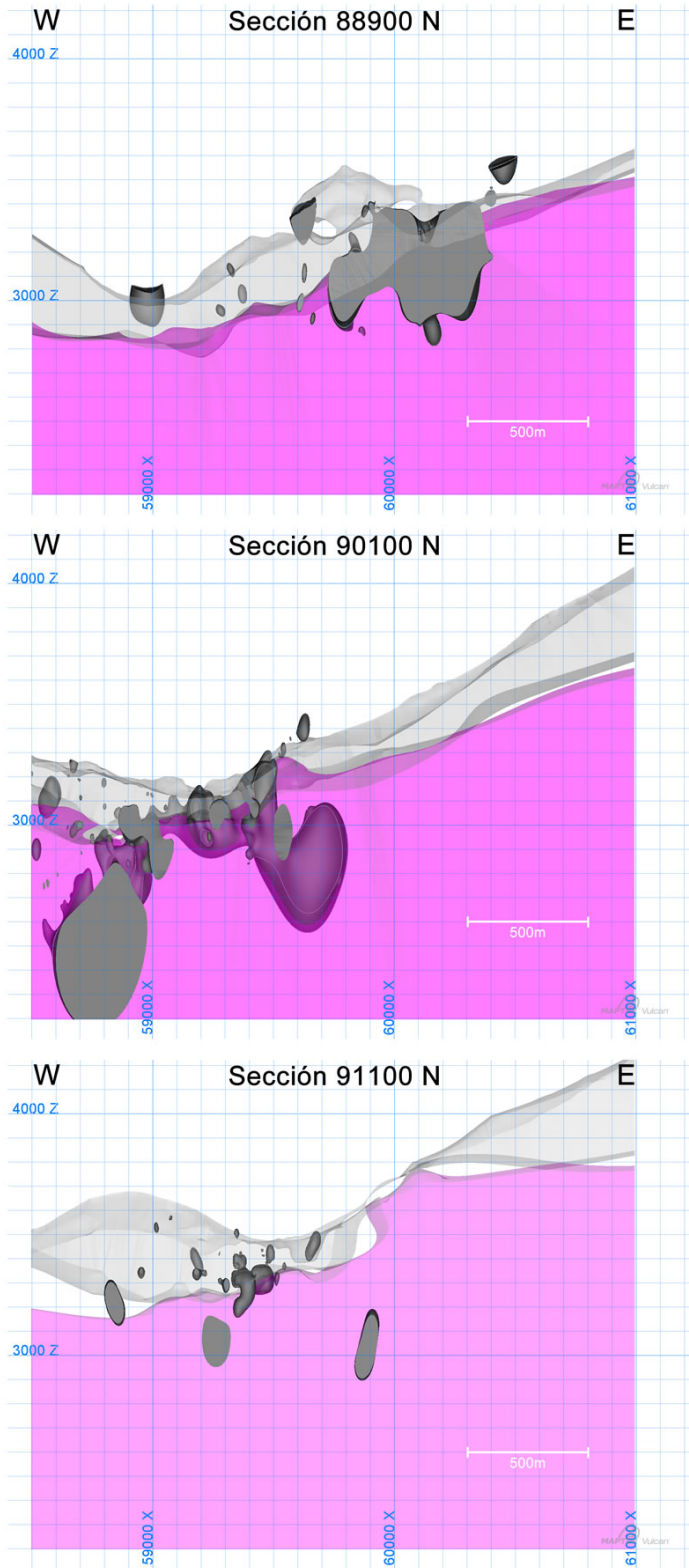


Figura 5.26: Comparación espacial entre sólidos de Ag alto y sólidos de abundancia mineral de sulfuros, vista isométrica. A: bornita alta. B: bornita media. C: calcopirita alta. D: calcopirita media. E: calcosina alta. F: calcosina media.

5.3.5. Ag y mineralogía de sulfuros

Un análisis similar al anterior es realizado para plata. Sólido de Ag alto tiene una moderada a pobre correlación espacial con sólido de bornita alta en Frontera (Figs. 5.25A y 5.26A), a diferencia de lo que sucede con Au, situación en que la correlación es muy buena. Esta baja correlación puede ser vista especialmente en una prolongación hacia el S de la anomalía de Ag de Frontera, que no está vinculada a bornita alta ni a oro alto. Por otro lado, en Los



Ubicación Secciones

Leyenda:

- Nivel con Anhidrita
- Nivel de Enriquecimiento Secundario
- [Ag] ≥ 2 ppm

Figura 5.27: Comparación espacial entre sólidos de Ag alto y horizontes supérgenos. Vistas en perfiles E-W, con ubicación indicada en la figura. Sólidos de Ag alta contenidos en el sólido de Nivel con anhidrita pueden ser mostrados de color violeta.

Pelambres, los sólidos de Ag superan en volumen al sólido de bornita alta, y su correlación solo es parcial: en las mismas zonas que para Au. Ag y bornita media (Fig. 5.26B) definen volúmenes parecidos.

Al igual que Au, Ag no se correlaciona en lo absoluto con sólido de calcopirita alta (Figs. 5.25B y 5.26C), mientras que calcopirita media encierra casi completamente a los sólidos de Ag (Fig. 5.26D). Para pirita, el caso es igual al del Au.

Más interesante para Ag son los sulfuros secundarios, en particular calcosina (Figs. 5.26E y 5.26F). Calcosina media y alta coinciden a grueso modo con pequeñas ocurrencias de Ag alta ubicadas en cotas altas, y en particular, calcosina media se prolonga hacia el S de la anomalía de Frontera, del mismo modo que lo hace Ag alta (Fig. 5.26F). Sin embargo, existe un gran sector, entre Los Pelambres y Frontera, que presenta calcosina alta/media, pero no Ag alto. Por esto, tampoco es directa una relación entre Ag y calcosina.

Control de horizontes secundarios sobre la ocurrencia de altas concentraciones de plata tampoco es evidente, aunque el horizonte de enriquecimiento secundario parece ser huésped de una considerable cantidad de pequeñas anomalías de Ag (Fig. 5.27), probablemente las que son relacionadas a mineralogía supérgena. Examinando las concentraciones de Ag a lo largo del sondaje MAM025, de Frontera (Fig. 5.23), se nota claramente que Ag sigue una tendencia de leyes similar al Cu: es controlado fuertemente por los horizontes supérgenos, concentrándose en el nivel de enriquecimiento secundario, probablemente asociada a sulfuros supérgenos propios de esta zona, como calcosina.

5.3.6. Síntesis

Las zonas anómalas de oro de Frontera y Los Pelambres (a excepción de ZASE) ocurren en rocas con mineralización dada por asociaciones de, al menos, bornita + calcopirita, con pirita baja, específicamente bornita > pirita y calcopirita > pirita. Los sectores con bornita > calcopirita delimitan zonas similares a las de oro alto, pero la correlación es solo moderada. En ZASE, la asociación de mineralización presente posiblemente es calcopirita + pirita + calcosina + covelina. Todo indica que la abundancia mineral de cada uno de los minerales estudiados, por si misma, no podría explicar la ocurrencia de oro alto. Además, esta primera aproximación a las características de las zonas anómalas de oro definidas antes, sugiere que no todas poseen la misma mineralización de sulfuros. Más adelante se profundiza en las características geológicas de las zonas anómalas.

En el caso de la plata, es notable el control que podría ejercer el horizonte de enriquecimiento secundario (calcosina + covelina) a escala de Los Pelambres-Frontera. Posiblemente procesos de movilización supérgena han afectado a Ag muy por sobre Au, lo que explicaría en parte la alta dispersión en nubes de datos de gráficos bivariable Au vs. Ag. También existen ocurrencias de plata alta en conjunto con oro alto en nivel primario, por lo que control supérgeno sobre Ag no explica toda su ocurrencia.

5.4. Relación entre zonas anómalas de Au y litología

En el estudio de posibles controles sobre las concentraciones de oro y plata en Los Pelambres-Frontera, se exploran posibles vínculos con litología y alteración hidrotermal. Se emplean métodos similares que para el estudio de relación entre Au y mineralogía de sulfuros, es decir, se utilizan sólidos de oro alto-plata alta para la comparación visual con sólidos de litología y alteración. En adición, se estudian estadísticamente concentraciones de oro-plata de modelo de bloques de Au-Ag de Los Pelambres-Frontera (ver características en sección metodologías). Los bloques son filtrados a Au mayor o igual a 0,05 ppm, y Ag mayor o igual a 1 ppm, que son concentraciones consideradas anómalas, como visto antes. Por último, se exploran algunos datos adicionales sobre litología y alteración, que no son considerados en modelo de bloques, pero si en BDI.

5.4.1. Au y litología: comparación gráfica

En la comparación visual de las zonas anómalas de oro, según la definición de sólidos de oro alto, con principales rocas de caja pre-minerales del conjunto Los Pelambres-Frontera (Fig. 5.28A), se constata que el *cluster* de anomalías de Los Pelambres se encuentra alojado, casi en su totalidad, en el stock Los Pelambres. En particular, la ZANE-E coincide espacialmente con un corredor N-S de la variación textural de la diorita cuarcífera, Pórfido D (Fig. 5.29B). Por otro lado, la anomalía Frontera se encuentra hospedada en lavas andesíticas de la Formación Pachón, aunque parte de ella también se encuentra en el stock Los Pelambres.

De esta comparación de primer orden, se puede notar que ni Formación Los Pelambres ni la Toba Riolítica son litologías asociadas a anomalías de Au, algo esperable considerando que el grueso de la mineralización de interés de Los Pelambres-Frontera está al E de la falla Los Pelambres. El Pórfido Cuarzo-Feldespático, a pesar de compartir ubicación espacial con el stock Los Pelambres, no presenta zonas con sólidos de Au alto.

A pesar de la coincidencia de sólidos de Au alto con litologías nombradas anteriormente, no es posible establecer una relación directa Au-stock Los Pelambres ni una Au-Formación Pachón, dado que los valores anómalos de oro están concentrados solo en una porción de las anteriores, y no uniformemente en la roca, es decir, no es posible indicar que la presencia de lavas andesíticas de la Formación Pachón implican altos valores de oro, por ejemplo. Otro es el caso del Pórfido D, que pudiera estar directamente relacionado al Au: al menos en ZANE-E esto sucede, pero existe una ocurrencia de Pórfido D al NE de Frontera, en particular al NE de ZANE-E, de la que no se tienen datos suficientes de concentraciones de oro como para asegurar el vínculo.

Ahora, al comparar las anomalías de oro con las litologías correspondientes a intrusiones interminerales: Pórfido A, Pórfido B, y centros hidrotermales asociados: Brechas Magmático-Hidrotermales e Hidrotermales, Pegmatitas (Fig. 5.29), se observa buena correlación espacial de éstas con las zonas anómalas en Los Pelambres, y en menor medida, en Frontera. A grandes rasgos, en Los Pelambres, las zonas anómalas de Au se ubican en los sectores de mayor

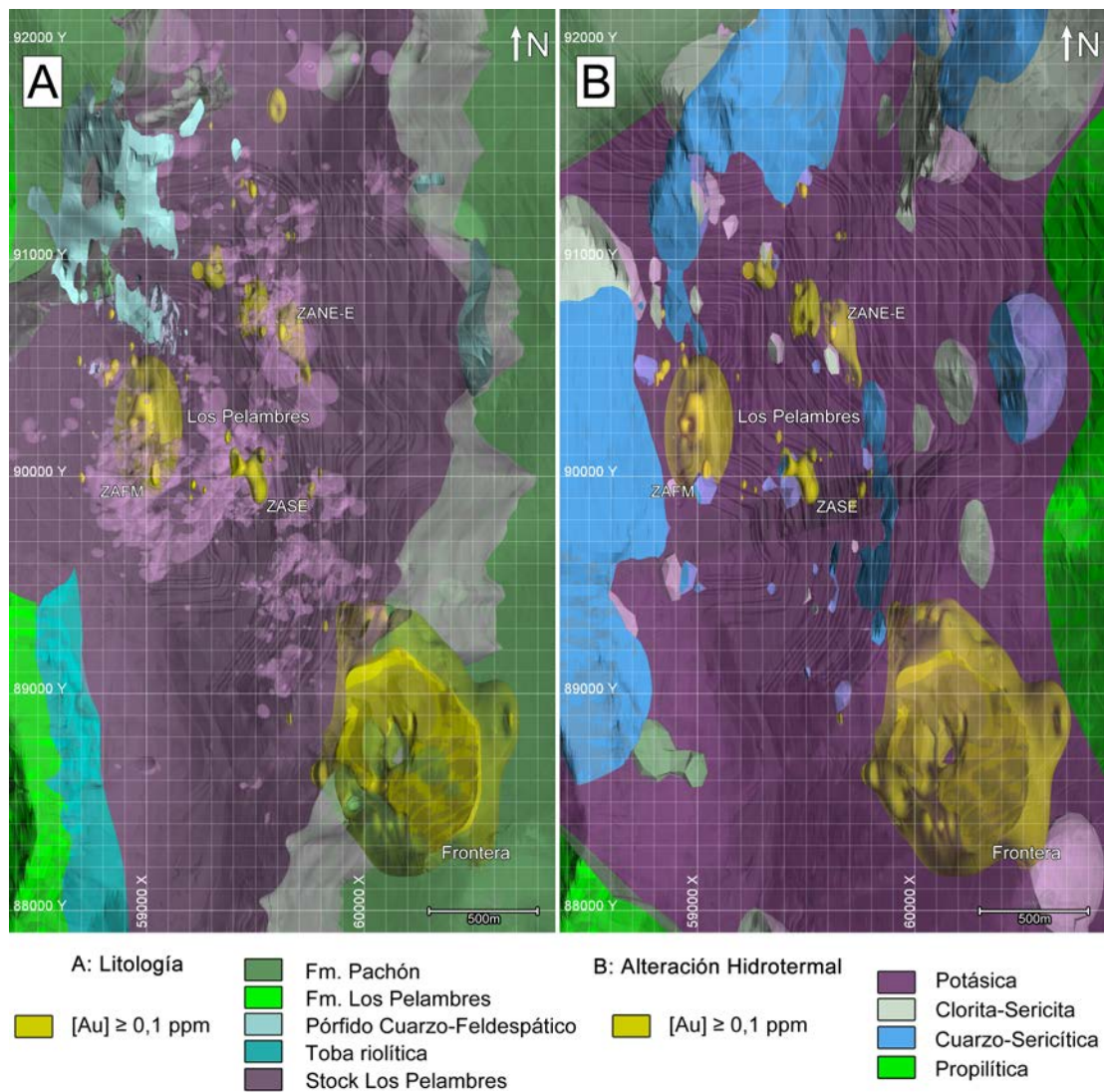


Figura 5.28: Modelos de litología de roca caja y alteración hidrotermal del conjunto Los Pelambres-Frontera, en comparación con sólidos de Au alto. A: litología de roca caja, incluyendo intrusión pre-mineral del stock Los Pelambres. B: alteración hidrotermal.

concentración de centros hidrotermales y Pórfidos A y B. La excepción a esta observación es una franja de pórfidos-centros hidrotermales, de orientación NNE-SSW, que se ubica entre Los Pelambres y Frontera, la cual no tiene asociada anomalía de oro alto (ni de Ag alta, ver a continuación), a pesar de alojar mineralización de cobre y molibdeno. Entre esta franja y el cúmulo de pórfidos-centros hidrotermales de Los Pelambres (ZAFM y ZASE), existe un corredor con ausencia de estas litologías, con la misma orientación antes explicitada.

La observación de relativa “ausencia” de las litologías antes nombradas en Frontera puede estar influenciada por los pocos sondeos existentes en el depósito, por lo que no se podría afirmar *a priori* que la anomalía Frontera esté menos ligada a pórfidos interminerales y brechas que las anomalías de Los Pelambres.

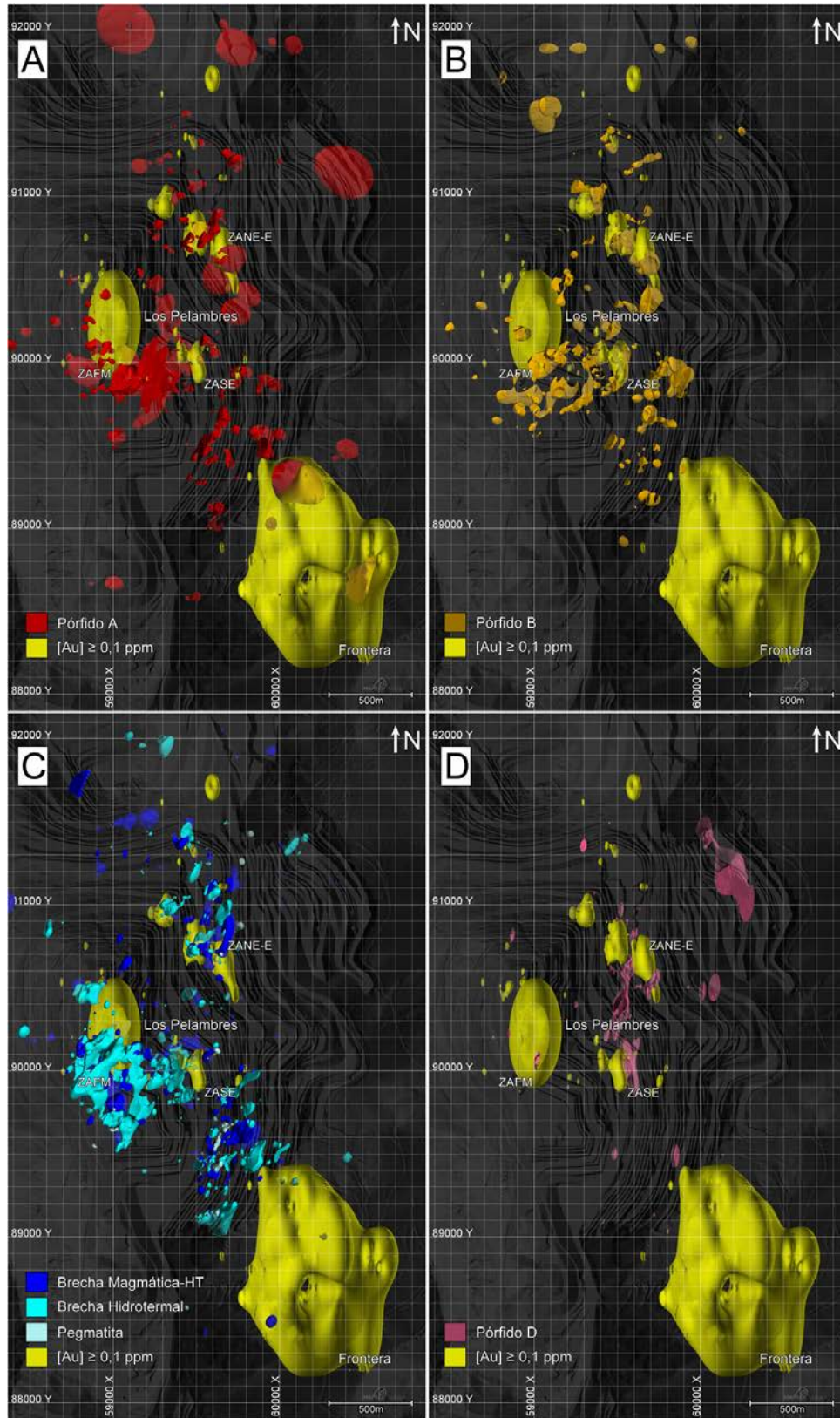


Figura 5.29: Distribución espacial de Pórfido D y litologías interminerales en Los Pelambres-Frontera, y comparación con sólidos de Au alto. A: Pórfido A. B: Pórfido B. C: Litologías asociadas a centros hidrotermales. D: Pórfido D.

5.4.2. Au y litología: comparación usando modelo de bloques

En general se observa, a partir de los datos del modelo de bloques (Fig. 5.30), que las litologías más presentes (en volumen) en las zonas con [Au] mayor a 0,05 ppm, son el stock Los Pelambres (incluyendo al Pórfido D) y las lavas andesíticas de la Formación Pachón (Fig. 5.30A). Al desglosar los datos en Los Pelambres y Frontera (Figs. 5.30B y 5.30C, respectivamente), se puede ver la relación del primero con el stock Los Pelambres, y del segundo con lavas andesíticas, algo esperable a partir de la visualización antes realizada de la ubicación de las anomalías. Luego, en abundancia relativa litológica, siguen el Pórfido A, y posteriormente las litologías ligadas a centros hidrotermales, como conjunto, y Pórfido B. Es notable la mayor abundancia relativa de Pórfido A que el B, tanto en Los Pelambres como en Frontera, en las zonas anómalas de Au. En Los Pelambres, los centros hidrotermales en las anomalías de Au tienen mayor ocurrencia que Pórfido B, y ocurre lo contrario en Frontera. Es de relevancia destacar la presencia en la zona anómala Frontera, de Pórfido Diorítico Tardío, la cual es reconocida solo en dos sondajes de Frontera. A pesar de ser considerado como intrusión tardimineral, de todas maneras presenta algo de mineralización de sulfuros de Cu (ver más adelante, características geológicas de zonas anómalas).

Estudiando los gráficos de barra de promedio de ley de Au versus litología, para los mismos bloques de la comparación anterior (filtrados a $[Au] \geq 0,05$ ppm), resaltan las mayores leyes promedio en Frontera, sobre las mismas litologías de Los Pelambres. También destaca el alto promedio relativo de ley de Au de Pórfido A, y en particular, la sistemática mayor ley de Pórfido A por sobre Pórfido B. Lo anterior, sumado a la mayor abundancia de Pórfido A sobre B en los bloques escogidos.

En Los Pelambres, se ven mayores leyes de litologías de centros hidrotermales, por sobre el resto, especialmente mayores que las leyes de rocas pre-minerales. En Frontera, destacan las altas leyes de las brechas hidrotermales, y de la roca caja (lavas andesíticas). Tanto en Los Pelambres como en Frontera, ocurre que las brechas hidrotermales tienen mayores leyes que las brechas magmático-hidrotermales, y en el caso de Frontera, estas últimas constituyen la litología con menor ley promedio de Au.

5.4.3. Ag y litología

Para la plata, se dan relaciones similares concentraciones anómalas y litología de roca caja premineral, situación mostrada en la Figura 5.31A. Al igual que Au, Ag alto de Los Pelambres se ubica principalmente en rocas del stock Los Pelambres, y Ag alto de Frontera, en lavas de la Formación Pachón. Respecto a las litologías interminerales (no mostrado), se da lo mismo que para Au, incluyendo la escasez de altas leyes asociadas a Pórfido Cuarzo-Feldespató, y la ausencia de Au alto en el sistema de pórfidos interminerales - centros hidrotermales que conforma una franja entre Los Pelambres y Frontera. La mejor correlación para litologías interminerales y Ag alto se logra en Los Pelambres. En ZANE-E, hay buena correlación de pórfidos A y B con mineralización relacionada a plata.

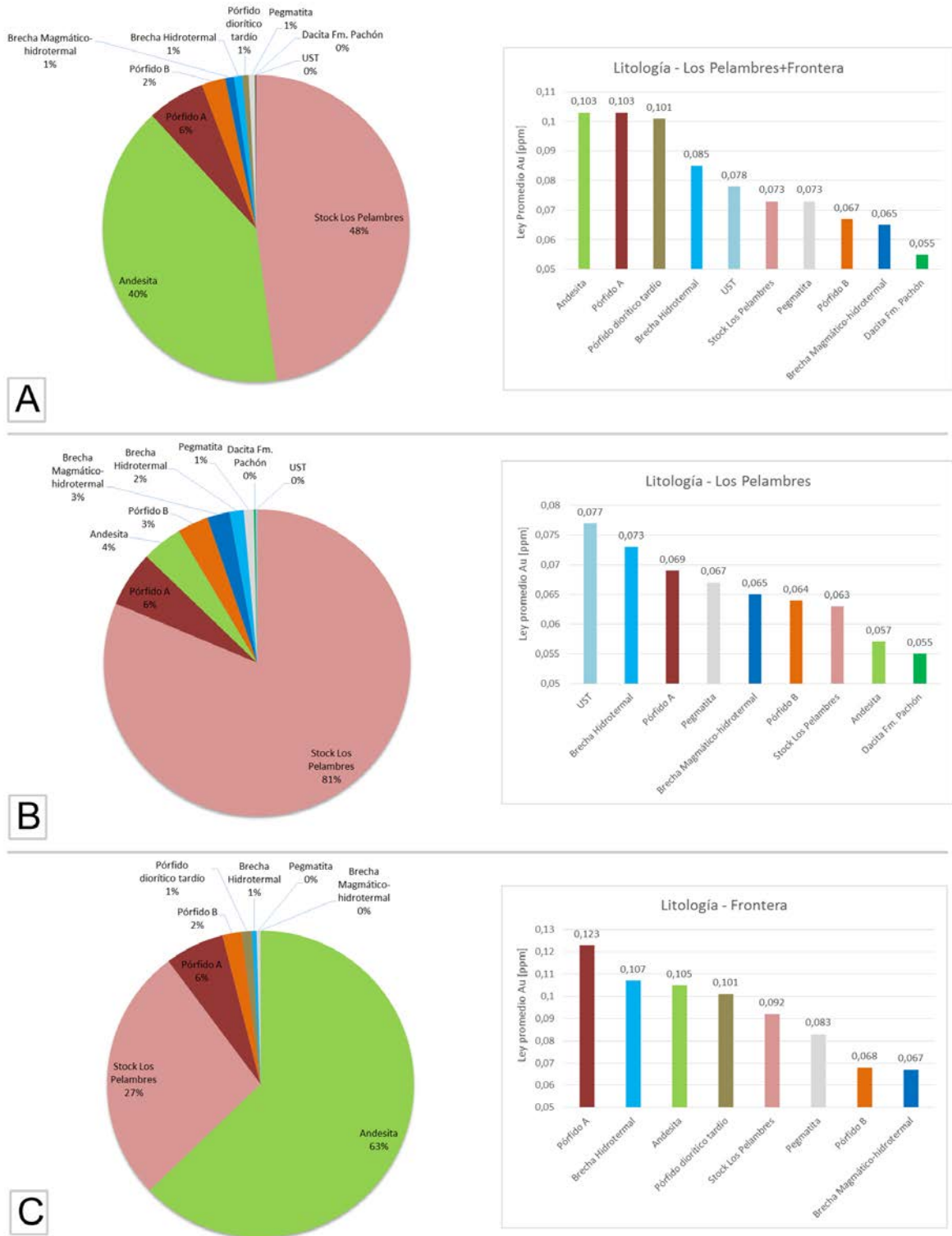


Figura 5.30: Datos estadísticos de litología, a partir de modelo de bloques, para bloques con concentración de Au $\geq 0,05$ ppm. Izquierda, abundancia relativa de bloques según litología, derecha: ley promedio de Au según litología. A: Los Pelambres + Frontera, B: Los Pelambres, C: Frontera. UST: rocas con texturas de solidificación unidireccional

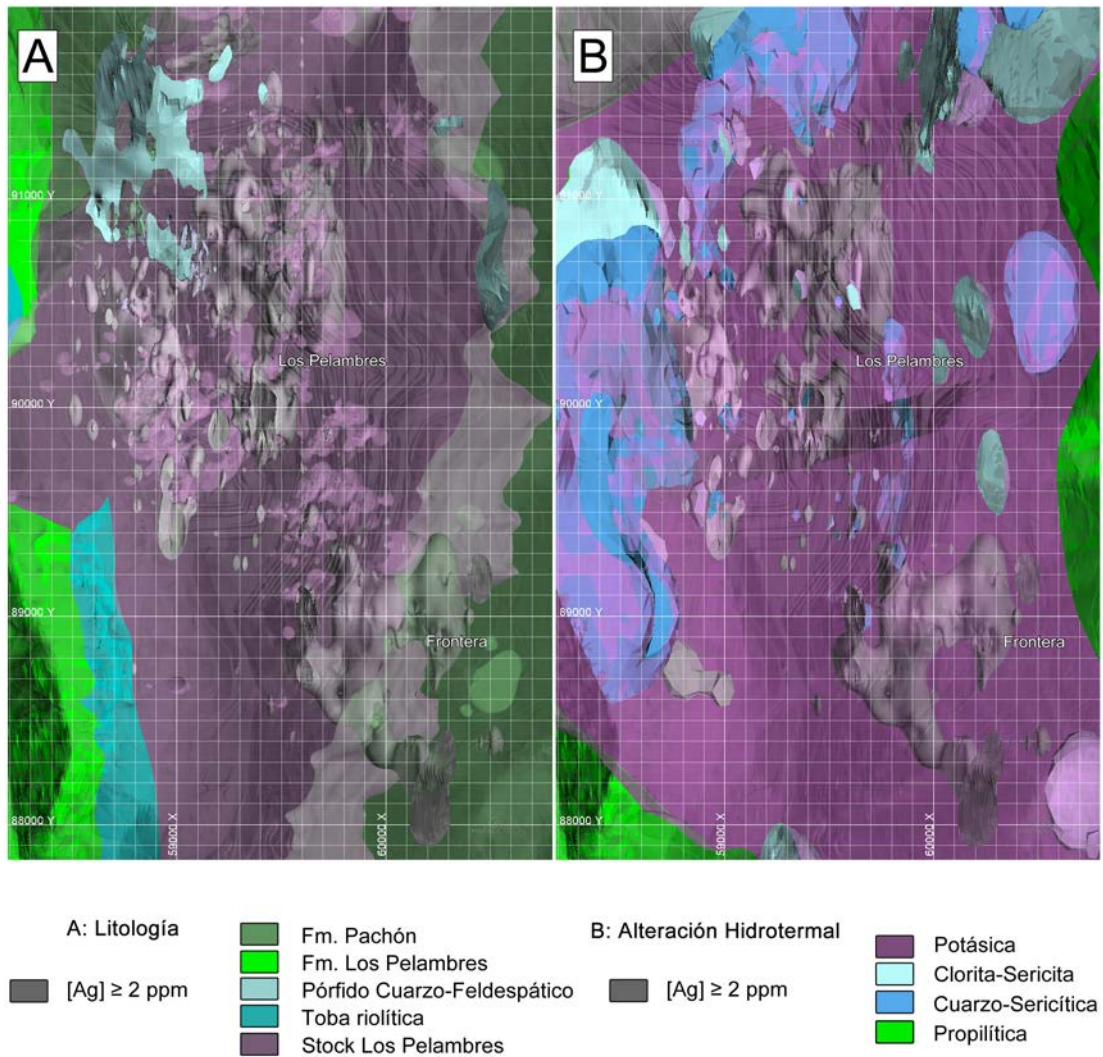


Figura 5.31: Modelos de litología de roca caja y alteración hidrotermal del conjunto Los Pelambres-Frontera, en comparación con sólidos de Ag alto. A: litología de roca caja, incluyendo intrusión pre-mineral del stock Los Pelambres. B: alteración hidrotermal.

Utilizando la información estadística de modelo de bloques, para Ag mayor o igual a 1 ppm (Fig. 5.32), se comprueba que la mayoría de los bloques de zonas anómalas de Ag, de Los Pelambres (Fig. 5.32B), corresponden a rocas del stock Los Pelambres, seguido, en orden de abundancia, por andesitas, Pórfido A, B y brecha magmática-hidrotermal. En cuanto a leyes de Ag por litología, se mantiene lo observado para Au: las litologías que mayor ley asociada de Ag tienen son las brechas hidrotermales y Pórfido A.

Asimismo, en Frontera (Fig. 5.32C) se den las mismas relaciones litología-Ag que para Au: abundancia de litologías asociadas a las andesitas de la Formación Pachón y, en segundo lugar, al stock Los Pelambres; y mayores leyes en Pórfido A, por sobre Pórfido B (~ 0,2 ppm de diferencia), y en específico, sobre brechas hidrotermales.

5.4.4. Síntesis

Del análisis antes hecho, se hace evidente la importancia, en la mineralización de Au y Ag en Los Pelambres-Frontera, del Pórfido A y brechas hidrotermales asociadas. La importancia de las brechas hidrotermales es de especial relevancia en Los Pelambres, donde poseen las mayores leyes de Au y Ag dentro de las zonas anómalas de dichos elementos, seguidas por Pórfido A, con altas leyes también, sugiriendo vínculo genético entre las dos. En Frontera, la litología de mayor relevancia es Pórfido A, seguido por brechas hidrotermales, aunque en el caso de Ag en Frontera, las brechas hidrotermales no contienen altas leyes, lo que constituye una excepción.

Cabe notar que no es posible afirmar que todas las brechas hidrotermales y todos los pórfidos A tendrán altas leyes de Au: basta ver franja de pórfidos-centros hidrotermales, sin oro alto, entre Los Pelambres y Frontera. Además, puede que otras litologías sean controladoras, en parte, de algunas anomalías de Au: es el caso de Pórfido D, en ZANE-E, y Pórfido Diorítico Tardío, en Frontera.

5.5. Relación entre zonas anómalas de Au y alteración hidrotermal

Es frecuente encontrar rocas con más de una asociación de minerales de alteración (ej: alteración sericítica sobreimpuesta a potásica) en Los Pelambres-Frontera, por lo que el criterio utilizado para la comparación es el de alteración dominante, en porcentaje de minerales de alteración.

5.5.1. Au y alteración hidrotermal

Según lo anterior, las zonas con concentraciones de oro anómalas coinciden espacialmente, en su gran mayoría, con rocas con alteración potásica predominante, tanto para Los Pelambres como para Frontera (Fig. 5.28B). La excepción a la observación anterior es la ZASE, que además alteración potásica, tiene una porción coincidente con una ocurrencia local de alteración cuarzo-sericítica dominante. Es importante notar que solo una parte de las rocas con alteración potásica predominante coinciden con zonas anómalas de Au, por lo que no es posible establecer una relación directa entre concentraciones anómalas de Au y alteración potásica.

Del modelo actualizado de alteración hidrotermal del depósito, destacan las amplias zonas de alteración cuarzo-sericítica, en los sectores E, NE, y N de Los Pelambres, las cuales no presentan mayores anomalías de oro. Lo mismo sucede para las alteraciones clorita-sericita, de ocurrencias locales, y propilítica. Esta última se encuentra como un halo distal de la alteración potásica central, y solo coincide con las zonas anómalas de Au en el lado E de

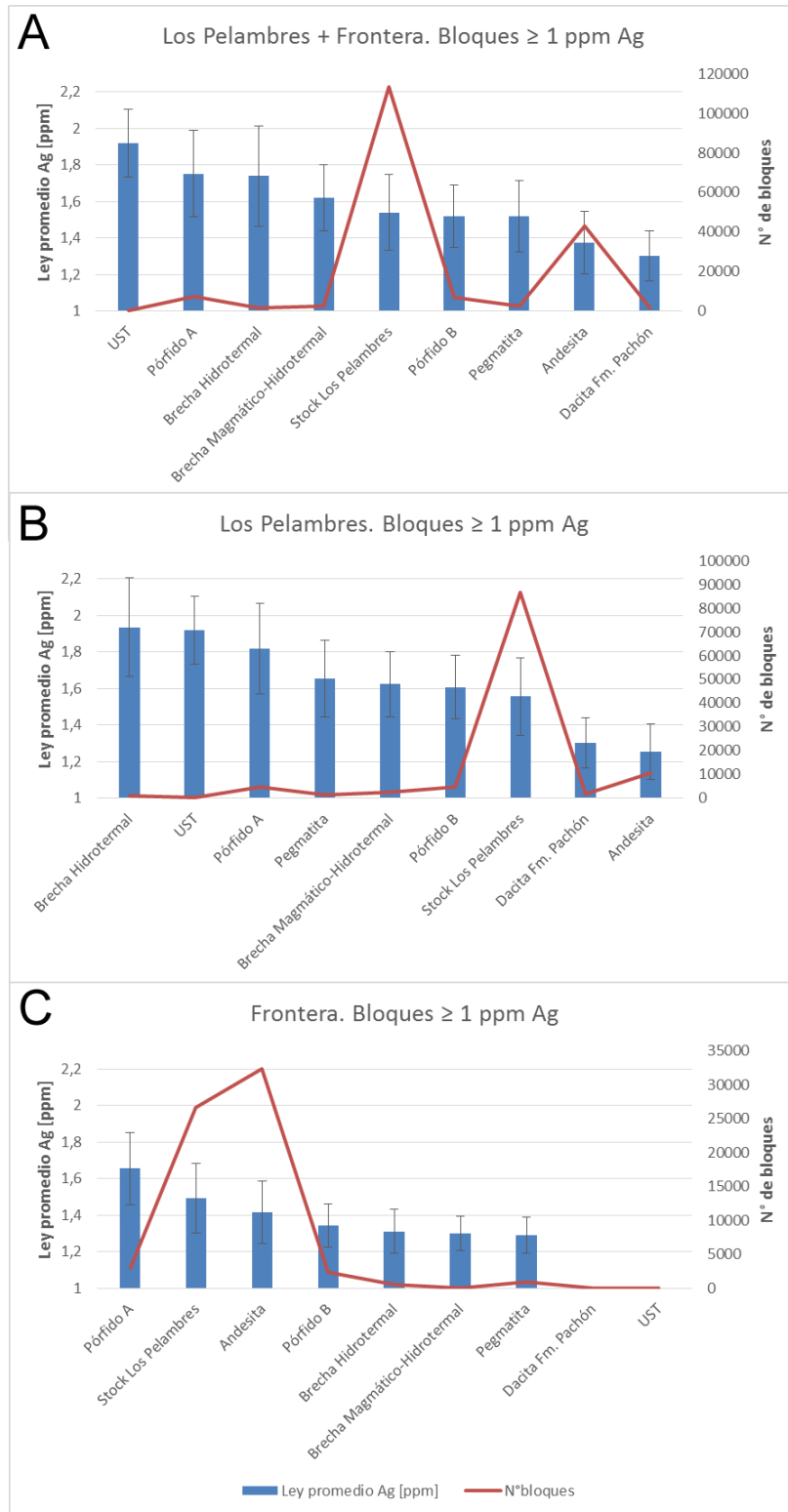


Figura 5.32: Datos estadísticos de litología -ley promedio Ag por litología, y abundancia relativa de bloques-, a partir de modelo de bloques, para bloques con concentración de Ag ≥ 1 ppm. A: Los Pelambres + Frontera. B: Los Pelambres. C: Frontera.

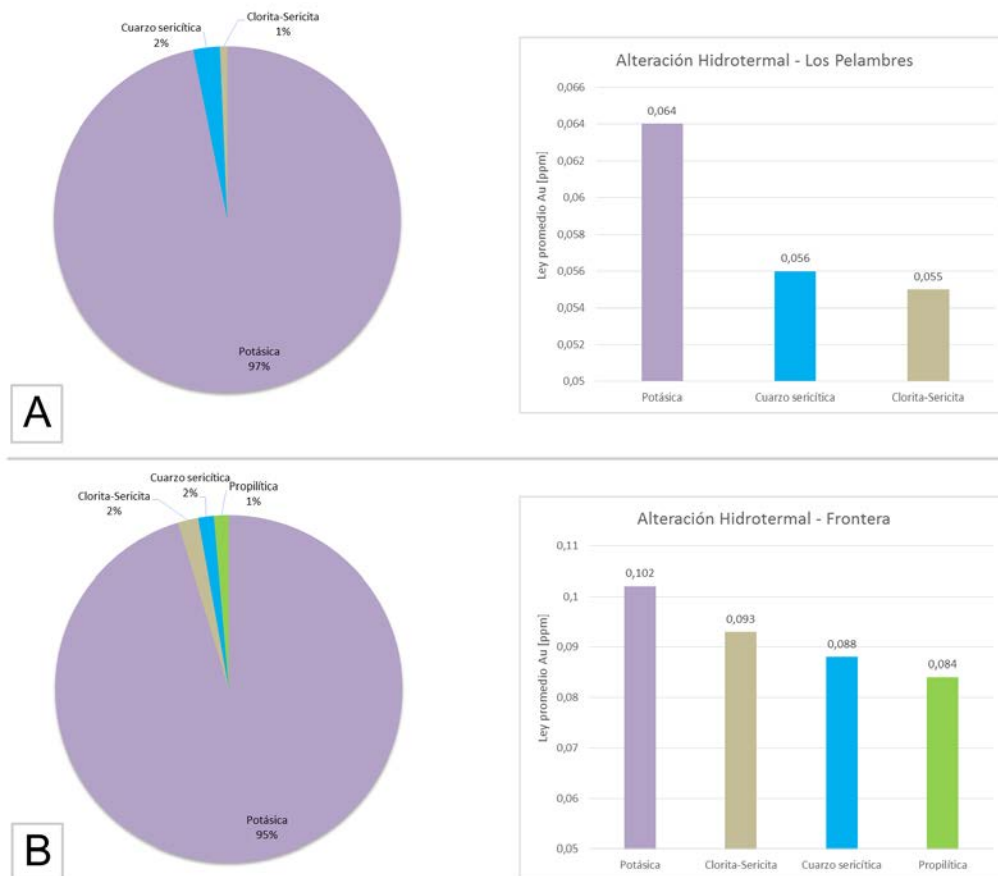


Figura 5.33: Datos estadísticos de alteración hidrotermal, a partir de modelo de bloques, para bloques con concentración de Au $\geq 0,05$ ppm. Izquierda, abundancia relativa de bloques según alteración hidrotermal, derecha: ley promedio de Au según alteración hidrotermal. A: Los Pelambres, B: Frontera

Frontera.

Aparte de la coincidencia de sólidos de Au alto con la alteración potásica, se constata, a partir de modelo de bloques para [Au] mayor o igual que 0,05 ppm, que esta alteración tiene sistemáticamente mayores leyes de oro que la alteración clorita-sericita, cuarzo-sericitica y propilitica (Fig. 5.33), además de ser la alteración hidrotermal dominante del 96 % de los bloques de Los Pelambres y Frontera (97 % y 95 %, respectivamente).

Utilizando directamente los datos de la BDI, se comprueba lo expuesto anteriormente, pero se desglosa a la alteración potásica según dominancia de biotita o feldespato potásico. En este análisis, la alteración potásica de feldespato potásico presenta mayores leyes de oro que su contraparte biotítica. Esta información no puede ser usada directamente por dos razones: 1.- Los tramos de sondaje que cumplen con la condición de “alteración potásica de feldespato potásico” son mucho menores en cantidad a los de alteración potásica biotítica, y los primeros se ubican preferencialmente en Frontera, depósito con mayores leyes de oro que Los Pelambres. De hecho, aproximadamente dos tercios de los tramos con esta característica de Los Pelambres, presentan concentraciones bajo 0,05 ppm; y 2.- Existen datos sobre alteración que no especifican dominancia de feldespato potásico o biotita, por lo que es posible que pudieran haber zonas con alto feldespato potásico de las que solo se sabe que corresponde a

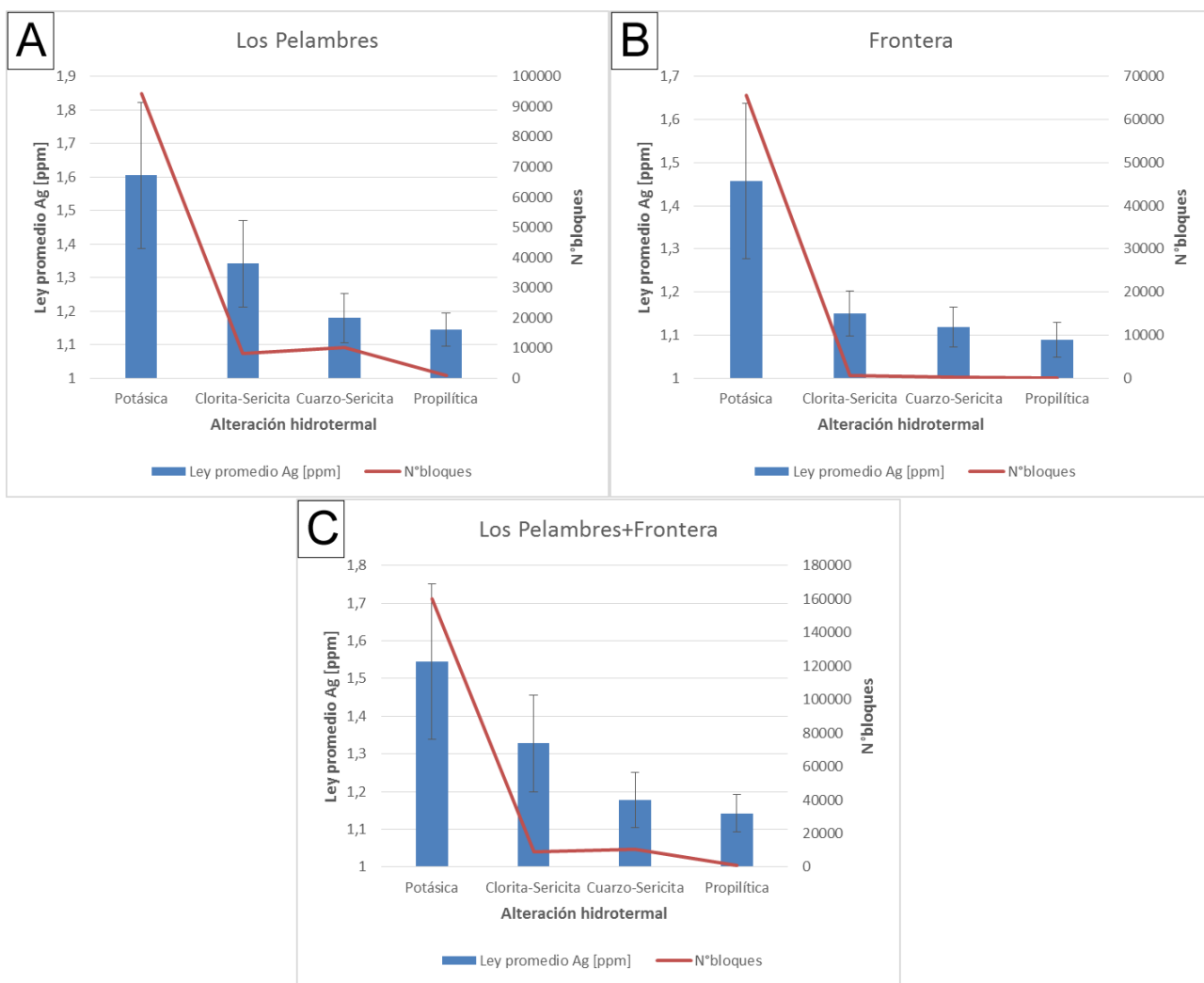


Figura 5.34: Datos estadísticos de alteración hidrotermal -ley promedio Ag por alteración, y abundancia relativa de bloques-, a partir de modelo de bloques, para bloques con concentración de Ag ≥ 1 ppm. A: Los Pelambres. B: Frontera. C: conjunto Los Pelambres-Frontera.

alteración potásica.

Es claro que alteración potásica no implica altas concentraciones de oro, ni que la alteración cuarzo-sericítica implica bajo oro. Sin embargo, zonas con contenidos anómalos de Au en alteración potásica tienden a tener mayor concentración de Au que zonas anómalas de oro con otro tipo de alteración hidrotermal. Lo anterior también es válido para Ag alta (ver a continuación).

5.5.2. Ag y alteración hidrotermal

A partir de comparación visual (Fig. 5.31B) y datos estadísticos de alteración versus concentración de plata en modelo de bloques (Fig. 5.34), para datos con plata mayor o igual a 1 ppm, se demuestra que la mayor parte de las rocas con altas concentraciones de plata tienen

alteración potásica (no se diferencia el tipo), seguida de alteración cuarzo-sericítica, clorita-sericita y, finalmente, propilítica. Hay ocurrencia de Ag alto en alteración cuarzo-sericítica al W de Los Pelambres, y puntualmente en sector correspondiente a ZASE (definida para Au), y en flanco NW de Frontera. Ocurrencias de Ag alto en rocas con alteración clorita-sericita es puntual en Los Pelambres-Frontera.

Dentro de las zonas anómalas de plata, los sectores con alteración potásica exhiben las mayores leyes. Le siguen las alteraciones clorita-sericita, cuarzo-sericita y propilítica. Lo anterior es válido tanto para Los Pelambres-Frontera, como para los depósitos por separado.

5.6. Relación entre zonas anómalas de Au y vetillas

El estudio del control de vetillas sobre la mineralización de Au es de interés en Los Pelambres-Frontera, debido especialmente a que la mineralización Cu-Mo del sistema está fuertemente relacionada a las vetillas: en específico, a tipos e intensidad de las mismas, como revisado en el marco geológico. El estudio también se hace para Ag, con el fin de conocer su comportamiento y contrastarlo con el de Au.

La investigación comprende tres enfoques: en primer lugar, se realiza una comparación visual, a modo general, con mapas de intensidad de vetillas de Los Pelambres-Frontera (Fig.

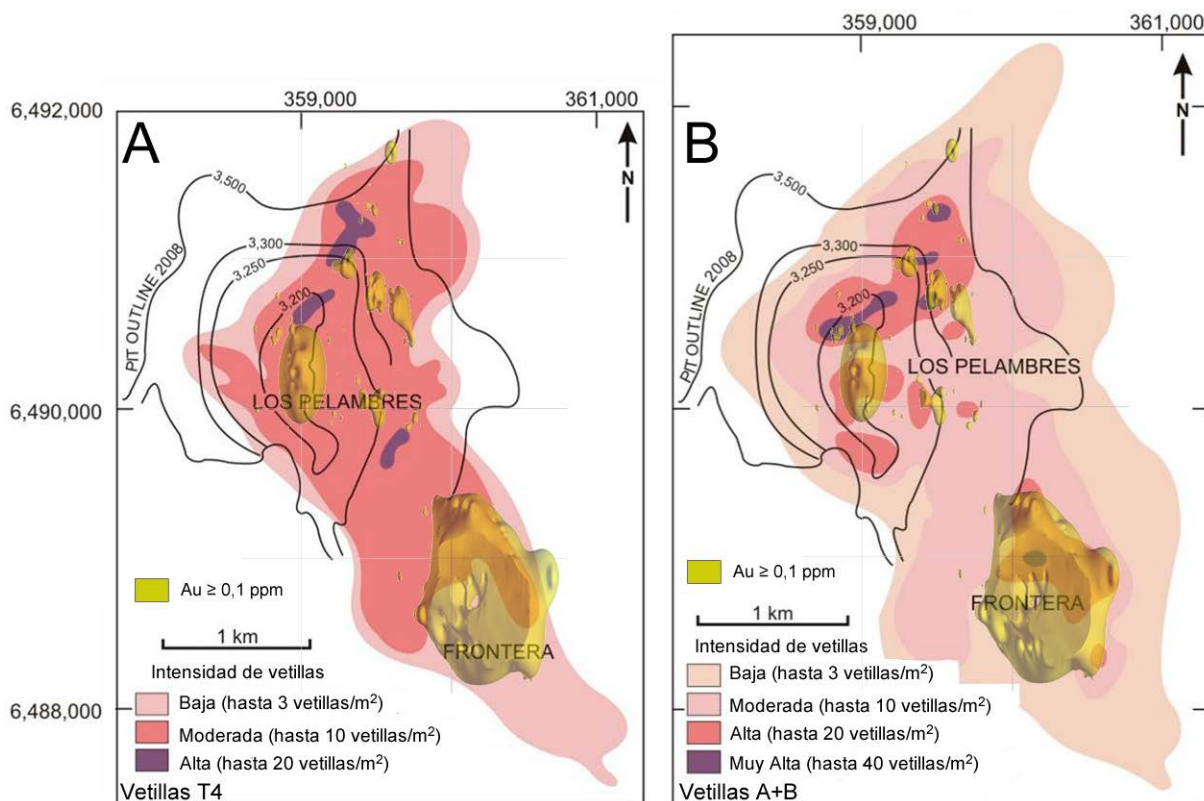


Figura 5.35: Superposición de sólidos de Au alto a mapa de intensidad de vetillas de Perelló et al. (2012)

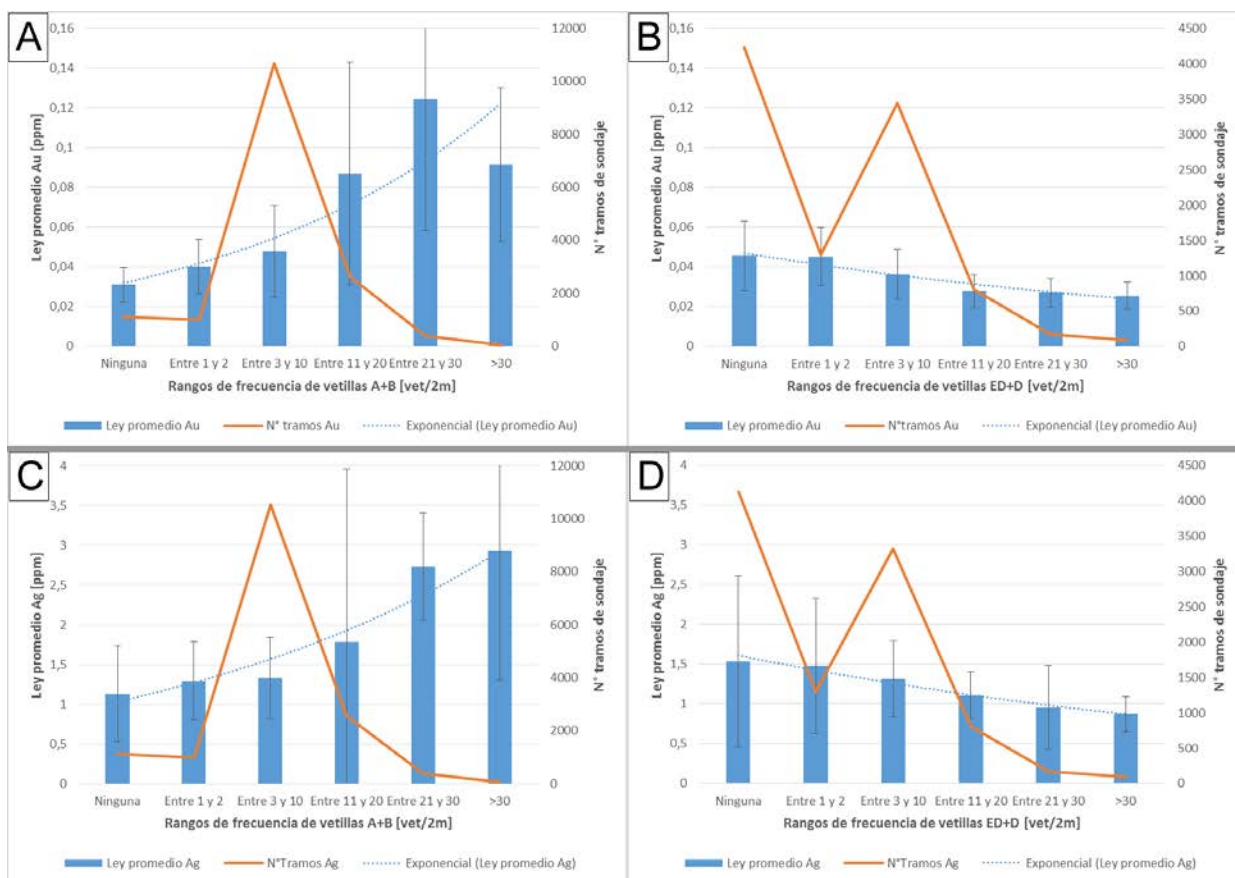


Figura 5.36: Ley promedio de Au-Ag respecto a rangos de frecuencia de vetillas en Los Pelambres-Frontera. Vetillas agrupadas en A+B y ED+D, aprovechando esta información a partir de BDI. Se explicita número de datos de Au por rango de vetilla. A: vetillas A+B respecto Au. B: vetillas ED+D respecto Au. C: vetillas A+B respecto Ag. D: vetillas ED+D respecto Ag. Barras de error= 1 desviación estándar.

5.35); en segundo, se estudian leyes promedio de oro y plata para rangos de agrupaciones de vetillas; y en último, se revisa las posibles dependencias entre número absoluto de vetillas y concentraciones de oro, muestra a muestra, usando datos de BDI. Comparación visual de zonas anómalas de Au y Ag con sólidos de intensidad de vetillas queda pendiente, debido a que estos sólidos se encuentran en construcción.

De la comparación de zonas anómalas de Au-Ag, y los mapas de intensidad de vetillas de Perelló et al. (2012), se visualiza que las vetillas T4 (Fig. 5.35A) son de distribución relativamente homogénea en Los Pelambres-Frontera, por lo que no sirven, directamente, para acotar zonas menores y puntuales, como el caso de anomalías de oro en Los Pelambres. En contraste, la agrupación de vetillas A+B define algunos núcleos que, en el caso de Frontera, son correlacionables de buena forma, y en el caso de Los Pelambres, solo moderadamente correlacionables (Fig. 5.35B). Se ve que la extensión S de ZANE-E no tiene representación por un sector de alto vetilleo A+B, y las morfologías de los sectores de alto vetilleo no se corresponden totalmente a las de Au. Por otro lado, las zonas anómalas de Au no presentan coincidencia espacial con los sectores de mayor vetilleo tipo D (no mostrado), esto es, área NW-W de Los Pelambres, coincidente con el mayor desarrollo de alteración sericítica.

A modo de complementar la comparación visual, se realiza análisis de relaciones entre

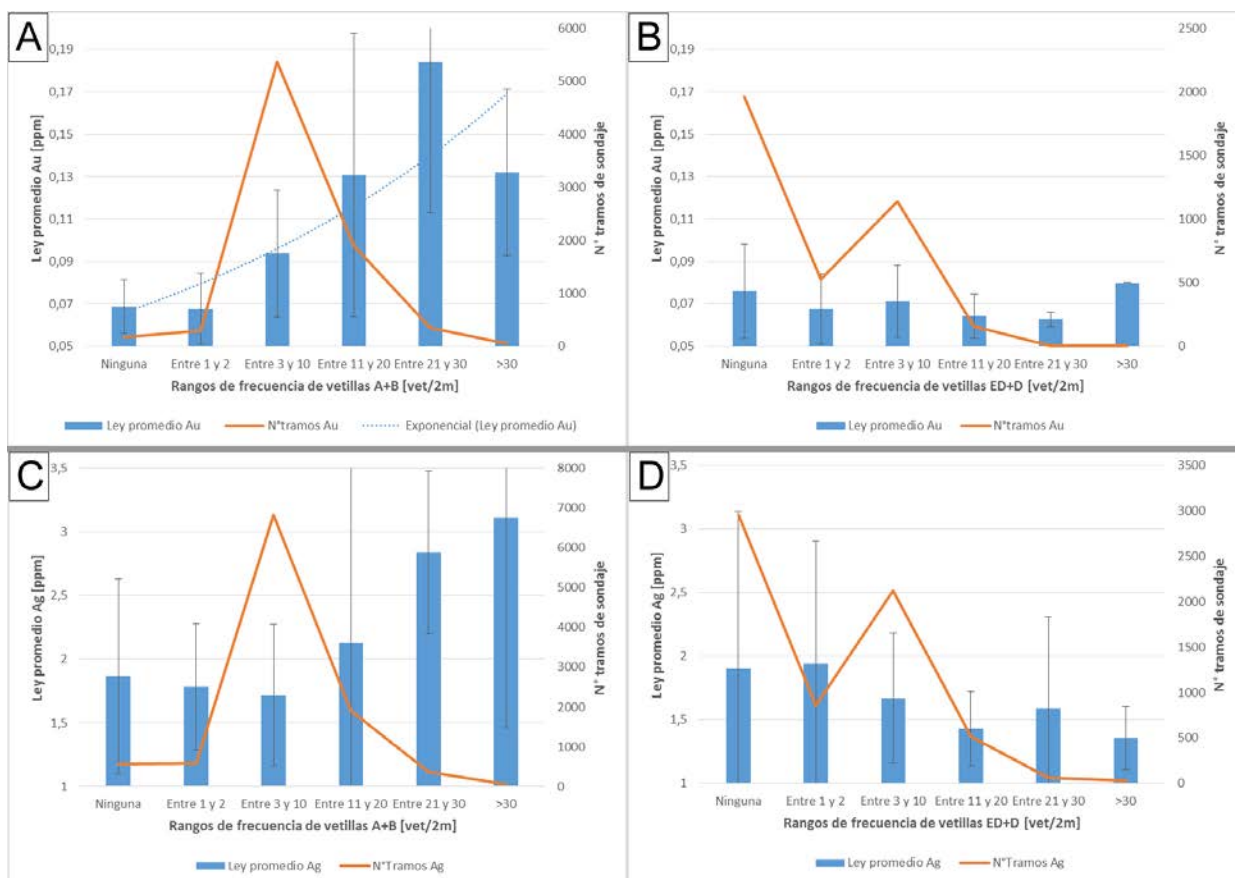


Figura 5.37: Ley promedio de Au-Ag respecto a frecuencia de vetillas en Los Pelambres-Frontera. Vetillas agrupadas en A+B y ED+D, aprovechando esta información a partir de BDI. Se han filtrado los datos a $Au \geq 0,05$ ppm y $Ag \geq 1$ ppm, para estudio exclusivo dentro de zonas anómalas. Se explicita número de datos de Au por rango de vetilla. A: vetillas A+B respecto Au. B: vetillas ED+D respecto Au. C: vetillas A+B respecto Ag. D: vetillas ED+D respecto Ag. Barras de error= 1 desviación estándar.

promedios de leyes de Au-Ag y rangos de vetillas, para dos situaciones: usando todos los datos de BDI, lo que representa Los Pelambres+Frontera completamente (Fig. 5.36); y filtrando los datos a $[Au] \geq 0,05$ ppm y $[Ag] \geq 1$ ppm, para observar el control de las vetillas exclusivamente dentro de las zonas anómalas de los elementos químicos en estudio (Fig. 5.37). Las agrupaciones de vetillas empleadas son A+B y ED+D.

Para Los Pelambres-Frontera, se ve un claro aumento de las leyes de Au y Ag al aumentar la intensidad de vetillas A+B (Fig. 5.36A y 5.36C, respectivamente), apoyando la observación hecha a partir del mapa de intensidad de vetillas. Por el contrario, al aumentar la intensidad de vetillas ED+D, las leyes de Au y Ag disminuyen sistemáticamente (Figs. 5.36B y 5.36D, respectivamente). Ahora, dentro de las zonas anómalas de Au y Ag (datos filtrados), el comportamiento de Au versus rangos de intensidad de vetillas A+B se conserva, es decir, al aumentar intensidad A+B, Au aumenta, a modo general (Fig. 5.37A). Para Ag, la correlación directa anterior se pierde (Fig. 5.37C). De especial interés es la relación con las vetillas ED+D: su intensidad parece no tener ningún control sobre leyes promedio de Au (Fig. 5.37B), y para Ag (Fig. 5.37D), muestra el mismo comportamiento que para datos no filtrados. Cabe notar que todas las interpretaciones antes mencionadas toman en cuenta el número de datos con los que se calcula la ley promedio de cada rango de intensidad de vetillas. Así, por ejemplo,

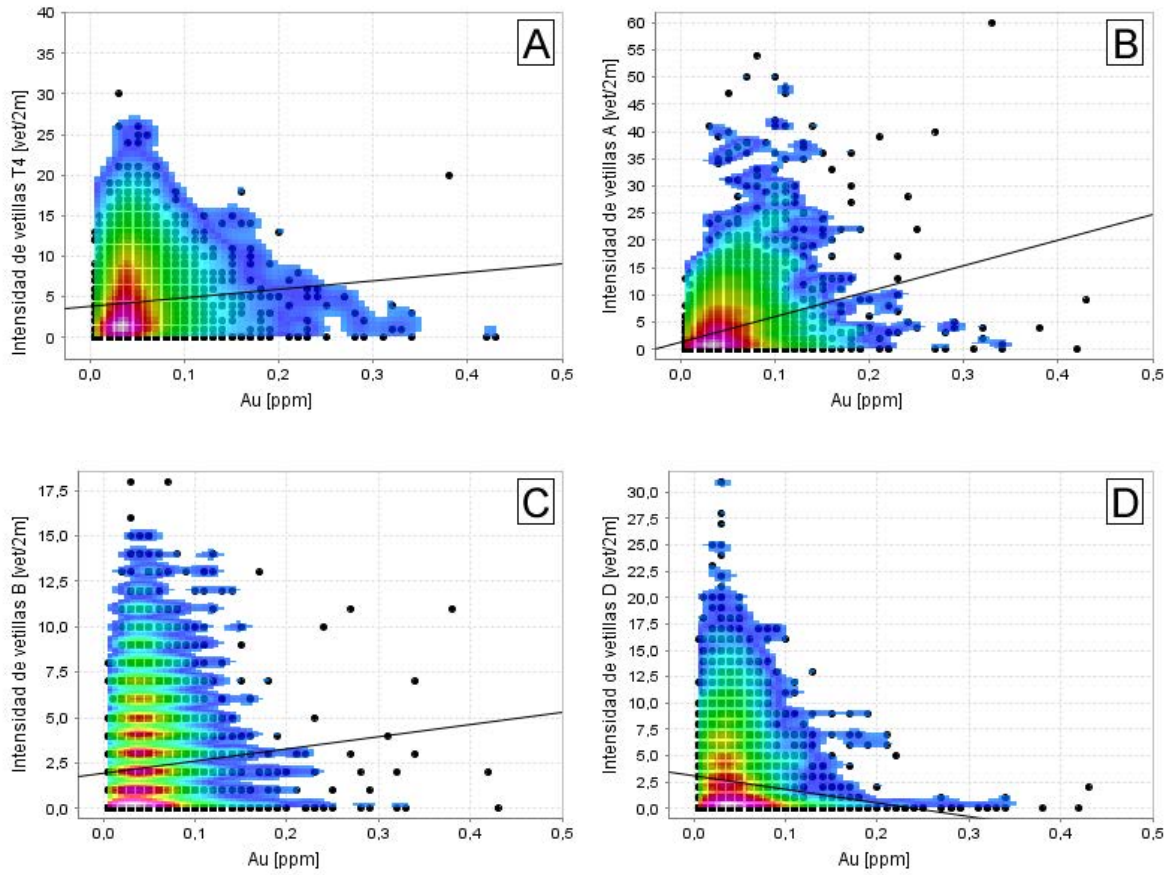


Figura 5.38: Diagramas de dispersión de Au versus número de vetillas, utilizando la información disponible en BDI, que coincide a modo general con ZAFM. A: vetillas T4. B: vetillas A. C: vetillas B. D: vetillas D.

se ignora el rango >30 de la Figura 5.36A.

La comparación entre el número absoluto de vetillas y los contenidos de oro de tramos (Fig. 5.38) se realiza con los datos disponibles en BDI, los que no comprenden todo Los Pelambres-Frontera. En particular, la mayoría de los datos de conteo de vetillas corresponden a la ZAFM, por lo que el análisis no es directamente extrapolable a otros sectores anómalos. Inmediatamente destaca la alta dispersión de los datos, y la falta de tendencias entre leyes de Au y número de vetillas. Sin embargo, existe una vestigial correlación positiva entre número de vetillas A y leyes de oro, observable en los datos de Au con más de 10 vetillas (Fig. 5.38B). La anterior es válido también para Ag (no mostrado). Es importante considerar el hecho que no todas las vetillas del mismo tipo son idénticas: en particular, no todas tienen el mismo tamaño, ni la misma cantidad de mineralización de sulfuros asociada, por lo que la ausencia de una tendencia, muestra a muestra, entre Au y número de vetillas es esperable.

5.7. Caracterización geológica de zonas anómalas de Au

Todas las observaciones realizadas en secciones precedentes deben ser puestas en contexto mediante caracterización geológica de las zonas anómalas definidas para Au. Para tal fin, se remapearon algunas características de tramos de testigos de sondajes diamantinos que pertenecen, en casi todos los casos, a zonas anómalas de Au (ver metodologías). Los sondajes de los cuales provienen los tramos de testigos estudiados se muestran en la Figura 5.39.

5.7.1. Frontera

Una de las características distintivas inmediatas de esta zona anómala, es que se encuentra emplazada, de forma importante, en lavas andesíticas (Fig. 5.40A), las cuales presentan distintos aspectos texturales: se muestran afaníticas, porfídicas (fenocristales de plagioclasa), brechosas (brecha volcánica), y con texturas que asemejan rocas corneas, donde destacan cristales de biotita visibles a ojo desnudo. Además de las lavas andesíticas, se presentan dioritas cuarcíferas, las cuales se ven en contacto tipo brecha con las lavas (brecha magmática, con clastos de andesita), lo cual es indicativo de intrusión; también se observan brechas magmático-hidrotermales, con matriz de Pórfido A en un caso. En dos sondajes de la zona, ocurre la intrusión tardimineral Pórfido Diorítico Tardío.

La zona anómala de Au Frontera presenta alteración hidrotermal potásica, de intensidad moderada, cuya asociación de minerales está fuertemente controlada por la roca huésped: en andesitas, la alteración corresponde a biotita + magnetita, con biotita de grano fino + magnetita diseminada en la masa fundamental de las lavas, y en menor medida, biotita en halos de vetillas. En diorita cuarcífera, la asociación es feldespato potásico + biotita, donde por tramos incluso domina el feldespato potásico. Es importante notar la ausencia casi total de magnetita en estos sectores, exceptuando algunos cúmulos escasos y vetillas de cuarzo + magnetita. Se puede constatar la presencia local de alteración cuarzo-sericítica débil sobreimpuesta.

La mineralización de sulfuros está exclusivamente ligada a vetillas, principalmente tipo A, T4 y B, donde las tipos A son las dominantes en este sentido. Las vetillas tipo B son muy escasas, y tienen poca mineralización de sulfuros, relativo a los otros tipos. En las vetillas T4, la mineralización ocurre, en mayor medida, en halos; y en las A, diseminada en el relleno. Existen otras vetillas menos frecuentes, pero que en algunos casos también tienen mineralización de sulfuros, como el caso de vetillas de turmalina + cuarzo + anhidrita + sericita + calcopirita. Es importante notar que este vetilleo, y mineralización asociada, también es observado en el Pórfido Diorítico Tardío, pero en menor medida que en otras litologías.

Al observar sondajes de Frontera, se observan cuatro horizontes bien caracterizados, referentes a mineralización, en general, de mayor a menor profundidad: zona primaria, zona de



Figura 5.39: Ubicación de sondajes empleados para realizar caracterización geológica de zonas anómalas de Au en Los Pelambres-Frontera, así como también sondajes empleados para toma de muestras de la sección de análisis químicos-mineralógicos.

enriquecimiento secundario parcial, zona de óxidos y zona lixiviada.

La zona primaria tiene la asociación de sulfuros bornita + calcopirita, donde las proporciones de abundancia entre ambos minerales son de entre 4 a 1 hasta 7 a 3, respectivamente, aunque existen tramos de sondajes donde se constata $cpy : bo = 9 : 1$, pero esto es local. La habitual dominancia de bornita por sobre calcopirita, en el primario, es otra característica única de esta zona anómala. Los sulfuros se encuentran en abundancias de entre 0,5 a 0,7% (volumen), y en el sector con $cpy > bo$ indicado arriba, el porcentaje de sulfuros llega hasta 1,5% - 2,0%. En algunas zonas se hallan vetillas D muy locales, con piritita, que aportan con la alteración cuarzo-sericítica mencionada anteriormente. La mineralización de molibdenita es muy escasa, y esto es notorio en las vetillas tipo B presentes, las cuales presentan menos molibdenita que las vetillas de Los Pelambres (ej: las de la ZAFM).

En la zona de enriquecimiento secundario, la misma asociación primaria de sulfuros es reemplazada parcialmente por calcosina (Fig. 5.40B), la cual se encuentra en pátinas sobre calcopirita y bornita. El grado de reemplazo es bajo, por lo que gran parte de los sulfuros primarios son preservados. Abundancias relativas entre calcopirita, bornita y calcosina en esta zona, son variables: se constató en MAM-01, proporción 3 : 5 : 2, respectivamente; y en MAM-02, 3 : 1 : 1, respectivamente.

Los sulfuros van desapareciendo progresivamente hacia la zona de óxidos y zona lixiviada (Fig. 5.40C), donde hay ocurrencias importantes de minerales oxidados verdes de Cu (malachita) en estructuras y en oquedades de la roca, las que aparecen especialmente a través de vetillas. En las zonas lixiviadas, se constata el mismo vetilleo de cuarzo de las demás zonas, pero con presencia de óxidos e hidróxidos de Fe (goethita + hematita) diseminados y en cúmulos dentro de las vetillas, lo cual sugiere que éstos son productos de la oxidación in-situ de sulfuros de Cu-Fe, posiblemente la misma asociación bornita + calcopirita observable a mayor profundidad. Los hidróxidos y óxidos de hierro le confieren a las rocas de esta zona un color marrón anaranjado, que se nota más en las vetillas de cuarzo.

5.7.2. Fondo Mina (ZAFM)

Esta zona está conformada, en cuanto a litología, por diorita cuarcífera principalmente, además presencia de brechas magmáticas, con matriz de Pórfido A y/o B, y brechas hidrotermales. En el caso del sondaje DAM-001, la matriz de la brecha magmática-hidrotermal presente corresponde a Pórfido B. En el caso de sondajes como DDH2590, se observa una brecha magmática con clastos de diorita cuarcífera, del stock Los Pelambres, y con matriz de Pórfido A.

La alteración hidrotermal en el Fondo Mina corresponde a alteración potásica moderada, con dominancia biotítica y con feldespato potásico subordinado. Este último ocurre como suturas y halos de algunas vetillas, y como reemplazo de plagioclasas de la roca huésped. La proporción de estos dos minerales de alteración es de aproximadamente 2 a 1, respectivamente, en los tramos donde feldespato potásico es más intenso. La textura original de la roca es preservada. En este sector también ocurre anhidrita moderada a intensa, que completa

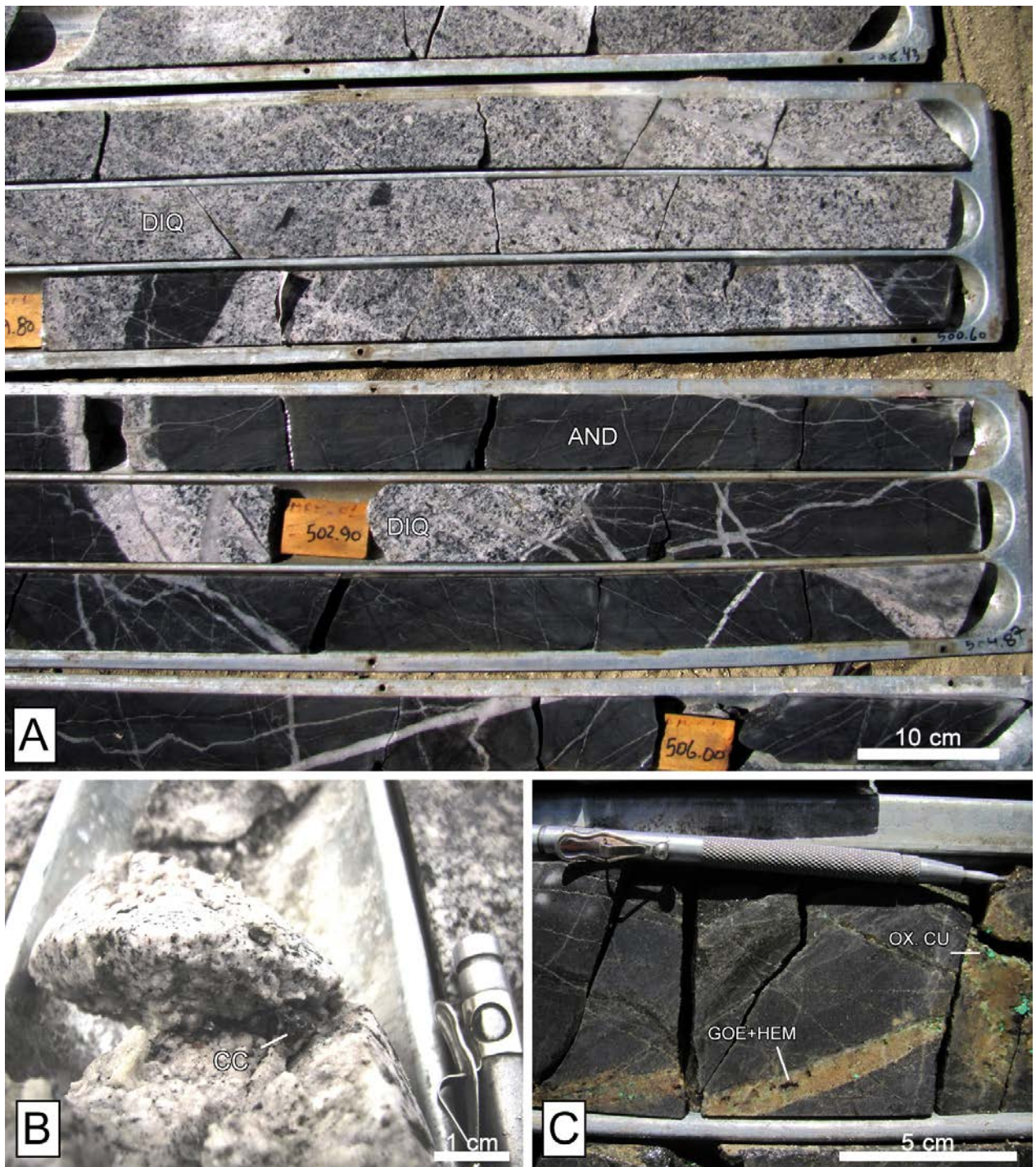


Figura 5.40: Testigos de sondaje Zona Anómala Frontera, diámetro HQ. A: Aspecto general de sector primario, donde se aprecian litologías dominantes: lavas andesíticas y diorita cuarcifera. B: Zona de enriquecimiento secundario, con mineralización de calcosina. C: Zona lixiviada-oxidada, con hematita y goethita reemplazando a sulfuros primarios, dentro de una vetilla de cuarzo; y minerales oxidados verdes de cobre, asociados a estructuras y oquedades de la roca.

la asociación mineral de la alteración potásica presente. Es importante destacar la ausencia de magnetita en la asociación de alteración, así como también su ausencia en la mineralización junto a sulfuros y en halos de vetillas T4. Localmente, y en forma muy escasa, ocurre sobreimposición de alteración sericítica, ligada a halos de vetillas tipo D.

Probablemente, la característica visual que más resalta en testigos de sondaje en Fondo Mina, es el stockwork de vetillas que posee, principalmente de tipo A (Fig. 5.41A). Cabe notar, al respecto, que localmente las vetillas cortan los testigos de sondaje en direcciones preferenciales, formando sets de ellas. En testigos, la frecuencia de vetillas A varía habitualmente entre 7 y 12 vetillas por metro de testigo. Estas vetillas representan entre el 80 %-85 % del vetilleo total, mientras que las tipo B representan entre un 10 y un 15 %, y el resto corresponde a vetillas tipo T4. El vetilleo tipo D es muy escaso. Existen zonas, como la del centro hidrotermal representado por el sondaje DAM-001, que presenta un poco más presencia de vetillas T4, pero sigue siendo subordinado con respecto a las tipo A.

La mineralización de la zona es hipógena, y corresponde a la asociación calcopirita + bornita \pm molibdenita, relación observada en paragénesis, en el relleno de algunas vetillas tipo A. El estilo de mineralización es mayoritariamente en vetillas (relleno en vetilla tipo A y halos de T4), y también diseminado en la roca huésped. El porcentaje de sulfuros (en volumen) en esta zona varía de 0,3 %-0,5 % a 0,7 %-1,0 % (según mapeos visuales), pero puede llegar a valores de 1,2 %-1,4 %, en DAM-001. La proporción de abundancia entre calcopirita, bornita y molibdenita es, en promedio, de 7 : 2 : 1 respectivamente (estimación visual), pero en tramos, se puede llegar a proporciones de abundancia de calcopirita a bornita de 3 a 2, o incluso de 1 a 1 en DAM-001, donde la abundancia de bornita se aprecia incluso diseminada en cúmulos biotíticos de aspecto marrón, de dimensiones centimétricas.

5.7.3. ZANE-E

Litológicamente está constituida por diorita cuarcífera, diorita cuarcífera porfídica, brechas magmáticas, con matriz de Pórfido A y/o Pórfido B; brechas hidrotermales, con matriz de cuarzo + anhidrita \pm feldespato potásico \pm mica verde \pm magnetita; y una variación textural de la diorita cuarcífera, Pórfido D. Los contactos entre Pórfido D y diorita cuarcífera son graduales, cuando éstos no son por falla.

Al igual que la ZAFM, la alteración hidrotermal dominante en el sector, es la alteración potásica: de biotita y feldespato potásico. En algunos sondajes se puede apreciar que el feldespato potásico es de mayor presencia a la biotita (ej.: sondaje DDH2661), pero la generalidad es que sean de abundancia similar. El estilo de la alteración potásica es selectivo (biotita en máficos; feldespato potásico en plagioclasas), en cúmulos de biotita, y en halos de vetillas A. Esta alteración no oblitera la roca en mayor grado.

Así como la ZAFM se caracteriza por intenso stockwork tipo A, la ZANE-E se diferencia del resto de las zonas anómalas de Au por presentar un vetilleo dominado por vetillas tipo T4, cuyos halos concentran la mayor parte de la mineralización de sulfuros del sector (Fig. 5.41B). En menor presencia, también ocurren vetillas A, y en menor cantidad aún, vetillas B. Estas dos últimas también aportan algo de mineralización de sulfuros (entre un 15 % y 30 % aproximadamente, estimación visual). Cabe notar que hay lugares en ZANE-E donde las vetillas T4 se comparan en cantidad a las vetillas A, al igual que la mineralización relacionada. En tramos de sondaje, los halos de las vetillas T4 obliteran la textura original de la roca.

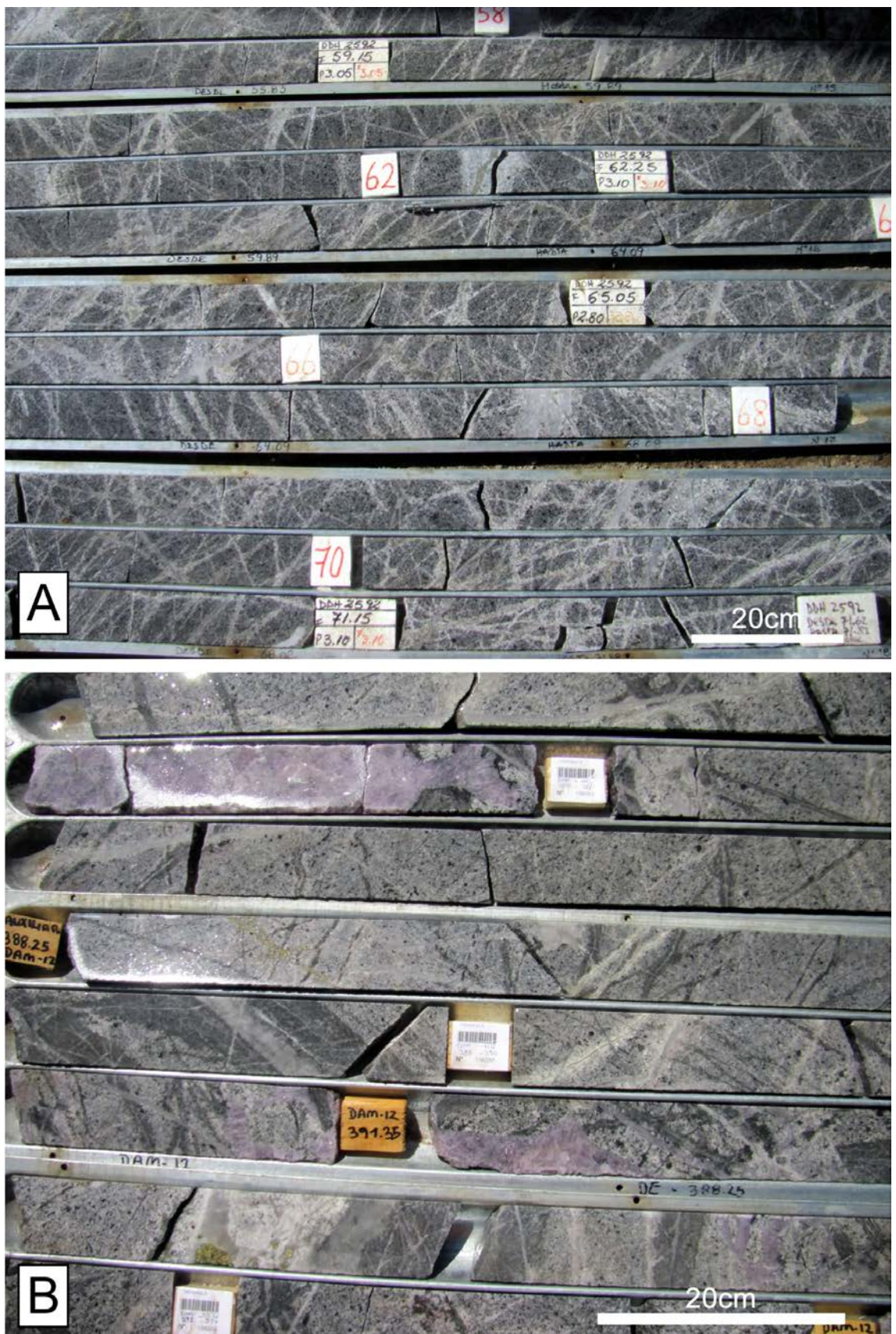


Figura 5.41: Aspecto general de testigos de sondaje de ZAFM y ZANE-E. A: aspecto general de ZAFM, con intenso stockwork tipo A. B: aspecto general de ZANE-E, con notorias vetillas tipo T4, y tramos de anhidrita intensa. A y B, testigos diámetro HQ.

La ZANE-E puede ser dividida, en términos de mineralización, en dos zonas: zona primaria y zona de enriquecimiento secundario parcial. La zona primaria se caracteriza por una asociación de sulfuros calcopirita + bornita, con trazas de molibdenita. Esta asociación está en conjunto con ocurrencias de magnetita (débil), en halos de vetillas T4. Además de estos minerales, se constata la ocurrencia de hematita especular diseminada en halos de vetillas T4 (ej: en sondajes DAM020 y DAM016). Las proporciones de abundancia habituales entre calcopirita y bornita son de 7 a 3 aprox., respectivamente, pero en tramos de sondajes se aprecian relaciones desde 9 a 1 hasta 1 a 1. El porcentaje de sulfuros varía de entre 0,3 % a 0,7 %-1,0 %. La zona de enriquecimiento secundario parcial tiene la asociación mineralógica calcopirita + bornita + calcosina \pm magnetita, con proporciones generales de cpy : bo : cc = 3 : 1 : 1. Acá, la calcosina está en pátinas sobre calcopirita y bornita, insinuando reemplazo parcial por estos últimos. La magnetita se encuentra igual que en la zona primaria.

5.7.4. ZASE

El sector presenta una diversidad litológica comparable a la de Frontera, ya que se reconoce diorita cuarcífera (stock Los Pelambres), brechas magmático-hidrotermales con matriz de Pórfido A, y en algunas zonas, lavas andesíticas, en lo que pudiera corresponder a una relación estilo roof-pendant de estas lavas con el stock Los Pelambres. Basándose en el modelo litológico de Los Pelambres-Frontera, es probable que estas lavas correspondan a la Formación Pachón.

En cuanto a alteración hidrotermal, esta zona tiene una alteración cuarzo-sericítica (Fig. 5.42A), que en general, es de mayor intensidad que en las demás zonas anómalas definidas. La alteración sericítica se superpone a alteración potásica. Dentro de ZASE, hay zonas en las que la intensidad de la alteración sericítica es menor a la de la potásica, en cuanto a minerales de alteración, y en estos casos, se encuentra localizada en halos de vetillas D (caso observable en el sondaje DDH2574; Fig. 5.42B); y existen otros sectores donde la alteración sericítica es pervasiva y oblitera la textura original de la roca (ej: en sondaje DDH3). En este último caso, la alteración potásica inicial solo es evidenciada por cúmulos de biotita remanentes, mientras que donde se ha preservado la textura de la roca, se ven relaciones de alteración en que la proporción entre biotita y feldespato potásico es de hasta 2 a 1, respectivamente. La ocurrencia de magnetita, en vetillas, cúmulos y diseminada, completa la asociación de minerales de alteración potásica. Magnetita diseminada es característica de las lavas andesíticas, en donde se observa con una intensidad mayor al resto de las rocas, por lo que se evidencia control litológico en este sentido, al igual que en Frontera.

La ZASE, al igual que todas las zonas anómalas de Au definidas, es caracterizada en primera instancia por un notorio vetilleo en varias direcciones, tipo stockwork. Los principales tipos de vetillas observadas son T4 y tipo A, con las primeras ligeramente más abundantes que las segundas. También se constata la ocurrencia de vetillas de mica verde, vetillas tipo B, tipo D y vetillas de magnetita (Fig. 5.42B), pero con una abundancia menor a T4 y tipo A.

La asociación de sulfuros de interés de la ZASE corresponde a una asociación supérgena,

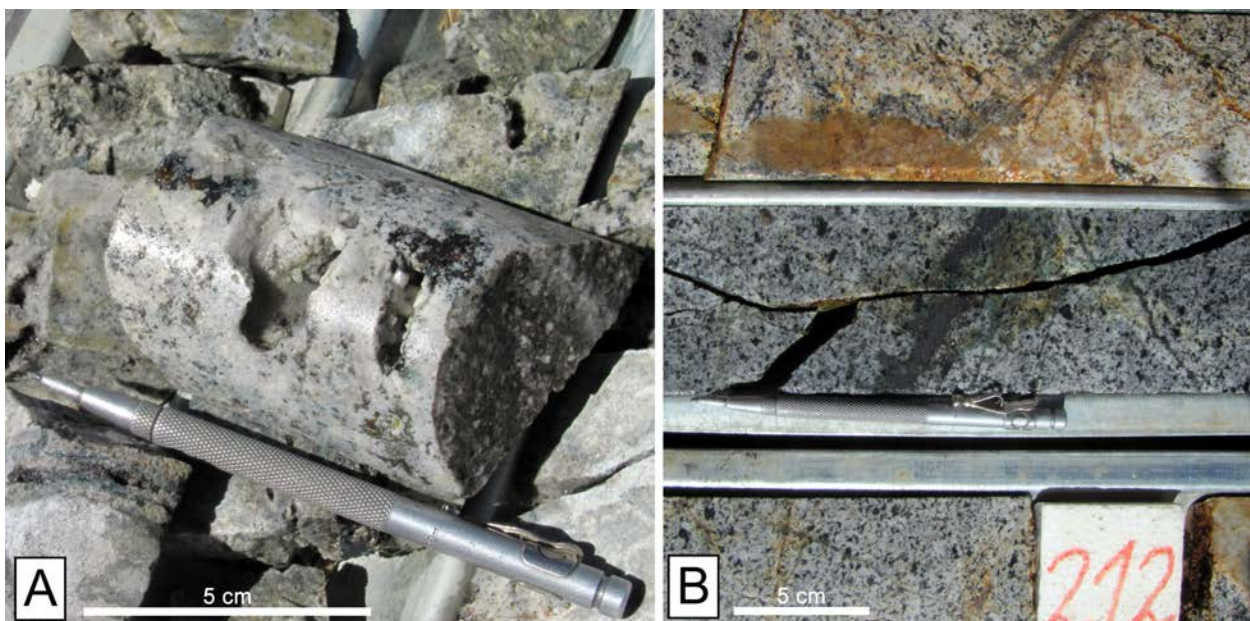


Figura 5.42: Testigos de sondaje ZASE, diámetro HQ. A: cúmulos de calcopirita + covelina + calcosina, en roca con alteración cuarzo-sericítica. B: vetilla de magnetita. Roca con alteración potásica.

de enriquecimiento secundario parcial, y con sectores parcialmente lixiviados. El enriquecimiento secundario se caracteriza por un reemplazo parcial de sulfuros primarios (calcopirita y bornita, en vetillas) por calcosina y covelina, minerales que se encuentran en pátinas sobre los sulfuros que son reemplazados (Fig. 5.42A). Los sectores parcialmente lixiviados tienen un aspecto “marrón oxidado”, por presencia de parches de limonitas (goethita y hematita) que probablemente son resultado de la oxidación de una parte de los sulfuros originalmente presentes en la roca. La asociación de sulfuros general de la ZASE es calcopirita + calcosina + covelina ± pirita, con bornita en trazas. Las proporciones de los minerales antes nombrados son muy variables, dependiendo del grado de enriquecimiento secundario de la roca, y de la intensidad del vetilleo tipo D, pero al menos, se observa una clara dominancia de calcopirita por sobre bornita.

5.7.5. Otras zonas anómalas

Aparte de las zonas definidas y descritas antes, existen muchas otras ocurrencias de oro anómalo, de menor volumen, que están repartidas en las inmediaciones de estos sectores. Este hecho se puede visualizar de buena forma al norte de ZANE-E. Para considerar este tipo de ocurrencias, se describe un tramo de testigo de sondaje perteneciente al norte de ZANE-E (DDH2733: desde 148m hasta 152m; Fig. 5.43A), que intersecta el volumen Au > 0,1 ppm, y del cual se tiene información sobre alto contenido en As (~0,5 % peso).

La litología en este tramo estudiado está prácticamente obliterada por la alteración hidrotermal presente, de asociación mineralógica cuarzo-sericita-arcillas, pero se evidencia por partes que se trata de diorita cuarcífera del stock Los Pelambres. La alteración de arcillas se intensifica en las estructuras presentes, siendo muy abundante en zonas de fracturamiento

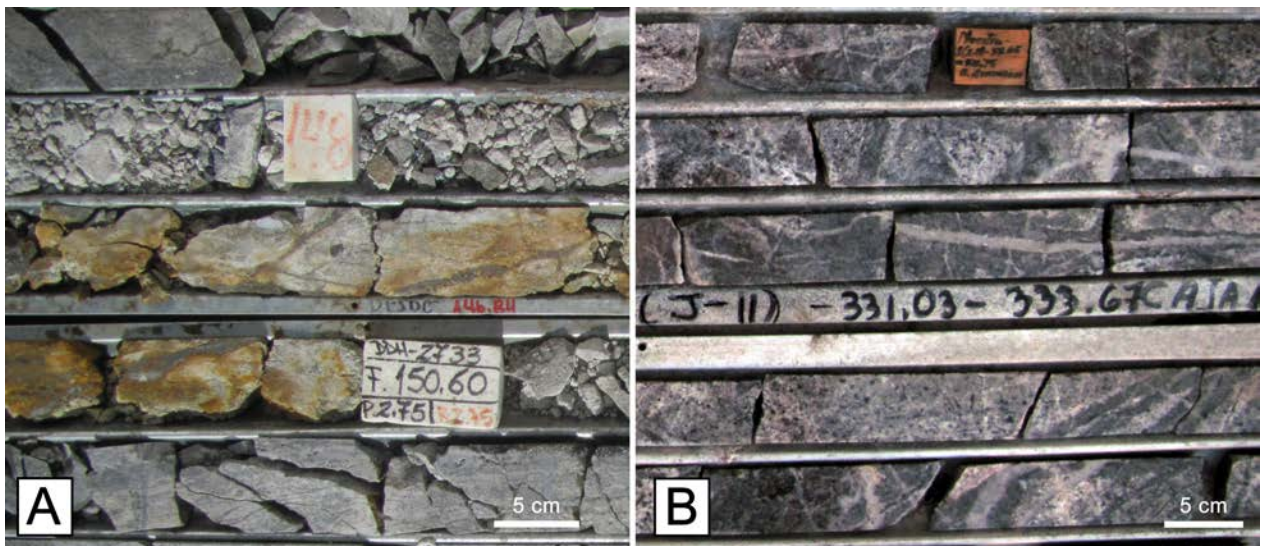


Figura 5.43: Aspecto de algunas rocas no pertenecientes a las cuatro zonas anómalas definidas para oro. A: Testigos de roca de sondaje DDH2733 (diámetro HQ), con alto As y Au. Destacan: zona fracturada y zona piritosa con hidróxidos de hierro. B: Aspecto general de rocas del sondaje DDH1 (diámetro NQ), donde se aprecia mayoritariamente vetillas T4 con prominentes halos.

intenso.

El tipo de vetillas observado es tipo D, con amplios halos sericíticos, y mineralización de pirita asociada, parcialmente oxidada en la zona de fractura (evidenciado por presencia de hidróxidos de hierro). Diseminada en la roca se puede encontrar calcopirita, con un remplazo parcial de calcosina (pátinas). En zonas más fracturadas, es posible hallar hematita especular masiva, junto a pirita, calcosina y covelina. Los altos contenidos de As pueden estar relacionados a pirita arsenical, o sulfosales de cobre y arsénico, como tetraedrita-tenantita, presente en bajas cantidades en las zonas de fractura (ver sección de resultados de análisis químicos y mineralógicos).

Probablemente la alta intensidad de la alteración en el tramo observado, y el tipo de alteración, sea debido a un control de las estructuras que afectan la roca del tramo, y estas pueden haber ejercido un control en la depositación de As y Au.

5.7.6. Zonas con oro bajo y alta bornita

Como la presencia de bornita es casi transversal a los horizontes hipógenos de las cuatro zonas anómalas de oro, se debe notar que existen partes de Los Pelambres y Frontera que tienen mineralización importante de bornita (“bornita alta”), pero valores de concentración de oro bajo 0,1 ppm. Por esto, es de relevancia la caracterización geológica de tramos de sondaje que cumplan esta condición. Así, se escogieron dos tramos de dos sondajes con bornita alta y bajo oro (DDH10 y DDH1; Fig. 5.43B) para su estudio, ubicados, a grandes rasgos, entre ZAFM y ZANE-E.

Se pudo constatar que litológicamente son igual de variados que otras zonas, por ejemplo, como la ZANE-E. Las litologías presentes son diorita cuarcífera (stock Los Pelambres), Pórfidos A y B, además de brechas magmático-hidrotermales. La alteración hidrotermal es del tipo potásica, principalmente de biotita, pero con ocurrencia de feldespatos potásicos, principalmente en halos de vetillas A; y con algunas ocurrencias de magnetita en cúmulos y diseminada. El estilo de alteración es similar que los descritos para diorita cuarcífera.

El tipo y abundancia de vetillas no es igual en los dos sondajes estudiados: en DDH1 se constata dominancia de vetillas T4, las cuales albergan casi toda la mineralización de sulfuros presente, en sus halos, mientras que las vetillas tipo A son escasas, pero también aportan a la mineralización total de sulfuros.

El sondaje DDH10, a simple vista, se parece a los de ZAFM, ya que también se caracteriza por stockwork de vetillas tipo A (además de vetillas tipo B y T4), con frecuencias de vetillas similares. Sin embargo, en DDH10, las vetillas tienen considerablemente menos sulfuros asociados (hasta 0,6 % volumen) que en ZAFM.

La asociación de sulfuros de DDH1 y DDH10 es calcopirita + bornita \pm molibdenita, con clara dominancia de la primera sobre la segunda, y con molibdenita muy inferior a calcopirita y bornita. El porcentaje de sulfuros es muy variable, completamente relacionado a la ocurrencia de vetillas, pero puede alcanzar 0,8 – 1,0 % en volumen. Las proporciones de calcopirita a bornita también son variables, con zonas de calcopirita:bornita = 9:1, y otras 1:1.

En conclusión, no son claras las diferencias, en cuanto a características geológicas, que existen entre rocas con Au alto y bornita alta, y rocas con Au bajo y bornita alta.

5.8. Análisis químicos y mineralógicos

La última etapa del estudio sobre Au en Los Pelambres-Frontera es el programa de muestreo y análisis químicos y mineralógicos, orientada exclusivamente al estudio de la ocurrencia de oro en las zonas anómalas antes definidas. La elección de las muestras recién puede ser hecha una vez revisada la distribución espacial de oro y características geológicas de cada zona anómala, como es hecho en las secciones anteriores.

El programa de muestreo y análisis químicos y mineralógicos, como es explicado en la sección de metodologías, tiene dos líneas de trabajo: separación de minerales de interés para determinación de leyes de Au en cada uno de ellos (muestras del protocolo AU1, ver metodologías); y estudio de partículas minerales de Au (muestras del protocolo AU2, ver metodologías).

Para el caso de la separación de minerales (sulfuros + magnetita) se han obtenido 23 muestras: casi todas provenientes de distintas zonas anómalas de Los Pelambres-Frontera, a excepción de 2 de estas muestras que provienen de zonas de bornita alta y oro bajo, que

se encuentra entre ZAFM y ZANE-E, en Los Pelambres. Detalle sobre todas las muestras obtenidas, proveniencia (respecto a sondaje y zona anómala de Au), tramo de sondaje y minerales de interés a separar en cada una de ellas, se encuentra en la Tabla 5.4. La ubicación de estos sondajes se encuentra en la Figura 5.39 de la sección de caracterización geológica de zonas anómalas.

Es importante notar que muestras de la misma zona anómala pueden presentar mineralización distinta, por ejemplo, una mitad de las muestras de Frontera poseen exclusivamente mineralización hipógena, mientras que en la otra mitad se constata presencia de algún grado de enriquecimiento secundario, con calcosina en pátinas. Por lo anterior, no se separan los mismos minerales de interés en todas las muestras de la misma zona anómala.

El protocolo de preparación para las muestras de separación de minerales (protocolo AU1) contempla la creación de submuestras para análisis químicos de Au y Ag en roca total, así como también un análisis mineralógico modal de cada muestra. Lo anterior tiene por objetivo saber cuál es la abundancia relativa de cada fase separada, en su respectiva muestra. Sumado al conocimiento en leyes de Au de cada fase separada, se podría estimar la ley que debería tener cada muestra si Au solo estuviera ligado a los minerales separados. Esta estimación posteriormente se compara a las concentraciones de Au analizadas en roca total, de lo que se pueden hacer estimaciones gruesas del Au que no está ligado a los minerales analizados. En adición, se realiza litogeoquímica en cada muestra, con la finalidad de examinar posibles vínculos entre Au y otros elementos. El detalle completo de los resultados de análisis químicos se encuentra en el Anexo E.

Para el estudio de ocurrencia de partículas de oro se han preparado dos muestras compuestas de dos zonas anómalas: ZAFM y Frontera, según procedimiento explicitado en metodologías. El detalle de las dos muestras para este estudio se muestra en la Tabla 5.5. Como visto en la sección de caracterización geológica de zonas anómalas, ZAFM es fundamentalmente hipógena, por lo que solo se han escogido sectores del mismo tipo en Frontera, con fines de comparación entre zonas anómalas, y enfoque a este tipo de mineralización.

5.8.1. Estudio de separados de minerales

Las leyes de Au y Ag de las 23 muestras, leyes de otros elementos de interés, y composición mineralógica modal (de minerales de interés) se muestran en la Tabla 5.6. De las 23 muestras para este estudio, se tienen los resultados de leyes de 9 separados de sulfuros, correspondientes de 3 muestras. En la Tabla 5.7 se indican las 3 muestras, los minerales que se lograron obtener de ellas, y las leyes de Au de cada separado de minerales. El control de calidad de estos análisis se puede encontrar en el Anexo C del presente trabajo.

A pesar de que el muestreo se hace dirigido a zonas anómalas de Au (a excepción de zonas de “Au bajo – bornita alta”), tres muestras de ZAFM y una de ZANE-E corresponden a Au bajo. En el caso de ZAFM, el muestreo se hizo en tramos en los que se sabía de antemano que existían leyes altas de Au, lo que quiere decir que la variabilidad en leyes de Au es muy alta, probablemente provocado por efecto pepita; o bien (menos probable): el proceso de

Tabla 5.4: Muestras para separación de minerales - Protocolo AU1

ID MUESTRA	SONDAJE	DESDE [m]	HASTA [m]	MINERALES A SEPARAR											ZONA ANÓMALA
				cpy	bo	cc	cv	mo	mgt	py					
NRM-01	MAM001	216,0	220,0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
NRM-02	MAM001	498,0	502,0	✓	✓										
NRM-03	MAM002	200,0	204,0	✓	✓	✓									
NRM-04	MAM002	323,0	327,0	✓	✓										
NRM-05	MAM003	292,0	296,0	✓	✓	✓									
NRM-06	MAM003	478,0	486,0	✓	✓									Frntera	
NRM-07	MAM012	379,0	383,0	✓	✓										
NRM-08	MAM025	453,0	457,0	✓	✓										
NRM-09	DAM001	160,0	164,0	✓	✓			✓							
NRM-10	DDH2520	58,0	62,0	✓	✓			✓							
NRM-11	DDH2590	49,0	53,0	✓	✓			✓						ZAFM	
NRM-12	DDH2591	83,0	86,0	✓	✓			✓							
NRM-13	DDH2592	48,5	52,5	✓	✓			✓							
NRM-14	DDH2574	210,0	214,0	✓	✓			✓			✓	✓			
NRM-15	DDH3	99,0	103,0	✓	✓			✓						ZASE	
NRM-16	DAM012	388,0	392,0	✓	✓							✓			
NRM-17	DAM016	160,0	164,0	✓	✓							✓			
NRM-18	DAM020	126,0	130,0	✓	✓							✓			
NRM-19	DAM020	362,0	366,0	✓	✓							✓		ZANE-E	
NRM-20	DDH2661	400,0	404,0	✓	✓							✓			
NRM-31	DDH10	355,0	365,0	✓	✓									Au bajo - bo alta	
NRM-32	DDH1	330,0	340,0	✓	✓										
NRM-33	DDH2733	148,0	153,0	✓	✓			✓				✓		Au alto - As alto	

Tabla 5.5: Muestras para estudio de partículas de Au-Ag - Protocolo AU2

ID MUESTRA	SONDAJE	DESDE [m]	HASTA [m]	ZONA ANÓMALA
NRM-21	MAM001	504,0	505,5	Frontera
	MAM002	327,0	328,5	
	MAM003	486,0	489,0	
	MAM012	383,0	384,5	
	MAM025	457,0	458,5	
NRM-22	DAM001	166,0	167,5	ZAFM
	DDH2520	62,0	63,5	
	DDH2590	47,5	49,0	
	DDH2591	81,5	83,0	
	DDH2592	47,0	48,5	

análisis de Au de ZAFM, cuyos resultados fueron incluidos en la BDN, tuvo fallos en alguna etapa. La primera alternativa es apoyada por la gran variabilidad de leyes de Au entre tramos adyacentes (consecutivos) de sondeo.

Análisis de correlación bivariable entre leyes de Au y leyes de otros elementos químicos

Se estudia vínculo directo entre leyes de Au, y leyes de Ag, Cu, Mo y As. Se constata leve correlación positiva entre Au y Ag (Fig. 5.44A), correlación negativa entre Au y Mo, y nubes de alta dispersión entre Au-Cu y Au-As (sin correlación). Correlación entre Au y Ag es justificada en parte por la ocurrencia probada de Ag junto a Au en partículas de Au nativo y electrum (ver más adelante). Variabilidad también es esperable, dada la ocurrencia probada de partículas de Ag nativa (100 % Ag) y la proporción no constante entre Au y Ag en partículas de Au nativo-electrum.

Análisis de correlación bivariable entre leyes de Au y abundancias de sulfuros

Se estudia vínculo directo entre leyes de Au, y abundancias de calcopirita, bornita, entre otros. Destaca la correlación inversa entre Au y contenido de calcopirita de la muestra (de modo general, con alta dispersión; Fig. 5.44B), y la falta de correlación entre Au y abundancia de bornita en la muestra (Fig. 5.44C). Lo anterior es notable debido a que se ha observado la asociación bornita-oro en Los Pelambres-Frontera. Como se ha observado también una cierta correlación entre el oro y la zona mineral $bo \geq cpy$ y $cpy > bo \geq py$, se hace análisis de correlación bivariable entre Au y razones entre abundancias de ciertos minerales, en particular bo/cpy y py/cpy , aprovechando el hecho que todas las muestras presentaron contenidos de cpy superiores a 0. Se insinúa una correlación positiva entre Au y bo/cpy (Fig. 5.44D), y ninguna entre Au y py/cpy .

Haciendo revisión de la BDN, se constata que para Frontera y Los Pelambres, por separado, la mejor aproximación a las leyes de Au pareciera ser mediante abundancia de bornita: mejor que en el caso de bornita/calcopirita. Cabe mencionar que, en BDN, el soporte mues-

Tabla 5.6: Resultados de análisis químicos y de composición mineralógica de 23 muestras del presente estudio. cpy: calcosina; cc: calcosina; dg: digenita; cv: covelina; bo: bornita; py: pirita; moly: molibdenita; mgt: magnetita.

ID MUESTRA	Au [ppm]	Ag [ppm]	Cu [wt. %]	Mo [ppm]	As [ppm]	cpy (%)	cc (%)	dg (%)	cv (%)	bo (%)	py (%)	moly (%)	mgt (%)	ZONA ANÓMALA
NRM01	0,311	3,1	0,461	14	<5	0,02	0,24	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,23	
NRM02	0,207	4,2	0,950	29	24	0,64	0,15	0,34	0,00	0,42	0,03	0,00	0,00	
NRM03	0,168	2,7	0,632	18	<5	0,28	0,21	0,11	0,00	0,51	0,02	0,00	0,10	Frontera
NRM04	0,421	5,4	1,193	14	65	1,40	0,08	0,47	0,00	0,56	0,03	0,00	0,95	
NRM05	0,252	4,4	1,100	46	10	2,22	0,06	0,02	0,00	0,58	0,06	0,00	0,28	
NRM06	0,172	3,1	0,621	17	9	0,63	0,04	0,13	0,00	0,42	0,00	0,00	0,03	
NRM07	0,220	3,1	0,592	67	<5	0,25	0,00	0,01	0,00	0,73	0,00	0,00	0,07	
NRM08	0,201	3,6	0,676	35	6	0,42	0,01	0,00	0,00	0,89	0,01	0,00	0,02	
NRM09	0,109	5,5	1,520	929	14	1,57	0,00	0,01	0,00	1,47	0,02	0,16	0,06	
NRM10	0,080	4,3	1,366	715	16	1,71	0,00	0,00	0,00	1,42	0,01	0,10	0,10	
NRM11	0,134	4,4	0,871	180	7	0,94	0,00	0,00	0,00	0,90	0,00	0,01	0,03	ZAFM
NRM12	0,035	2,0	0,559	627	5	1,16	0,01	0,00	0,00	0,27	0,00	0,08	0,01	
NRM13	0,077	3,5	0,827	335	9	1,02	0,00	0,00	0,00	0,76	0,07	0,03	0,00	
NRM14	0,123	2,5	0,272	63	12	0,26	0,01	0,20	0,02	0,04	0,16	0,00	0,49	ZASE
NRM15	0,130	5,9	2,083	327	31	1,41	0,03	0,99	0,05	1,05	0,02	0,03	0,08	
NRM16	0,169	7,4	1,545	56	13	1,61	0,01	0,02	0,00	1,35	0,00	0,01	0,03	
NRM17	0,157	4,8	1,046	120	31	1,24	0,01	0,01	0,00	0,95	0,00	0,00	0,18	
NRM18	0,066	2,6	0,680	46	14	1,86	0,00	0,04	0,07	0,07	0,06	0,00	0,01	ZANE-E
NRM19	0,144	4,5	0,765	24	8	1,49	0,01	0,02	0,00	0,40	0,00	0,00	0,11	
NRM20	0,119	3,5	0,826	16	12	0,83	0,01	0,25	0,01	0,58	0,00	0,00	0,12	
NRM31	0,022	1,3	0,791	85	8	1,82	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,01	0,13	Au bajo - bo alta
NRM32	0,069	2,8	0,711	175	15	0,80	0,00	0,01	0,00	0,66	0,00	0,01	0,11	
NRM33	0,100	10,2	2,441	1176	5536	1,58	0,00	1,02	0,02	0,00	9,10	0,19	0,00	Au alto - As alto

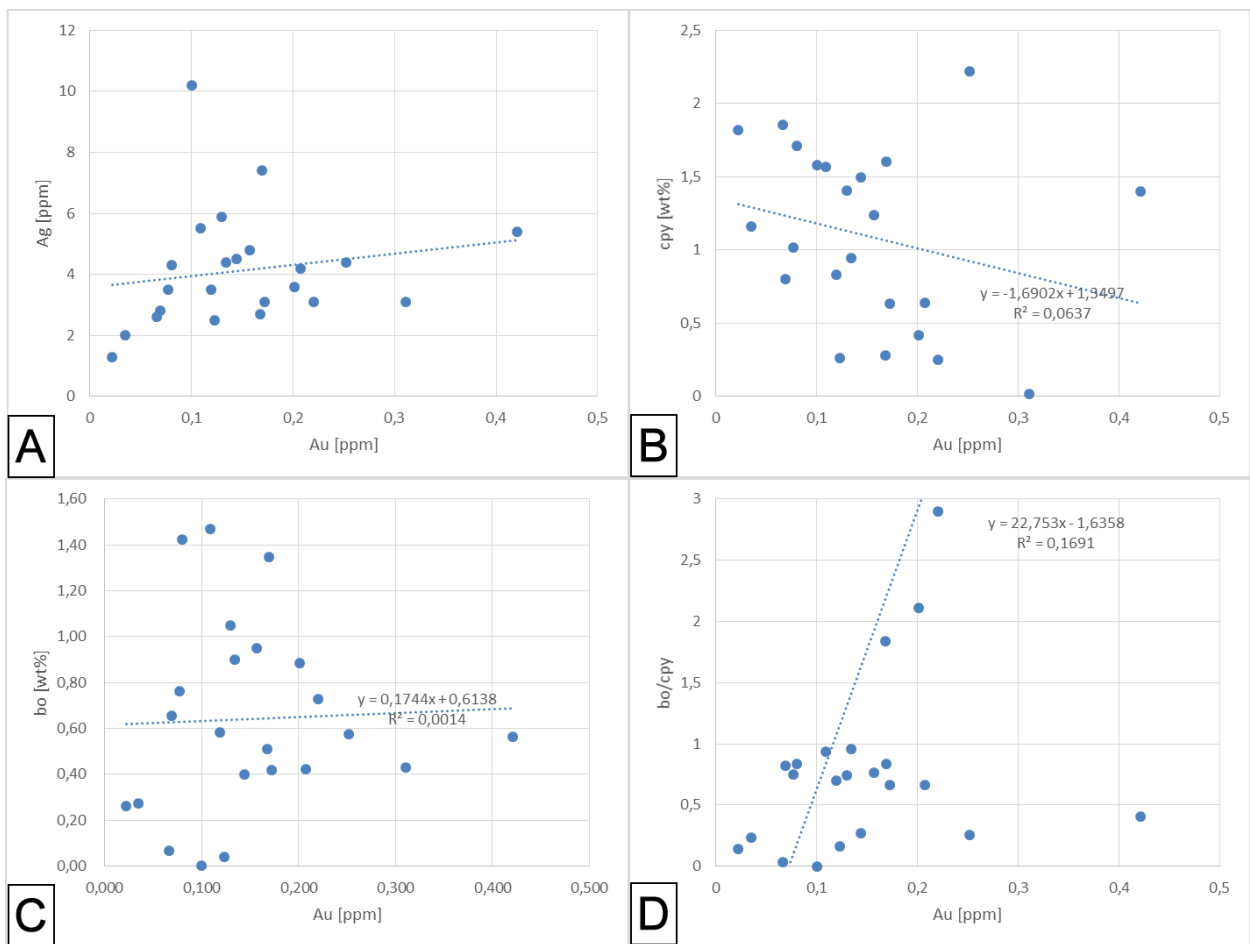


Figura 5.44: Gráficos de análisis de correlación bivariable entre concentraciones de Au y otros elementos químicos o abundancias minerales. Datos obtenidos en este estudio. A: Au-Ag. B: Au – calcopirita. C: Au – bornita. D: Au – bornita/calcopirita.

tral para las briquetas no es el mismo que el de análisis de Au, mientras que en el presente trabajo si lo es.

Análisis de leyes de Au en separados de minerales

Las leyes de Au de los nueve separados de minerales se presentan en la Tabla 5.7. En la Tabla se presenta como “Au estimado” la ley de Au que debiera tener la muestra si el Au de la misma estuviera asociado exclusivamente a los minerales analizados, mientras que “Au analizado” se refiere a los resultados presentados en la Tabla 5.6.

Frontera y ZAFM

En las zonas de mineralización primaria estudiadas, de asociación principal bornita-calcopirita, destaca el hecho que bornita es el mineral que mayores leyes de Au tiene, leyes que son entre 5 a 7 veces más altas que las obtenidas en calcopirita. Por esto, se comprueba que bornita es el principal mineral asociado a Au en estas zonas anómalas, tanto en Los

Tabla 5.7: Leyes de Au de separados de minerales. Se calcula Au que debería tener cada muestra si los minerales analizados dieran cuenta de todo el oro (“Au estimado”), y se contrasta con leyes de Au (roca total) analizadas por cada muestra (“Au analizado”), resultados mostrados en la Tabla 5.6

Muestra	Au [ppm]	Au estimado [ppm]	Au analizado [ppm]	Diferencia	Zona anómala
NRM-02 (bornita)	7,7				
NRM-02 (calcopirita)	1,1	0,039	0,207	81 %	Frontera
NRM-02 (magnetita)	0,3				
NRM-09 (bornita)	2,0				
NRM-09 (calcopirita)	0,4	0,037	0,109	66 %	ZAFM
NRM-09 (molibdenita)	0,9				
NRM-33 (pirita)	<0.3				
NRM-33 (calcosina)	1,1	0,039	0,100	61 %	Alto As
NRM-33 (covelina)	0,6				

Pelambres como en Frontera. Calcopirita también presenta leyes de Au que pueden llegar a ser importantes en muestras con altos contenidos de la misma, y con características de mineralización similares.

Es importante señalar que las dos leyes de bornita obtenidas en este estudio son muy diferentes entre sí, lo que señala que bornita no tiene leyes constantes de Au a escala de Los Pelambres-Frontera. Esto puede deberse a heterogeneidades de Au en bornita (por ejemplo, por ocurrencia de partículas minerales de Au asociadas a ciertos cristales de bornita), o por mayores leyes de Au que se encuentran, a modo general, en Frontera.

En Frontera, también fue separada magnetita, y en ZAFM, molibdenita. Ambos minerales presentaron leyes de Au sobre el límite de detección. En el capítulo de discusiones se exploran las formas de ocurrencia de Au en estos minerales.

Las leyes de Au de los minerales separados no alcanzan a dar cuenta de todo el oro hallado en cada muestra (Tabla 5.7). Es poco probable que exista una asociación mineral importante de oro con otro mineral no considerado en estas muestras, por lo que esta diferencia se atribuye fundamentalmente a heterogeneidades de Au en las muestras analizadas: ya sea por ocurrencia de partículas de oro nativo (o de electrum) asociadas a cristales de bornita, calcopirita, molibdenita o magnetita incorporados en las muestras que se analizaron por Au en roca total, o por la ocurrencia de partículas de Au nativo libre o ocluidas en ganga. En el capítulo de discusiones se tratan los tipos de ocurrencia de Au según ambientes de mineralización.

Zona de alto Au - alto As

El estudio de separación de minerales de muestras con alto Au y alto As apunta a zonas de mineralización secundaria, con asociaciones diferentes a bornita-calcopirita, en específico, con mineralización relacionada a As. La separación de sulfuros de ZASE pudo obtener separados de calcosina, covelina y pirita solamente, pero no de tetraedrita-tenantita ni esfalerita, minerales que fueron hallados en la muestra, pero que no están en cantidades suficientes para ser analizados por Au.

Sorpresivamente, pirita tiene leyes de Au bajo límite de detección, por lo que se descarta como la asociación más importante del oro, en este caso. Los resultados indican que calcosina y covelina tienen las leyes más importantes de Au para muestras de asociación pirita-calcosina-covelina. Sin embargo, los minerales antes nombrados no dan cuenta de todo el oro de la muestra (Tabla 5.7). Probablemente, sulfosales de Cu tienen algún grado de asociación con oro (que explicaría tendencia positiva en gráficos Au - As, de la sección de análisis de correlación bivariable de Au, de BDI), o bien en este caso también ocurren heterogeneidades de contenidos de Au (partículas de Au nativo o de electrum) en los minerales asociados a oro.

Respecto de la importancia de la pirita como mineral asociado a Au, ésta no debe ser descartada completamente, debido a que se ha detectado asociación con partículas de electrum, caso presentado más adelante.

Análisis de correlación bivariable para leyes de Ag

Los datos de la Tabla 5.6 también permiten un estudio de relación entre leyes de Ag y otras variables. Con respecto de otros elementos químicos, además de la correlación positiva entre Au y Ag (de dispersión moderada), destaca una correlación positiva excelente entre Ag y Cu (Fig. 5.45). Ag-Mo y Ag-As no muestran correlación alguna.

Del análisis de correlación bivariable entre Ag y composición mineralógica modal de las muestras, es posible detectar una buena correlación positiva entre el contenido de bornita y plata (Fig. 5.45B), aunque existe una muestra (NRM-33) que no sigue la tendencia. Los contenidos de bornita no son los únicos que muestran una correlación positiva con Ag: digenita es una variable con dos tendencias respecto a Ag (Fig. 5.45C), una tendencia positiva, de muy buen ajuste; y otra tendencia que representa muestras que prácticamente no contienen digenita, probablemente correspondientes a mineralización primaria.

El hecho que bornita y digenita sean minerales importantes respecto a contenidos de Cu en Los Pelambres-Frontera explica la correlación positiva tan buena entre Ag y Cu en las muestras de este estudio. En el supuesto que las abundancias absolutas de estos dos minerales son las que controlan gruesamente los contenidos de Ag en Los Pelambres-Frontera, se muestra en la Figura 5.45D la correlación entre Ag y la suma de contenidos de bornita y digenita. Se observa buena correlación positiva entre ambos.

5.8.2. Estudio de partículas minerales de Au

En el estudio de partículas de Au se analizan concentraciones de Au de los diferentes productos de la concentración gravitacional de la muestra (ver sección de metodologías). Los resultados de estos análisis se presentan en la Tabla 5.8, a partir de los cuales es notorio el vínculo de las mayores leyes de Au con la fase de mayor peso específico (“concentrado mesa”), siendo evidencia de vínculo de oro con minerales de estas características, como sulfuros; o sugiriendo liberación de partículas de Au cuando la muestra es molida a 65# Ty, alternativa

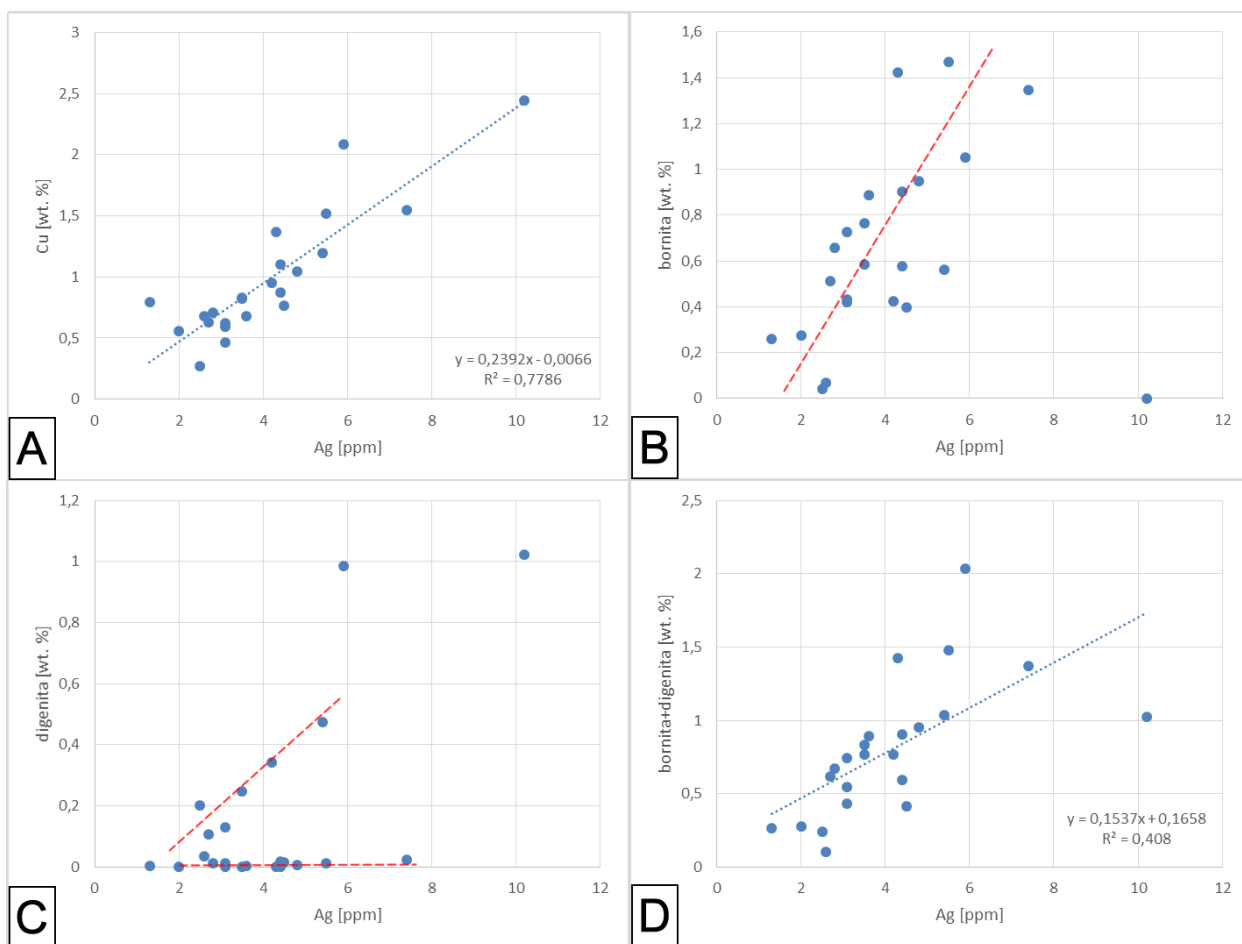


Figura 5.45: Gráficos de análisis de correlación bivariable entre concentraciones de Ag y otros elementos químicos o abundancias minerales. Datos obtenidos en este estudio. A: Ag-Cu. B: Ag – bornita. C: Ag – digenita. D: Ag – bornita+digenita. Líneas discontinuas rojas representan tendencias visualizadas distintas a la regresión lineal de los datos.

que parece poco probable a la luz de los resultados de este estudio, en específico en relación con el tamaño de las partículas halladas, presentados en la Tabla 5.9.

Se halló solo una partícula mineral de Au en las muestras analizadas, además de una partícula de plata nativa. El detalle de las mismas se encuentra en la Tabla 5.9 y en la Figura 5.46. Ambas partículas fueron encontradas en briquetas fabricadas a partir del concentrado mesa. En Frontera, la partícula hallada corresponde a oro nativo (86% Au – 14% Ag), asociado a bornita y ganga; mientras que la de ZAFM corresponde a plata nativa libre (100% Ag). El detalle del análisis composicional de cada una de las partículas halladas se encuentra en el Anexo F.

De este estudio se deduce que una ocurrencia común de Au y Ag en Los Pelambres-Frontera es en partículas de Au nativo. Además, se deduce que la ocurrencia de Au como partículas minerales de Au visibles no es común en Frontera ni en ZAFM (al menos a la escala de las muestras del presente estudio), ya que es muy difícil encontrarlas en el estudio de briquetas. Así, el estudio parece indicar que Au ocurre principalmente como partículas minerales de Au submicroscópicas, o bien en solución sólida en algunos minerales.

Tabla 5.8: Productos de concentración gravitacional mediante mesa, parte del estudio de partículas minerales de Au. Se incluyen leyes de Au de cada producto.

Muestra	Producto	Peso (g)	Leyes Au [ppm]
NRM-21	Cabeza	-	0,50
	Concentrado mesa	176,30	7,00
	Mixto mesa	463,85	1,03
	Rechazo mesa	8550,00	0,14
NRM-22	Cabeza	-	0,11
	Concentrado mesa	116,92	2,60
	Mixto mesa	580,04	0,10
	Rechazo mesa	7149,21	0,06

Tabla 5.9: Detalle de partículas minerales de Au/Ag halladas en este estudio.

Muestra	Tamaños partículas (μm)		Ocurrencia de Au/Ag
	Diámetro mayor	Diámetro menor	
NRM-21	30	20	Partícula de Au nativo, ocluida en ganga de partícula mixta de bornita/ganga
NRM-22	10	5	Partícula de Ag, libre

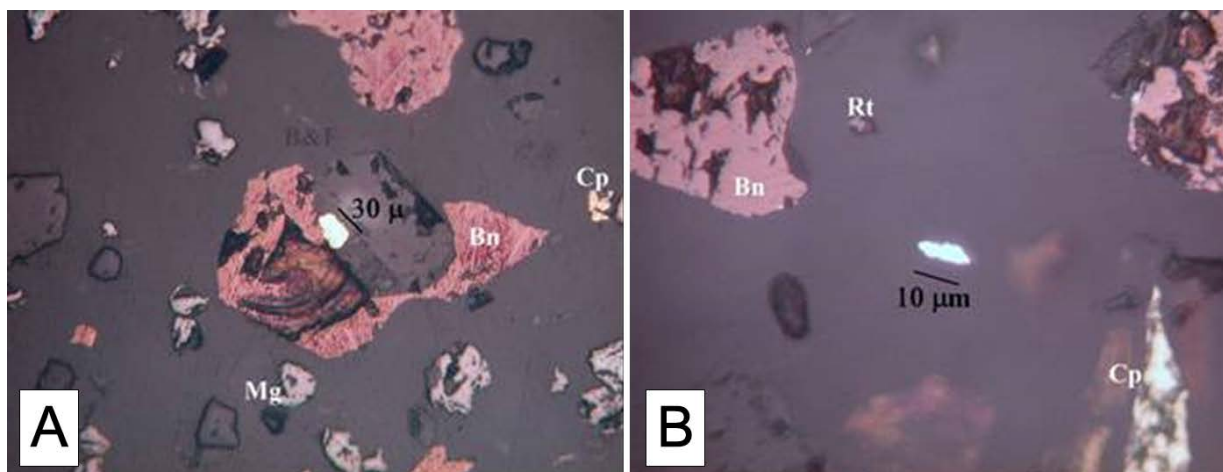


Figura 5.46: Partículas halladas en el estudio de partículas minerales de Au, de este trabajo. A: Partícula de Au nativo - Frontera. B: Partícula de Ag nativo – ZAFM. Fotografías tomadas por B&F Consultores.

La asociación de partículas de Au y bornita vuelve a ser expuesta en otros estudios (ver a continuación), por lo que parece ser la asociación principal para zonas primarias. Sin embargo, no es la única asociación.

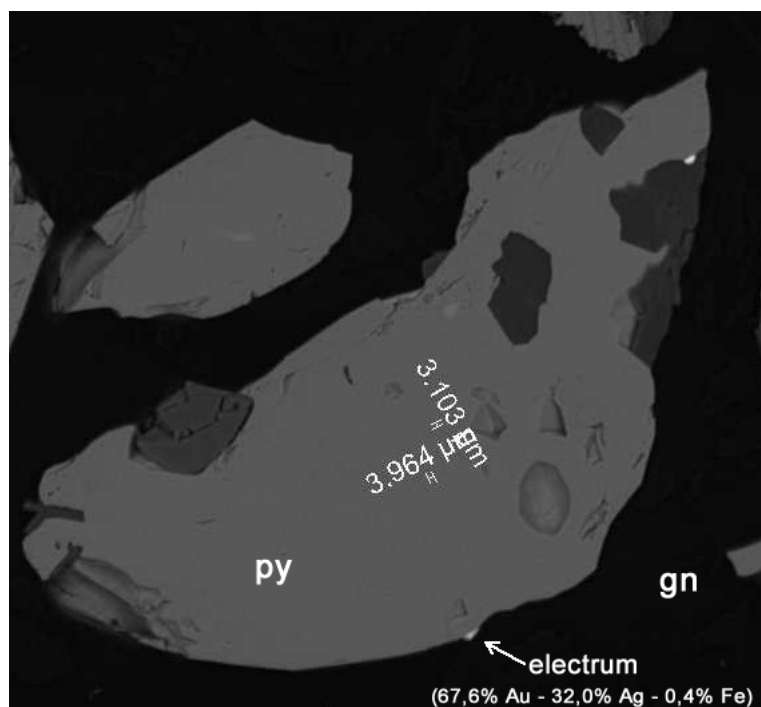


Figura 5.47: Partícula de electrum en asociación con pirita (py) y ganga (gn). Muestra 66. Dimensiones de partícula de electrum en imagen. Tomada de ALS Metallurgy - Kamloops (2013).

5.8.3. Otros estudios sobre ocurrencia de Au en Los Pelambres-Frontera

Aparte de los estudios analíticos contemplados en el presente trabajo, se han realizado otros estudios sobre Au y Ag en Los Pelambres, en específico, un reciente estudio sobre ocurrencias y mineralogía de Au y Ag en muestras representativas de Los Pelambres, realizado por ALS Metallurgy- Kamloops, por encargo de la Superintendencia de Metalurgia, de la Gerencia de Planificación y Desarrollo – MLP, cuyos resultados estuvieron disponibles desde mayo del presente año. Este estudio consistió en el análisis de 4 muestras de 12 kg cada una, representativas de distintas unidades geológicas de Los Pelambres, mediante QEMSCAN, en sus modos de análisis modal de muestras (PMA) y de búsqueda de partículas minerales traza (TMS), en este caso, búsqueda de minerales de Au y Ag. Cada muestra fue concentrada gravitacionalmente para obtener la fracción pesada. Concentraciones de Au y Ag, para cada muestra inicial (Tabla 5.11), y para cada concentrado de minerales pesados (Tablas 5.12 y 5.13) fueron medidas. También fue analizada la composición mineralógica modal de cada muestra (Tabla 5.10). Para más detalles sobre este estudio, consultar ALS Metallurgy - Kamloops (2013).

En primer lugar, se debe indicar que dos muestras corresponden exclusivamente a mineralización hipógena (6 y 66), y las otras dos contienen mineralogía supérgena, con calcosina y covelina secundaria. En todas las muestras, calcopirita > bornita. En particular, la muestra que tiene mayor concentración de Au (0,12 ppm) presenta como asociación principal de sulfuros a calcopirita + pirita, y corresponde a zona de alteración cuarzo-sericítica (muestra 66).

Tabla 5.10: Composición mineralógica de muestras del trabajo de ALS Metallurgy - Kamloops (2013).

Composición Mineralógica (Porcentaje en Peso)				
Sulfuro	Geo Unit 5	Geo Unit 6	Geo Unit 55	Geo Unit 66
Calcopirita	0,87	1,10	0,95	1,04
Bornita	0,06	0,34	0,13	0,06
Calcosina	0,32	0,01	0,34	0,02
Pirita	0,98	0,02	0,27	0,51
Molibdenita	0,02	0,10	0,02	0,02
TOTAL	2,3	1,6	1,7	1,6

Tabla 5.11: Concentraciones de elementos químicos de interés de muestras del trabajo de ALS Metallurgy - Kamloops (2013).

Muestra	Cu [%]	Fe [%]	S [%]	As [%]	Mo [%]	Ag [ppm]	Au [ppm]	S(s) [%]
Geo Unit 5	0,58	1,92	0,94	0,002	0,017	1	0,02	0,85
Geo Unit 55	0,64	1,84	0,64	0,006	0,012	1	0,06	0,39
Geo Unit 6	0,57	1,28	1,44	<0,002	0,066	1	0,09	0,12
Geo Unit 66	0,42	1,64	1,63	0,014	0,014	1	0,12	0,28

Tabla 5.12: Ley de Au en concentrados de muestras del trabajo de ALS Metallurgy - Kamloops (2013), y número de partículas de Au halladas en cada muestra ("Ocurrencias Au").

Muestra	Au [ppm]	Partículas analizadas (x10 ⁴)	Ocurrencias Au
Geo Unit 5	0,35	2,9	2
Geo Unit 55	0,67	2,9	3
Geo Unit 6	2,39	2,6	0
Geo Unit 66	0,28	1,6	2

Tabla 5.13: Ley de Ag en concentrados de muestras del trabajo de ALS Metallurgy - Kamloops (2013), y número de partículas de Ag halladas en cada muestra ("Ocurrencias Ag").

Muestra	Ag [ppm]	Partículas analizadas (x10 ⁴)	Ocurrencias Ag
Geo Unit 5	4	2,9	3
Geo Unit 55	10	2,9	16
Geo Unit 6	94	2,6	3
Geo Unit 66	8	1,6	24

En todas las muestras, las concentraciones de Au y Ag en la fracción pesada de sus concentrados gravitacionales son mayores que en la muestra misma, implicando que estos elementos están asociados de forma importante a minerales densos, los que pudieran ser sulfuros, o los elementos en estudio, en su estado nativo. La muestra que luego de la concentración presentó mayores leyes de Au y Ag en la fase pesada, no fue la de mayor ley inicial de Au: fue la otra muestra de mineralización hipógena (muestra 6), que se caracteriza por tener, notoriamente, el mayor contenido en bornita de todas las muestras: contiene aproximadamente 6 veces más bornita que la otra muestra hipógena, al mismo contenido de sulfuros total. La misma situación se repite para Ag. Si el proceso de concentración gravitacional es idéntico para todas las muestras, entonces se infiere que las asociaciones de Au en las muestras son diferentes.

En adición, la búsqueda de partículas de minerales de Au y Ag halló 7 ocurrencias de Au en total para las cuatro muestras, pero sorpresivamente, ninguna de ellas en la muestra 6 (Tabla 5.12), que es la de mayor ley de Au en el concentrado. En las muestras donde se hallaron partículas de oro, éstas muestran asociación preferencial con pirita, calcopirita, y ganga (ejemplo en Fig. 5.47). Una de las partículas halladas tiene asociación bornita-ganga (ALS Metallurgy - Kamloops, 2013), al igual que la partícula de Au nativo encontrada, en este trabajo, en muestra de Frontera. Adicionalmente, en otro informe, sobre estudio calcográfico de muestras de Frontera (B&F Consultores, 2007), se evidencia una partícula de oro “tipo electrum” asociada a calcosina de reemplazo en una partícula de bornita.

En el caso de Ag, la muestra 6 es la que menos ocurrencias presenta (Tabla 5.12). Cabe mencionar que el estudio de ALS Metallurgy - Kamloops (2013) menciona que una ocurrencia de Ag en las muestras analizadas es como electrum (ejemplo en Fig. 5.47).

Capítulo 6

Discusiones

6.1. Ambientes de mineralización de Au en Los Pelambres – Frontera

A partir los resultados del presente estudio, se identifican al menos tres ambientes de mineralización de Au en Los Pelambres-Frontera: oro de alteración potásica con mineralización de bornita + calcopirita, oro de alteración cuarzo-sericítica con mineralización de calcopirita + pirita, y oro en horizontes lixiviados y de enriquecimiento supérgeno. En cada uno de estos ambientes, Au se asocia a distintos minerales, y por tanto, su tipo de ocurrencia es distinto, y su potencial recuperación metalúrgica variará. Cada zona anómala de Au descrita en secciones precedentes posee uno o más de estos ambientes de mineralización. A continuación, se describe cada ambiente y las asociaciones de Au en cada uno.

6.1.1. Oro de alteración potásica con mineralización de bornita + calcopirita

El grueso del contenido de Au en Los Pelambres y Frontera se encuentra en rocas con alteración potásica, que a su vez se caracterizan por tener la asociación bornita + calcopirita en partes centrales de los depósitos. Lo anterior da cuenta de una correlación (gruesa) entre leyes de Au y Cu. La asociación mineralógica (de sulfuros) principal en Frontera y en sectores de la ZANE-E es bornita + calcopirita + magnetita, mientras que en Los Pelambres (especialmente en la ZAFM) la asociación principal es bornita + calcopirita + molibdenita. Las dos asociaciones mineralógicas antes mencionadas constituyen dos sub-ambientes de Au en Los Pelambres – Frontera.

En estas zonas, el oro se asocia principalmente a bornita, y en menor medida a calcopirita, magnetita y molibdenita. Cabe notar que en este estudio no se hallaron partículas libres de Au nativo, aunque no se descarta su ocurrencia en Los Pelambres – Frontera, a la luz de

la gran diferencia entre oro analizado en cada muestra del estudio y el Au que es explicado por las leyes de Au en separados de minerales de interés (ver sección de análisis químicos y mineralógicos).

Ocurrencia de oro en bornita y calcopirita

En el presente trabajo se prueba la ocurrencia de Au como partículas de Au nativo incluidas o adyacentes a bornita, pero por lo expuesto en el marco teórico, es esperable que Au también ocurra asociado a este mineral como solución sólida, y/o como nanopartículas de Au nativo o electrum (que explicarían en parte las correlaciones positivas entre Au y Ag expuestas antes). Se sugiere que estos mismos tipos de ocurrencia son válidos para explicar los contenidos de Au en calcopirita.

El hecho de que el Au ocurra como partículas de oro nativo en bornita y calcopirita implica que una estimación de contenidos de oro, basado en composición mineralógica modal de un volumen de roca en Los Pelambres-Frontera, debe considerar un tamaño de muestra adecuado, tal de reducir la heterogeneidad inducida por estas partículas (reducción de efecto pepita). Lo anterior podría explicar, en parte, la falta de correlación entre contenidos de Au y contenidos de bornita de muestras analizadas en el presente trabajo. Heterogeneidades inducidas, por ocurrencia de estas partículas, en los contenidos de Au de bornita pueden tener influencia en la diferencia entre las leyes de Au analizadas de cada muestra, y los contenidos de Au en separados de minerales de la misma muestra analizada.

Ocurrencia de oro en magnetita

El estudio de separados minerales de este trabajo demuestra que oro también ocurre en magnetita. Au en magnetita es explicado por microinclusiones de bornita en cristales de magnetita, microinclusiones que han sido reportadas en trabajos de descripción calcográfica de Frontera, como el de Cornejo (2007). Estas microinclusiones de bornita probablemente contienen Au en solución sólida y, eventualmente, podrían contener partículas de Au nativo.

Ocurrencia de oro en molibdenita

Se ha demostrado en este estudio que molibdenita proveniente de la ZAFM tiene contenidos de Au que son comparables (o superiores) a los de calcopirita del mismo sector. Sin embargo, se desconoce qué tipo de asociación existe entre Au y dicho mineral en Los Pelambres - Frontera, por lo que a continuación se presentan dos posibles formas de ocurrencia de Au en molibdenita. En el trabajo de Perelló y Cabello (1989) se reporta ocurrencia de partículas de Au nativo asociadas a molibdenita, del pórfido Cu Island Copper. Por otro lado, en el trabajo de Ciobanu et al. (2013) se demuestra que molibdenitas que presentan nano o microinclusiones de elementos como Bi, Pb o Te pueden tener contenidos anómalos de Au,

con el oro asociado a estas microinclusiones. Se plantea que las microinclusiones de Bi, Pb o Te incentivan la incorporación de Au y Ag a molibdenita (Ciobanu et al., 2013).

6.1.2. Oro de alteración cuarzo-sericítica con mineralización de calcopirita + pirita

Parte del oro de Los Pelambres – Frontera ocurre en rocas con alteración cuarzo-sericítica, por ejemplo, gran parte de la ZASE y sectores de la ZANE-E. De la revisión de características geológicas de zonas anómalas de Au, se obtienen evidencias de la superposición de la alteración cuarzo-sericítica sobre alteración potásica, en estas zonas. Probablemente el oro fue introducido a la roca durante los eventos de alteración potásica, por lo que Au de estas zonas tenía inicialmente la misma asociación indicada antes (con bornita principalmente), pero los eventos de alteración posteriores hicieron que las asociaciones mineralógicas del elemento cambiaran, como es visto en el marco teórico.

La ocurrencia de Au en este ambiente es como partículas de Au nativo y electrum asociadas a pirita, calcopirita y ganga, probablemente cuarzo (asociación posible de la muestra 66 del estudio de metalurgia MLP; ALS Metallurgy - Kamloops, 2013). En adición, posiblemente calcopirita contiene Au asociado como solución sólida. El hecho que Au se asocie de manera relevante a la ganga, en este tipo de ambiente, afecta negativamente la recuperación de Au en el proceso metalúrgico de mineral proveniente de zonas de alteración cuarzo-sericítica. Otra asociación de Au que puede ser relevante en el sector norte de Los Pelambres es Au en sulfosales de Cu, asociación insinuada por una tendencia de correlación positiva entre Au y As (ver sección de análisis de correlación bivariable), aunque no probada.

6.1.3. Oro en horizontes lixiviados y de enriquecimiento supérgeno

A partir de lo mostrado en el capítulo de resultados, se deduce que Au no fue movilizado durante los procesos supérgenos que afectaron a Los Pelambres y Frontera, procesos posteriores a los que dieron origen a los ambientes de mineralización de Au antes explicados. Sin embargo, se demostró que niveles lixiviados de Frontera y Los Pelambres contienen cantidades de Au similares a las de los niveles de mineralización hipógena (de una misma zona anómala de Au), y además se mostró que calcosina y covelina, correspondiente a niveles de enriquecimiento supérgeno, tienen contenidos de Au anómalos.

Ocurrencia de Au en calcosina y covelina

En la sección de este trabajo en la que discute sobre otros estudios sobre Au en Los Pelambres-Frontera, se reporta la ocurrencia de una partícula de electrum en calcosina de reemplazo en un cristal de bornita (B&F Consultores, 2007). En estos casos, las partículas minerales de oro originalmente se encuentran ocluidas en cristales de bornita o calcopirita,

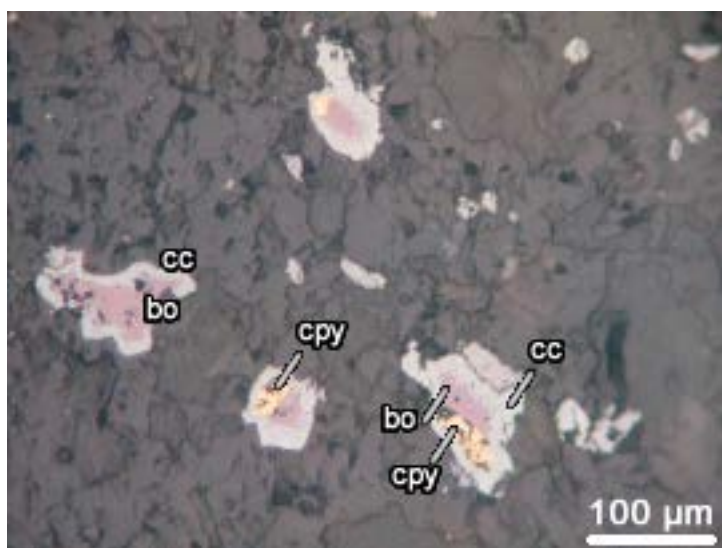


Figura 6.1: Calcosina (cc) como reemplazo selectivo de bornita (bo) y calcopirita (cpy). Luz reflejada, 200X, N//. Muestra MAM-011. Sector Frontera. Tomado de B&F Consultores (2007).

minerales que posteriormente son reemplazados por sulfuros supérgenos de mayor contenido de Cu: calcosina y covelina. Las texturas de reemplazo en Los Pelambres-Frontera son selectivas: las partículas de Au no son reemplazadas. Estas partículas, por tanto, cambian de una asociación con bornita o calcopirita, a asociación con calcosina o covelina. En la Figura 6.1 se puede apreciar la textura de reemplazo de calcosina, en la misma muestra en la que se halló la partícula de oro antes mencionada (sondaje MAM-011).

Dado que Au en bornita y calcopirita probablemente ocurre también como nanopartículas de Au nativo, es esperable que calcosina y covelina también estén asociados a Au de este tipo de ocurrencia. El grado de asociación de estos minerales con Au depende del grado de enriquecimiento supérgeno y del grado original de asociación de Au con los sulfuros primarios que son reemplazados.

Ocurrencia de Au en horizontes lixiviados

El oro de horizontes lixiviados corresponde a Au residual: en zonas lixiviadas, reacciones de oxidación transforman sulfuros, inicialmente en asociación con Au, en óxidos e hidróxidos de Fe y/o Mn. Debido a que Au es inmóvil en Los Pelambres-Frontera, éste pasa a asociarse con los minerales recién mencionados, de forma similar a la descrita para calcosina y covelina en niveles de enriquecimiento secundario.

6.2. Incorporación de Au a Los Pelambres – Frontera

El oro probablemente fue incorporado a Los Pelambres y Frontera mediante fluidos hidrotermales relacionados a eventos de intrusiones interminerales de Pórfido A, principalmente, y

menor aporte de fluidos hidrotermales relacionados a Pórfido B, o eventualmente a Pórfido D (ver discusión sobre Pórfido D más adelante). Esto es sugerido a partir de la buena relación espacial de pórfido A con zonas anómalas de Au, y del hecho que Pórfido A es una de las litologías que mayores leyes de Au presenta.

La relevancia de la familia de Pórfido A por sobre la de Pórfido B respecto a la incorporación de Au a Los Pelambres – Frontera pudiera ser justificada por las diferencias composicionales entre los pórfidos: Pórfido A es de composición más máfica que Pórfido B. En un número importante de pórfidos cupríferos enriquecidos en Au se han destacado vínculos de los mismos con intrusiones porfídicas de composición diorítica o de diorita cuarcifera (Perelló y Cabello, 1989; Jones, 1992), característica compartida por pórfidos A. Se debe señalar, sin embargo, que ni Los Pelambres ni Frontera se clasifican como pórfidos cupríferos enriquecidos en Au.

6.2.1. Pórfidos interminerales y centros hidrotermales no ligados a oro alto

Entre Los Pelambres y Frontera existe una franja de pórfidos interminerales y centros hidrotermales asociados que no presentan vínculo con altas concentraciones de Au o Ag (Fig. 5.29). Esta franja, como indicado en el trabajo, es de orientación NE-SW, al igual que el sistema de fallas de Los Pelambres y sus lineamientos de As. Según lo visto en el marco teórico, los primeros pulsos de pórfidos interminerales, y brechas asociadas, en un sistema tipo pórfido cuprífero, son los que mayor contenido de Au aportan al sistema. Este aporte de Au declina en el tiempo, en intrusiones interminerales más jóvenes. Es posible, entonces, que la franja antes mencionada represente los últimos eventos magmáticos de Los Pelambres, y por tanto, implique que el magmatismo durante la formación del pórfido Cu-Mo Los Pelambres fue migrando discretamente hacia el SE. En algunos trabajos sobre Los Pelambres-Frontera (ver marco geológico) se indica que Frontera es de edad más joven que Los Pelambres, pero no se hace mención a progresiones claras de edad dentro de cada uno de los depósitos. La proposición antes hecha se podría probar mediante datación U-Pb en circones de los intrusivos interminerales en cuestión. Otra opción para explicar lo anterior es que los pórfidos A y B de la franja sean levemente distintos que los ubicados en el centro de Los Pelambres, que signifique una fuente de fluidos hidrotermales empobrecida en oro.

6.3. Mecanismos de transporte y precipitación de Au en Los Pelambres – Frontera

Como se ha indicado en la discusión sobre ambientes del oro en Los Pelambres–Frontera, la precipitación de Au a partir de soluciones hidrotermales explica el Au de alteración potásica, pero no el Au de los otros ambientes, que se cree que inicialmente correspondía a Au de alteración potásica. Con eso en cuenta, a continuación se discuten las condiciones de transporte y precipitación de Au de alteración potásica en Los Pelambres – Frontera, y las condiciones

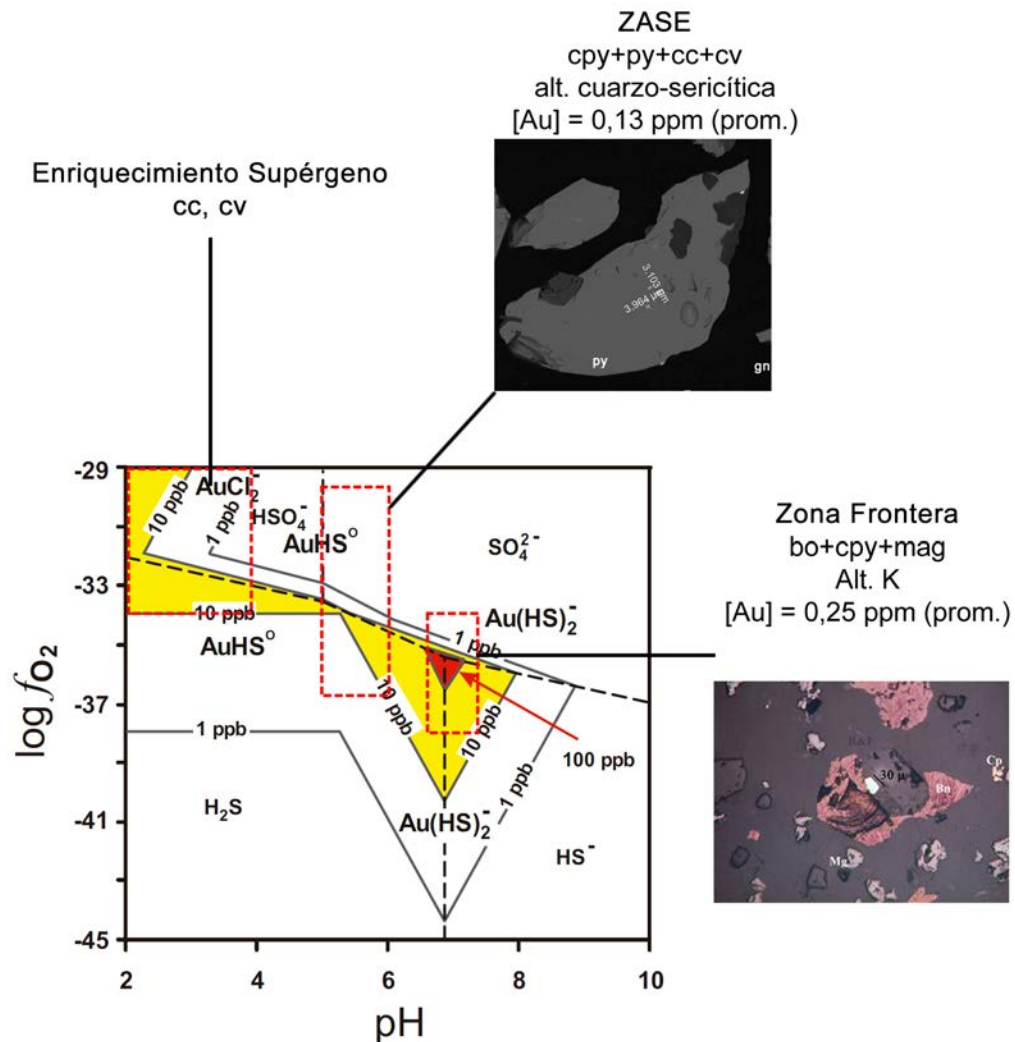


Figura 6.2: Condiciones de formación de Zona Frontera, y solubilidad de Au (ppb) respecto a ellas, en función de pH y f_{O_2} . ZASE y Enriquecimiento Secundario solo son mostrados como referencia. Condiciones de mayor solubilidad de Au en el gráfico son denotadas con color amarillo (entre 10 ppb y 100 ppb) y color rojo (más de 100 ppb). Modificado de Williams-Jones et al. (2009)

de transporte y precipitación de Au para los otros ambientes de mineralización de Au, si el supuesto anterior no se cumple.

La alteración potásica, de las características expuestas antes en el texto, ocurre a altas temperaturas de formación ($>400^{\circ}\text{C}$), y acota los rangos de pH de precipitación a neutros. En el caso de Frontera, la asociación bornita + calcopirita + magnetita acota las condiciones de oxidación: rango de $\log f_{O_2}$ aprox. entre -38 y -34. Estas condiciones se grafican en la Figura 6.2, donde se relaciona con la solubilidad de Au. Se logra apreciar que la solubilidad de Au a estas condiciones puede ser muy alta, pero el más mínimo cambio de condiciones químicas puede reducir la capacidad del fluido de transportar Au, precipitándolo. Esta situación parece ser la que sucede en Frontera. Las condiciones de precipitación de Au de alteración potásica de Los Pelambres son parecidas a las de Frontera: se tiene asociación paragenética bornita + calcopirita, sin pirita.

A estas temperaturas, el mecanismo de transporte de Au más probable es mediante complejos clorurados en soluciones hidrotermales. El mecanismo de precipitación más eficiente para este tipo de transporte es enfriamiento. Otro mecanismo de precipitación de Au que pudo haber tenido relevancia en Los Pelambres-Frontera es un descenso de la fugacidad de azufre: si los complejos clorurados de Au no son desestabilizados por enfriamiento, entonces aproximadamente a los 350° comienza un transporte dominado por complejos bisulfurados. La precipitación de sulfuros puede hacer que la fugacidad de azufre baje abruptamente, precipitando Au por procesos de saturación, junto con sulfuros de Cu-Fe. Si la fugacidad de azufre en el sistema es baja inicialmente, entonces la formación de complejos bisulfurados se verá disminuida, desencadenando precipitación de Au por el mismo motivo antes mencionado.

Considerando que fluidos hidrotermales relacionados a eventos de intrusiones interminerales de Pórfido A incorporan Au al sistema porfídico, se podría esperar que en las inmediaciones de estas intrusiones sea precipitado el oro, ya que la roca caja tiene temperaturas menores, y propicia el mecanismo de enfriamiento. Esta situación efectivamente se observa en Los Pelambres-Frontera, donde Au se concentra en los mismos pórfidos A y en brechas hidrotermales asociadas. Probablemente las brechas magnético-hidrotermales no posean concentraciones de oro igual de altas que las brechas hidrotermales debido a temperaturas mayores de las primeras por sobre las segundas.

Naturalmente, no todo el oro precipita en las cercanías de estas litologías: una parte sigue siendo transportada en solución hidrotermal, hasta que precipita, asociado a sulfuros, en vetillas tempranas propias de mineralización de alta temperatura, vetillas T4 o A principalmente. Respecto al contenido de Au de estas vetillas, éste es variable debido principalmente a que el contenido de sulfuros, asociados a Au como visto antes, es variable entre vetillas del mismo tipo. Así, el contenido de oro de determinado sector en Los Pelambres-Frontera será determinado mayormente por la abundancia de sulfuros asociados a Au, y probablemente, por la razón entre abundancias de ellos.

En el caso que no todas las zonas anómalas se formen por los mismos procesos, el transporte de Au en la ZASE sería como el delimitado en la Figura 6.2, limitado por condiciones de pH dadas por alteración cuarzo-sericitica (pH 5-6). En estas condiciones, la solubilidad de Au pudiera ser elevada (>10 ppb), pero por lo general no lo es, siendo menor que en el caso de Au de alteración potásica. A las temperaturas de formación de estas zonas anómalas, los mecanismos de precipitación comprenden sulfuración, oxidación, y ebullición.

En el presente trabajo se ha mostrado que Au es inmóvil frente a procesos supérgenos. En este sentido, en la Figura 6.2 se muestran las condiciones a la que ocurre el transporte de este tipo, usualmente, en relación a la solubilidad de Au. Se observa que existen ciertas condiciones donde la solubilidad puede superar las 10 ppb, pero estas condiciones probablemente no se tuvieron en el caso de Los Pelambres-Frontera. Existen otros factores que controlan el transporte de Au en estas condiciones, como por ejemplo la disponibilidad de iones cloruros, entre otros.

6.4. Otros controles sobre Au en Los Pelambres-Frontera

6.4.1. Posible control litológico del stock Los Pelambres sobre contenidos de Au en Los Pelambres

Estudios que se realizaron, por parte de la Superintendencia de Geología – MLP, mientras se confeccionaba el presente informe, que contemplaron análisis de cortes transparentes y de abundancia de minerales formadores de roca, demuestran que el stock Los Pelambres tiene una variabilidad litológica bastante mayor a la reportada en trabajos anteriores: en el sector central de Los Pelambres existen granodioritas, gradando a diorita cuarcífera hacia los bordes, pasando por composiciones QAP intermedias entre esos dos tipos de roca. Esta variabilidad litológica del stock puede tener algún control sobre los contenidos de ciertos elementos químicos en Los Pelambres, en específico, Au y Ag. Esta variabilidad es adicional a las variaciones texturales del stock Los Pelambres mencionadas en el marco geológico. Una de ellas es la variación Pórfido D, la que podría tener un rol en el control de las leyes de Au, posibilidad tratada a continuación.

6.4.2. Posible control estructural - litológico en la ZASE y porción sur de la ZANE-E

En la sección de relación de Au y litología, se revisa la disposición de Pórfido D en Los Pelambres. Pórfido D se dispone en una franja de orientación N-S, espacialmente coincidente con la extensión sur de ZANE-E y con ZASE (Fig. 5.29). La morfología de la ZANE-E, en su parte de más al sur, también tiene orientación N-S, por lo que se insinúa alguna relación entre ZANE-E, ZASE y pórfido D. Posiblemente la orientación de Pórfido D es producto de una debilidad estructural durante su emplazamiento, de la misma orientación.

Se desconoce si la correlación espacial entre ZANE-E, ZASE y pórfido D es mera coincidencia, o si hay relación genética entre ellos. Si la relación fuera genética, podría deberse a que Pórfido D propicia la precipitación de Au por alguna característica composicional, o a que la debilidad estructural persiste durante los eventos de mineralización, canalizando fluidos hidrotermales mineralizadores; o a que pórfido D se trata realmente de un pórfido intermineral muy temprano, que estaría relacionado a eventos de fluidos hidrotermales que aportarían Au al sistema. Esta última opción parece descartada en los trabajos realizados en Los Pelambres.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

La distribución espacial de Au no es homogénea en Los Pelambres-Frontera: se reconocen sectores con mayores concentraciones de oro que el resto, en particular, sectores con concentraciones de oro mayor a 0,1 ppm (oro alto). En Los Pelambres, se reconocen al menos tres zonas anómalas: Zona Anómala Noreste-Este (ZANE-E), Zona Anómala Fondo Mina (ZAFM) y Zona Anómala Sureste (ZASE). En Frontera, se reconoce una gran zona anómala, Zona Frontera, que es de dimensiones y leyes mayores que sectores anómalos en Los Pelambres. La distribución espacial de Ag tampoco es homogénea: se detectan sectores de mayores leyes de Ag, en específico, sectores con concentraciones mayores a 2 ppm (plata alta). En Los Pelambres, las zonas anómalas de plata son numerosas, y algunas de ellas son coincidentes con las antes nombradas para Au. En Frontera, se detecta una gran zona de plata alta, de coincidencia parcial con la anomalía de Au Frontera. La distribución espacial de oro en Los Pelambres-Frontera no es controlada por procesos supérgenos ni directamente por alteración hidrotermal. En contraste, Ag tiende a ser concentrado en el nivel de enriquecimiento secundario, donde se asocia a digenita.

Se identifican tres ambientes de mineralización aurífera en Los Pelambres-Frontera: (1) oro de alteración potásica con mineralización de bornita y calcopirita, (2) oro de alteración cuarzo-sericítica con mineralización de calcopirita y pirita, y (3) oro en niveles lixiviados y de enriquecimiento supérgeno.

El ambiente de oro de alteración potásica y mineralización de bornita y calcopirita comprende gran parte de las zonas anómalas de Au antes definidas, por ejemplo, la ZAFM y zonas hipógenas de Frontera y de la ZANE-E. En este ambiente, el oro está asociado principalmente a bornita, como partículas de Au nativo y en solución sólida, y en menor medida, a calcopirita, magnetita y molibdenita. Bornita tiene contenidos de Au que fluctúan entre aproximadamente 2 y 7 ppm. Este mineral presenta contenidos de oro que son entre 5 y 7 veces mayores que las de calcopirita. El oro en magnetita se explica por microinclusiones de bornita en cristales de magnetita. Cabe señalar que no todas las zonas anómalas tienen mag-

netita hidrotermal (ej.: ZAFM). El tipo de ocurrencia de Au en molibdenita se desconoce, pero se propone que es Au ligado a nano o microinclusiones de Bi, Pb o Te presentes en cristales de molibdenita. En este estudio no se encontraron partículas libres de Au nativo, pero es un tipo de ocurrencia que no se descarta, en virtud de que los contenidos de oro de las especies minerales analizadas no justifican la totalidad de los contenidos de Au de las muestras a las cuales las especies minerales analizadas pertenecen.

En el ambiente de mineralización aurífera de alteración cuarzo-sericítica y mineralización de calcopirita y pirita, al que corresponde a grueso modo la ZASE y algunos sectores de la ZANE-E, el oro está asociado, como partículas de Au nativo y electrum, principalmente a calcopirita, y también a pirita y ganga. Además, en zonas con alto contenido de As, el oro puede ocurrir asociado a sulfosales.

En el ambiente de mineralización aurífera de niveles lixiviados, Au es del tipo residual, y está asociado a óxidos e hidróxidos de Fe o Mn, mientras que en niveles de enriquecimiento supérgeno, el oro está asociado a calcosina y covelina de reemplazo, como partículas de Au nativo o electrum. El grado de asociación de estos minerales con Au depende del grado de enriquecimiento supérgeno y del grado original de asociación de Au con los sulfuros primarios que son reemplazados.

Se plantea que la introducción de Au a los depósitos estuvo ligada a fluidos mineralizadores asociados principalmente a episodios de intrusión de Pórfido A y de formación de brechas hidrotermales asociadas. Se propone que Au precipitó debido a saturación, por procesos de enfriamiento y por reducción en fS_2 por precipitación de sulfuros, en etapas de alteración hidrotermal tempranas (alteración potásica) relacionadas, a su vez, a eventos de vetillas tempranas T4 y A. Posteriormente, superposición de alteración cuarzo-sericítica sobre alteración potásica cambió las asociaciones del oro presente en algunos sectores anómalos. Finalmente, procesos supérgenos cambiaron la asociación de Au nuevamente, dando lugar a los tres ambientes de mineralización aurífera descritos antes.

Respecto a la relación entre Au y vetillas, las zonas anómalas de Au muestran coincidencia espacial moderada con núcleos de alta intensidad de vetillas A+B. Sin embargo, dado que no todas las vetillas de un mismo tipo y en un mismo volumen de roca poseen las mismas características de mineralización ni tamaño, no se constatan vínculos directos entre Au-Ag y cantidad absoluta de vetillas de cierto tipo por volumen de roca.

Casi la totalidad de las zonas anómalas de Au de Los Pelambres-Frontera se encuentran en zona donde se cumple bornita \geq calcopirita, o calcopirita $>$ bornita \geq pirita.

7.2. Recomendaciones

Se sugiere seguir con el programa de análisis de Au en separados de bornita y calcopirita, con la finalidad de determinar el rango de leyes y el grado de variación de las mismas en estos minerales, para así poder incluir apropiadamente, si es que se requiere, las variables bornita

o calcopirita a una estimación de oro en Los Pelambres-Frontera. Eventualmente se podría realizar análisis SIMS a bornita, con la finalidad de cuantificar Au en solución sólida en el mineral.

En este mismo sentido, se recomienda establecer un programa de análisis de Au en concentrados de magnetita, para conocer con exactitud cuánto Au se asocia a ella, y que por tanto no es recuperado en el proceso de concentrado de Los Pelambres. En esta misma línea, se recomienda estudiar las leyes de Au en los concentrados de molibdenita producidos por MLP, debido a la ocurrencia probada de Au en este mineral, y en concentrados de pirita de zonas de alteración cuarzo-sericítica.

Se recomienda estudiar los contenidos de oro de los concentrados de Cu producidos por MLP y contrastarlos con leyes de cabeza de oro, para realizar una estimación de recuperación metalúrgica de Au. Esto debiese hacerse teniendo en cuenta el ambiente de mineralización de Au del que proviene el mineral a procesar.

A la luz de los resultados del presente estudio, se sugiere probar la utilidad de la razón bornita/calcopirita para la estimación de Au en Los Pelambres-Frontera; y la utilidad de la variable bornita + digenita, para la estimación de Ag.

Como las mayores leyes de Au se asocian a Pórfido A, brechas hidrotermales, alteración hidrotermal potásica, y altas intensidades en vetillas A+B, se recomienda, en cuanto a planificación minera, la consideración de estas relaciones, en función de evitar dilución de Au en la explotación de Los Pelambres, al extraer conjuntamente rocas de sectores con alto Au y de sectores con bajo Au.

Capítulo 8

Bibliografía

- ALS Metallurgy - Kamloops (2013). KM3718 - Estudio mineralógico de cuatro muestras de mineral de la mina Los Pelambres. Minera Los Pelambres, Salamanca, Chile. Inédito.
- Archibald, S., Migdisov, A. A., y Williams-Jones, A. E. (2001). The stability of Au-chloride complexes in water vapor at elevated temperatures and pressures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65, 4413 – 4423.
- Atkinson, Jr., W. W., Souviron, A., Vehrs, T., y Faunes, A. (1996). Geology and mineral zoning of the Los Pelambres Porphyry copper deposit, Chile. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 5, 131 – 155.
- Babcock, R. C., Ballantyne, G. H., y Phillips, C. H. (1995). Summary of the geology of the Bingham district, Utah. *En* Pierce, F. W., y Bolm, J. G. (eds.) Porphyry copper deposits of the American Cordillera. *Arizona Geological Society Digest*, 20, 316 – 335.
- Ballantyne, G. H., Smith, T. W., y Redmond, P. B. (1997). Distribution and mineralogy of gold and silver in the Bingham Canyon porphyry copper deposit, Utah. *En* John, D. A. y Ballantyne, G. H. (eds.) Geology and ore deposits of the Oquirrh and Wasatch Mountains, Utah. *Society of Economic Geologists Guidebook Series*, 29, 147 – 153.
- Bertens, A., Clark, A. H., Barra, F., y Deckart, K. (2006). Evolution of the Los Pelambres-El Pachón porphyry copper-molybdenum district, Chile/Argentina. *Congreso Geológico Chileno, 11, Antofagasta, 2006, Actas*, 2, 179–181.
- Bertens, A., Deckart, K., y González, A. (2003). Geocronología U-Pb, Re-Os y ^{40}Ar - ^{39}Ar del pórfido de Cu-Mo Los Pelambres, Chile central. *Congreso Geológico Chileno, 10, Concepción, 2003, CD-ROM*, 1 p.
- B&F Consultores (2007). Estudio calcográfico de 13 muestras de sondajes y estudio mineralógico de 8 muestras de compósitos de tramos de sondajes, Pórfido Frontera. Minera Los Pelambres. Informe 0642/07. Inédito.
- Bodnar, R. J. (1995). Fluid-inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits. *En* Thomson, J. F. H. (ed.) Magmas, fluids and ore deposits. *Mineralogical Association of Canada short course series*, 23, 139 – 152.

- Boyle, R. W. (1979). The geochemistry of gold and its deposits. *Geological Survey of Canada, Bulletin* 280, 584 p.
- Brimhall, Jr., G. H. (1977). Early fracture-controlled disseminated mineralization at Butte, Montana. *Economic Geology*, 72, 37–39.
- Brockway, H., Perelló, J., Posso, H., y East, P. (2008). Programa exploración Los Pelambres: Informe final mayo 2008. Inédito.
- Butt, C. R. M. y Hough, R. M. (2009). Why Gold is Valuable. *Elements*, 5, 277 – 280.
- Ciobanu, C. L., Cook, N. J., Kelson, C. R., Guerin, R., Kalleske, N., y Danyushevsky, L. (2013). Trace element heterogeneity in molybdenite fingerprints stages of mineralization. *Chemical Geology*, 347, 175–189.
- Cornejo, P. (2007). Estudio Petrográfico y Calcográfico de Muestras Pórfido Frontera.
- Cox, D. P. y Singer, D. A. (1988). Distribution of gold in porphyry copper deposits. *U.S. Geological Survey, Open File Report*, 88-46, 22 p.
- Dean, J. A. (1999). *Lange's Handbook of Chemistry*. McGraw-Hill, INC., 15a edición.
- Deditius, A., Utsunomiya, S., Reich, M., Kesler, S. E., Ewing, R. C., Hough, R., y Walshe, J. (2011). Trace metal nanoparticles in pyrite. *Ore Geology Reviews*, 42, 32 – 46.
- Dill, H. G. (2010). The “chessboard” classification scheme of mineral Deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100, 1 – 420.
- Garay, M. (2013). Modelamiento de sulfuros para estimación de ley de concentrado. Minera Los Pelambres. Inédito.
- González, S. (2007). Distribución y ocurrencia de oro en Proyecto Esperanza. Minera Esperanza. Inédito.
- Gustafson, L. B. y Hunt, J. P. (1975). The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 70, 857–912.
- Gustafson, L. B. y Quiroga, J. (1995). Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 90, 2–16.
- Heinrich, C. A., Günter, D., Audétat, A., Ulrich, T., y Frisch-knecht, R. (1999). Metal fractionation between magmatic brine and vapor determined by microanalysis of fluid inclusions. *Geology*, 27, 755 – 758.
- Hough, R., Noble, R. R. P., y Reich, M. (2011). Natural gold nanoparticles. *Ore Geology Reviews*, 42, 55 – 61.
- Hough, R. M., Butt, C. R. M., y Fischer-Bühner, J. (2009). The Crystallography, Metallography and Composition of Gold. *Elements*, 5, 297 – 302.
- Isaaks, E. y Srivastava, R. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press.

- Jones, B. K. (1992). Application of metal zoning to gold exploration in porphyry copper systems. *Journal of Geochemical Exploration*, 43, 127–155.
- Kesler, S. E., Chryssoulis, S. L., y Simon, G. (2002). Gold in Porphyry copper deposits: its abundance and fate. *Ore Geology Reviews*, 21, 103 – 124.
- Kirkham, R. y Sinclair, W. (1995). Porphyry copper, gold, molybdenum, tungsten, tin, silver. *En: Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I. (eds.), Geology of Canadian Mineral Deposit Types. Geological Survey of Canada Geology of Canada*, 8, 421–446.
- Lowell, J. D. y Guilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 64, 373–408.
- Maddox, L. M., Bancroft, G. M., Scaini, M. J., y Lorimer, J. W. (1998). Invisible gold; comparison of Au deposition on pyrite and arsenopyrite. *American Mineralogist*, 83, 1240 – 1245.
- Maksaev, V. (2001). Metalogénesis de Chile. Apuntes del curso GL54A Metalogénesis. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Maksaev, V. (2012). Contexto Pórfidos - Presentaciones de clases del curso GL5311 Metalogénesis. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - Universidad de Chile. Inédito. Diapositiva 35.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., y Camus, F. (2007). Metallic ore deposits. *En: Moreno T. y Gibbons, W. (eds.) The Geology of Chile. The Geological Society, London*, (pp. 179–199).
- Minera Los Pelambres (2013). Modelo Litológico Los Pelambres-Frontera. Inédito.
- Palenik, C. S., Utsunomiya, S., Reich, M., Kesler, S. E., y Ewing, R. C. (2004). “Invisible” gold revealed: direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin-type deposit. *American Mineralogist*, 89, 1359 – 1366.
- Pearson, R. G. (1963). Hard and Soft Acids and Bases. *Journal of the American Chemical Society*, 85 (22), 3533 – 3539.
- Perelló, J., Brockway, H., Posso, H., Sillitoe, R. H., East, P., y Matthews, F. (2011). Discovery of the Frontera porphyry copper-gold deposit at Los Pelambres, central Chile. *Biennial Meeting of the Society of Geology Applied to Mineral deposits (SGA), 11, Antofagasta, Chile, 2011, Procedimientos, v.2, p. 909-911: Antofagasta, Universidad Católica del Norte*.
- Perelló, J. y Cabello, J. (1989). Pórfidos cupríferos ricos en oro: una revisión. *Revista Geológica de Chile*, 16, 73–92.
- Perelló, J., Fleming, J. A., O’Kane, K. P., Burt, P. D., Clarke, G. A., Himes, M. D., y Reeves, A. T. (1995). Porphyry copper-gold-molybdenum deposits in the Island Copper cluster, northern Vancouver Island, British Columbia. *En: Schroeter, T. G. (ed.), Porphyry Deposits of the Northwestern Cordillera of North America. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Special Volume*, 46, 214 – 238.

- Perelló, J., Sillitoe, R. H., Brockway, H., Posso, H., y Mpodozis, C. (2009). Contiguous Porphyry Cu-Mo and Cu-Au mineralization at Los Pelambres, Central Chile. *Congreso Geológico Chileno, 12, Santiago, 2009, Actas, pendrive*, 4 p.
- Perelló, J., Sillitoe, R. H., Mpodozis, C., Brockway, H., y Posso, H. (2012). Geologic Setting and Evolution of the Porphyry Copper-Molybdenum and Copper-Gold Deposits at Los Pelambres, Central Chile. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 16, 55–104.
- Reich, M., Chryssoulis, S. L., Deditius, A., Palacios, C., Zúniga, A., Weldt, M., y Alvear, M. (2010). “Invisible” silver and gold in supergene digenite (Cu_{1,8}S). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(21), 6157 – 6173.
- Reich, M., Deditius, A., Chryssoulis, S., Li, J.-W., Ma, C.-Q., Parada, M. A., Barra, F., y Mittermayr, F. (2013). Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 104(0), 42 – 62.
- Reich, M., Kesler, S. E., Utsunomiya, S., Palenik, C. S., Chryssoulis, S. L., y Ewing, R. C. (2005). Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 2781 – 2796.
- Saunders, J. (1990). Colloidal transport of gold and silica in epithermal precious-metal systems: Evidence from the Sleeper deposit, Nevada. *Geology*, 18, 757 – 760.
- Seo, J. H., Guillong, M., y Heinrich, C. A. (2009). The role of sulfur in the formation of magmatic-hydrothermal copper-gold deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 282, 323 – 328.
- Seward, T. (1973). Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37, 379 – 399.
- Sillitoe, R. H. (1973). Geology of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile. *Economic Geology*, 68, 1–10.
- Sillitoe, R. H. (1979). Some thoughts on gold-rich porphyry copper deposits. *Mineralium Deposita*, 14, 161–174.
- Sillitoe, R. H. (2006). Some ideas and suggestions for geological modeling of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile. A report prepared for Minera Los Pelambres. Santiago, 11p. Inédito.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105, 3–41.
- Simon, G., Huang, H., Penner-Hahn, J. E., Kesler, S. E., y Kao, L. S. (1999). Oxidation state of gold and arsenic in gold-bearing arsenian pyrite. *American Mineralogist*, 84, 1071 – 1079.
- Simon, G., Kesler, S., Essene, E. J., y Chryssoulis, S. L. (2000b). Gold in porphyry copper deposits: experimental determination of the distribution of gold in the Cu-Fe-S-Au system at 400°C to 700°C. *Economic Geology*, 94, 259 – 270.

- Singer, D. A., Berger, V. I., y Moring, B. C. (2008). Porphyry copper deposits of the world - Database and grade and tonnage models.
- Skewes, M. y Stern, C. R. (1994). Tectonic trigger for the formation of late Miocene Cu-rich breccia pipes in the Andes of central Chile. *Geology*, 22, 551–554.
- Tomkins, A. G. y Mavrogenes, J. A. (2001). Redistribution of gold within arsenopyrite and lollingite during pro- and retrograde metamorphism: application to timing of mineralization. *Economic Geology*, 96, 525 – 534.
- Tosdal, R. M., Dilles, J. H., y Cooke, D. R. (2009). From Source to Sinks in Auriferous Magmatic-Hydrothermal Porphyry and Epithermal Deposits. *Elements*, 5, 289 – 295.
- Universidad de Chile (2013). Procesos y Procedimientos en la Separación de Minerales - Laboratorio de Separación de Minerales - Departamento de Geología - Universidad de Chile.
- USGS (2010). *Porphyry Copper Deposit Model. Scientific Investigations Report 2010-5070-B*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Williams-Jones, A. E., Bowell, R. J., y Migdisov, A. A. (2009). Gold in Solution. *Elements*, 5, 281 – 287.
- Williams-Jones, A. E. y Heinrich, C. A. (2005). Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 100, 1287 – 1312.
- Williams-Jones, A. E. y Migdisov, A. A. (2007). The solubility of gold in crude oil: implications for ore genesis. *En: Andrew C. J. et al. (eds.). Proceedings of the 9th Biennial SGA Meeting, Dublin*, Millpress, 765 – 768.
- Zein, D. Y., Migdisov, A. A., y Williams-Jones, A. E. (2007). The solubility of gold in hydrogen sulfide gas: An experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 3070 – 3081.
- Zein, D. Y., Migdisov, A. A., y Williams-Jones, A. E. (2008). The solubility of gold in H₂O-H₂S vapour. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (Suplemento 1), A1076.
- Zhou, J., Jago, B., y Martin, C. (2009). *Establishing the process mineralogy of gold ores*. Technical report, SGS Minerals - Technical Bulletin.

Capítulo 9

Anexos

9.1. Anexo A: Controles fisicoquímicos en el transporte y precipitación de Au, y su relación con sulfuros en depósitos minerales

El oro, elemento químico de número atómico 97 (isótopo estable), y metal precioso de color amarillo, es uno de los elementos de menor abundancia en la corteza terrestre, con concentraciones promedio entre 1.3 ppb (Butt y Hough, 2009) y 2 ppb (Dill, 2010). En comparación a otros metales preciosos, como Ag y Pt, es aún menos abundante, ya que los elementos antes nombrados se encuentran en concentraciones promedio de 80 ppb y 10 ppb en la corteza terrestre, respectivamente (Dill, 2010). Posee propiedades como excelente maleabilidad, ductilidad, baja resistividad eléctrica ($0,022 \mu\Omega\cdot\text{m}$ vs. $0,016 \mu\Omega\cdot\text{m}$ del cobre; Dean, 1999), alta densidad ($19,32 \text{ g/cm}^3$ a 293 K; Butt y Hough, 2009), baja reactividad y buena resistencia a la corrosión (Williams-Jones et al., 2009). Probablemente las últimas tres propiedades nombradas motivaron la explotación inicial del recurso, por las primeras civilizaciones, las cuales aprovechaban los depósitos tipo placer y el oro visible ligado a vetillas (Butt y Hough, 2009). El oro adquirió con el tiempo una riqueza intrínseca para la humanidad, que motivó su búsqueda tradicional y mediante otras actividades relacionadas, como la alquimia. Hoy en día, los depósitos minerales de los que se extrae oro son muy variados: epitermales, pórfidos auríferos, pórfidos cupríferos ricos en Au, IOCG, tipo Carlin, placeres de Au, entre otros.

El oro tiene diversos usos industriales: como constituyente en componentes electrónicos, como catalizador, para coronas y tapaduras en odontología, y aplicaciones en medicina, entre otros. Todo lo antes nombrado representa el 12 % de la demanda de oro anual (Butt y Hough, 2009). Sin embargo, el principal empleo actual del oro es en joyería, y también su utilización como unidad de almacenamiento de riqueza (ej.: en la confección de monedas y lingotes de oro).

9.1.1. Ocurrencias de oro

Cuando se describen las ocurrencias naturales de oro, usualmente se utiliza terminología como oro “visible” o “invisible”, haciendo referencia a si el oro puede ser detectado con métodos de microscopía ópticos (visible), métodos de microscopía electrónica de barrido, o simplemente no puede ser visualizado (invisible), y por tanto, debe ser detectado con otros métodos (ej.: análisis mediante ensayo al fuego y absorción atómica, o mediante espectrometría de masas de iones secundarios, SIMS). Esta clasificación es algo problemática, debido a que, por ejemplo, no todas las ocurrencias de oro “invisible” son de las mismas características. Por eso, se describen a continuación las ocurrencias de oro según características unificadoras, y no según “visibilidad”.

La primera forma de ocurrencia de oro es en partículas (Hough et al., 2009; Zhou et al., 2009), las cuales corresponden a partículas de oro nativo (partículas con más de 80 % Au), electrum (aleación natural Au-Ag, con Au y Ag menores a 80 %) o minerales donde el oro es un constituyente principal (ej.: calaverita, AuTe_2). Las anteriores pueden ocurrir como partículas prístinas en fracturas, o como inclusiones en otros minerales (fase distinguible del mineral que las contiene), situación en la que también las partículas pueden estar en los bordes del mineral (ej.: en sulfuros Fe-Cu, pirita, arsenopirita; Zhou et al., 2009). Estas partículas se presentan en diversidad de tamaños: desde tamaños nanométricos (nanopartículas de oro) hasta partículas centimétricas. Así, algunas partículas de oro serán visibles bajo microscopio óptico, y otras serán invisibles.

El oro también puede estar formando parte de la estructura cristalina de un mineral, en concentraciones traza, es decir, puede estar en su forma elemental vinculado a otros elementos de un mineral. Esta ocurrencia se denomina “oro en solución sólida” (ej.: oro en bornita, Kesler et al., 2002), y, por su naturaleza, se trata de una ocurrencia invisible al microscopio, ya que Au y el mineral portador forman una sola fase. Cuantificaciones de Au en solución sólida pueden ser realizadas de mejor forma mediante SIMS directamente en el cristal de interés.

Un último tipo de ocurrencia es identificado en el trabajo de Zhou et al. (2009): “oro superficial”, que es la situación cuando Au ha sido adsorbido por una superficie (por ejemplo, por óxidos de hierro o materia carbonosa). Este caso también es de “oro invisible”, pero no se trata de una solución sólida.

9.1.2. Oro en solución

A pesar de la extrema estabilidad del oro en condiciones normales, especialmente frente a la meteorización, existen reacciones químicas conocidas que logran disolver este elemento, por ejemplo, la digestión con agua regia (tres partes de HCl y una de HNO_3), o reacciones del proceso de cianuración del oro.

Especiación del oro en solución acuosa

Los complejos que forma el oro en solución acuosa pueden ser evaluados según la Teoría de Ácidos y Bases Blandos y Duros (TABBD) de Pearson (1963), a partir de la cual se deriva la nomenclatura de metales y ligantes “duros” y “blandos”, que adquiere sentido al hablar de iones. Un metal “duro” es aquel que es relativamente menos polarizable que uno blando, debido a un bajo radio iónico y a elevadas cargas del primero. La TABBD plantea que los metales duros formarán complejos más estables, y de forma más rápida y preferencial, con ligantes duros, y viceversa. El oro, generalmente se encuentra como Au^+ , metal clasificado como blando, al igual que Cu^+ . Ejemplos de ligantes blandos son: CN^- , HS^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, I^- . En excepcionales casos (sistemas a temperatura ambiente y condiciones altamente oxidantes), puede ocurrir Au^{3+} , el cual tiene comportamiento de metal duro.

Si bien la TABBD predice la preferencia del Au^+ por formar complejos con ligantes blandos, no especifica con cuál ligante lo hará en mayor medida, ni la “facilidad” que tendrá Au para formar compuestos. Esta especiación de oro en sistemas acuosos depende principalmente de la temperatura, y condiciones como pH y Eh del medio, situaciones descritas a continuación. Información sobre especiación de oro en solución acuosa, reacciones controladoras, otros tipos de transporte de Au, y procesos supérgenos de Au, se basan en el trabajo de Williams-Jones et al. (2009) y referencias contenidas en el mismo.

A temperaturas cercanas a ambiente, los principales ligantes blandos que interactúan con el oro son HS^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, CN^- y SCN^- , donde el oro se especiara con CN^- preferencialmente, en los ambientes donde éste abunde (ej.: donde exista descomposición de materia orgánica). Un caso especial puede darse si las condiciones son altamente salinas y ácidas, situación en la que el oro ocurre como Au^{3+} , y puede especiarse con Cl^- (ligante de borde) y, por tanto, ser transportado (como AuCl_4^- o AuCl_2^- , dependiendo del nivel de salinidad y acidez, Williams-Jones et al., 2009). En estas condiciones también puede ser de relevancia el transporte de Au mediante compuestos orgánicos (ej.: ácidos húmico y fúlvico).

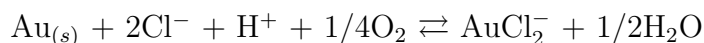
A temperaturas más elevadas, como las de formación de sistemas hidrotermales, los ligantes más importantes son HS^- y Cl^- , siendo HS^- dominante a temperaturas menores a 350°C (Seward, 1973), y Cl^- dominante a temperaturas mayores a la indicada (Fig. 9.1). En temperaturas menores a 350°C , el complejo dominante de oro será AuHS^0 , para pHs bajos, y $\text{Au}(\text{HS})_2^-$, a pH más elevado. En la Figura 9.2 se muestra la solubilidad de oro para esta situación, a 250°C , donde se aprecia que la solubilidad del oro no solo depende de la temperatura, sino que también de pH y fugacidad de O_2 , además de dependencia de S total del sistema, como mostrado en la Figura 9.1.

En temperaturas mayores a 350°C , la especie dominante de oro será AuCl_2^- (Fig. 9.1), aunque podrá ser otra si las condiciones no son especialmente ácidas y oxidantes.

Reacciones controladoras de transporte hidrotermal y depositación/disolución de oro

Debido a que el oro se asocia a diferentes ligandos según la temperatura en ambientes de formación de sistemas hidrotermales, entonces las reacciones químicas que controlan la disolución y la precipitación de oro, en estos sistemas, serán propias del complejo acuoso dominante.

Para temperaturas superiores a 350°C, es decir, para sistemas en los que la especie de oro dominante es AuCl_2^- , la reacción controladora es:



Por el principio de Le Châtelier, la precipitación de $\text{Au}_{(s)}$, en este caso, es promovida por disminución en la fugacidad de O_2 y por un aumento en el pH. Además, en este caso, un enfriamiento del fluido hidrotermal puede promover la precipitación de $\text{Au}_{(s)}$, al desestabilizar el complejo AuCl_2^- . Como mostrado por Williams-Jones et al. (2009), una disminución de 50°C causaría una depositación de cerca del 95 % del oro contenido en solución, en un sistema a 500 bar y temperatura de entre 300 y 500°C. Por esto, el proceso de enfriamiento parece ser el de mayor relevancia para la precipitación de oro a estas temperaturas.

Para temperaturas de hasta 350°C (dominancia de la especie AuHS^0 o $\text{Au}(\text{HS})_2^-$, las reacciones son:

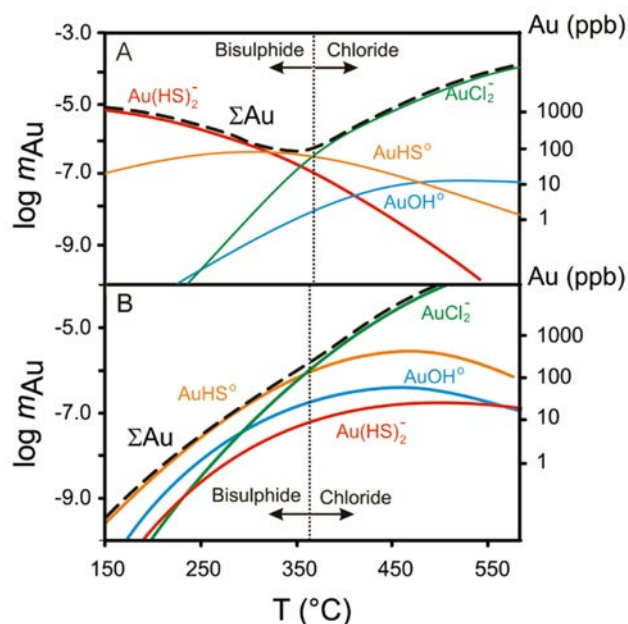


Figura 9.1: Solubilidad y especiación de Au (en términos de molalidad, m , y ppb) a 1 kbar, como función de temperatura, para una solución acuosa conteniendo 1,5 m NaCl y 0,5 m KCl, con buffer pH dado por la asociación feldespatos-K - muscovita - cuarzo. (A): S total (ΣS) = 0,01 m, y Buffer de $f\text{O}_2$: hematita-magnetita. (B): asociación buffer de (ΣS) y de $f\text{O}_2$: pirita-pirrotita-magnetita. (ΣS) máximo es 0,1 m. Línea negra a trazos indica solubilidad total de oro. Tomado de Williams-Jones et al. (2009).

negativa, que pueden seguir siendo transportadas en suspensión. Habitualmente este tipo de oro es acompañado por sílice coloidal (Saunders, 1990).

Otros medios de transporte de Au

Algunos trabajos han demostrado la capacidad de transporte de oro del vapor de agua, con contenidos variables de HCl (Archibald et al., 2001) o H₂S (Zezin et al., 2007, 2008). Esta capacidad es utilizada para explicar ocurrencias de oro en modelos geológicos de depósitos epitermales o de emanaciones volcánicas, entre otros.

En algunos depósitos de Au (ej.: depósitos del tipo Carlin, en el Distrito Carlin, Nevada) se ha propuesto a hidrocarburos (petróleo) como responsables de al menos parte de la mineralización aurífera de los depósitos. Aunque se ha planteado la posibilidad que estos hidrocarburos causen desestabilización de complejos acuosos de oro, como los revisados antes, el trabajo de Williams-Jones y Migdisov (2007) demuestran que el petróleo si puede transportar Au, con solubilidad variable según la temperatura.

Procesos supérgenos

La movilidad del oro mediante solución en fluidos supérgenos es muy limitada, es por esto que habitualmente se considera al oro como inmóvil. En los casos en que el oro se comporta como elemento inmóvil, Au se enriquece en el nivel de oxidación de depósitos, por concentración residual, es decir, remoción de sulfuros y ganga soluble (Boyle, 1979). La eventual movilización de oro por procesos supérgenos depende de factores fisicoquímicos ambientales y otros, como por ejemplo, geomorfológicos y la naturaleza de la mineralización hipógena.

El oro ha demostrado especiarse con S₂O₃²⁻ en condiciones de pH neutro a levemente alcalino, y condiciones no muy oxidantes. Este transporte es bastante limitado, debido a la transformación de S₂O₃²⁻ en SO₄²⁻. En otras condiciones, por ejemplo hipersalinas y áridas, puede haber especiación en la forma de AuCl₄⁻ (condiciones ácidas) o AuOH(H₂O) (condiciones menos ácidas que AuCl₄⁻). El transporte como complejo clorurado requiere soluciones con contenidos mínimos de Cl (> 35000 mg/L). En la presencia de materia orgánica, puede ocurrir cianuración del oro, o transporte coloidal estabilizado por ácidos húmicos.

9.1.3. Implicancia en la precipitación de sulfuros

Los controles fisicoquímicos en el transporte, la disolución y precipitación de oro repercuten directamente en los minerales en los que se halla oro. Una asociación común Au-mineral es con sulfuros. Por ejemplo, esta asociación se encuentra en depósitos tipo Carlin (Au en pirita arsenical, Reich et al., 2005) y pórfido cuprífero (Au en bornita, calcopirita, pirita; Kesler et al., 2002), entre otros.

Sulfuros primarios

Existen sulfuros en los que se ha constatado presencia de oro en algunos casos, y que se forman a temperaturas mayores a 400°C. Es el caso de bornita, calcopirita y pirita en zonas de depósitos tipo pórfido cuprífero (ver Kesler et al., 2002; Reich et al., 2013).

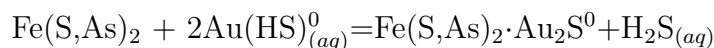
En el trabajo de Kesler et al. (2002), y mediante comparación con datos de solubilidad de bornita-calcopirita coexistentes, de Simon et al. (2000b), se constata que saturación respecto a Au, en las muestras estudiadas, ocurre a temperaturas que no corresponden a las de formación de depósitos tipo pórfido cuprífero, por lo que se infiere que estos minerales inicialmente alojan una mayor cantidad de oro, completamente en solución sólida, pero que luego, mediante enfriamiento, es exsuelto y da lugar a inclusiones y bordes de oro nativo observadas en cristales de bornita. En este sentido, Tomkins y Mavrogenes (2001) indican que la solubilidad del oro en soluciones hidrotermales, a las condiciones de formación de pórfidos cupríferos, es muy alta, por lo que es más probable que el oro sea incorporado mediante solución sólida a sulfuros de Fe-Cu, a que el oro forme fases independientes (ej.: oro nativo). Esta incorporación de oro probablemente sucede mediante enfriamiento y desestabilización de complejos de Au - Cl, como se ha visto antes.

Probablemente el sulfuro primario más estudiado con respecto a su contenido en Au es pirita, debido posiblemente a su importancia económica en algunos depósitos, como los depósitos tipo Carlin, o algunos depósitos epitermales. La pirita puede precipitar en un amplio rango de temperaturas: donde destacan los ambientes porfídicos y epitermales.

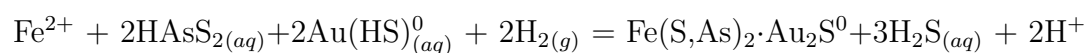
En el trabajo de Reich et al. (2013), se estudia pirita arsenical perteneciente a un depósito tipo pórfido cuprífero. Pirita de este depósito muestra zonaciones de diferente composición química: zonas de alto Cu y bajo As, y zonas de bajo Cu, alto As, y además, alto Au. Estas zonaciones representarían variaciones de los fluidos hidrotermales en el tiempo. El proceso que se postula para explicar lo anterior es mezcla de fluidos hidrotermales “precipitadores de pirita” con vapores de alta temperatura (700°C) -caso de zonas con As- y vapores portadores de Cu, de menor temperatura (300°C), todo esto en la interfase fluido-pirita, o en las cercanías. La pirita en estos depósitos puede formarse en condiciones de alteración hidrotermal potásica, mediante sulfuración de componente de hierro, de minerales máficos primarios, o en la alteración sericítica, mediante reacción de sulfuración de hierro e hidrólisis de feldespatos. El oro de pirita de alteración sericítica probablemente fue precipitado en condiciones de pH 5-6, y temperaturas de bajo 400°C (dato por inclusiones fluidas del estudio). Por tanto, el transporte de Au en este caso es mediante especiación con H₂S, y la incorporación de Au a pirita es similar a los procesos propuestos por Reich et al. (2005) (ver a continuación).

Para muestras de pirita, con contenidos variables de As y Au, provenientes de depósitos tipo Carlin y epitermal, se demuestra que el límite de solubilidad de oro en pirita arsenical es directamente dependiente de la concentración de arsénico de la misma (Reich et al., 2005). Se establece una relación lineal entre concentraciones de Au y As. Aquellas muestras con concentraciones de Au mayores al límite de solubilidad, presentan Au⁰, en la forma de nanopartículas de Au nativo incluidas en pirita, mientras que en piritas subsaturadas, se constata presencia de Au¹⁺ estructuralmente ligado (solución sólida), el cual se piensa que

sustituye a Fe en la estructura cristalina de la pirita arsenical (no está claro de qué forma). As sustituye a S en la estructura de la pirita. Por el origen de las muestras, la relación empírica encontrada es válida para temperaturas de formación de entre 150 a 250°C. Se halla que las muestras de depósitos tipo Carlin son mayormente subsaturadas con respecto a Au, por lo que se propone un método de extracción de Au a partir de soluciones subsaturadas en oro mediante adsorción de complejos acuosos de oro, en capas ricas en As (conductor tipo p, Maddox et al., 1998), de pirita arsenical, según la siguiente reacción química:



También se propone la precipitación simultánea de pirita arsenical y oro, según la reacción:



Se ve que la incorporación de Au a pirita arsenical es propiciada por una disminución de H₂S. Por esto, procesos que favorecen esta incorporación son ebullición (depósitos epitermales) y sulfuración (depósitos tipo Carlin).

Sulfuros secundarios

Con respecto a oro en sulfuros secundarios, se conoce en especial el caso de la digenita supérgena, por los trabajos de Reich et al. (2010) y Kesler et al. (2002), con el segundo haciendo referencia exclusivamente a depósitos tipo pórfido cuprífero.

Estudios microscópicos en digenita supérgena, proveniente de depósitos tipo manto, tipo pórfido, y pórfido cuprífero gigante (Reich et al., 2010), muestran que este mineral puede contener cantidades importantes de metales traza, en específico Au (hasta 6 ppm) y Ag (hasta 11000 ppm). Estos elementos pueden estar incluidos en la digenita como nanopartículas de Au (Ag) nativos, o incorporados como solución sólida. Lo anterior es dependiente del contenido de As de digenita, con respecto a la concentración de Au o Ag: en el caso de Ag, cuando la razón Ag/As supera 30, se constatan ocurrencias de Ag⁰ como nanopartículas (Reich et al., 2010). Se cree que As puede actuar como catalizador para la incorporación de metales traza, provenientes de soluciones que los contengan (actuando como conductor tipo p, y aumentando interacción con iones o complejos iónicos negativos; Maddox et al., 1998). La digenita, al tener un origen supérgeno, no se forma a condiciones de sistemas hidrotermales, si no que a menores temperaturas (digenita “baja”, T < 90°C). En estas condiciones, se piensa que el oro (y la plata) posiblemente fueron transportados en solución, como (caso del oro) complejo AuCl₄⁻ (pH < 4 y condiciones oxidantes, en ambientes hiperáridos), o probablemente un complejo de Au con Br o I, y luego precipitado junto a digenita, al llegar a ambiente reductor propio de una zona de enriquecimiento secundario. También se plantea la posibilidad que el transporte del oro haya sido del tipo coloidal (Kesler et al., 2002). El origen del oro que porta digenita, es la disolución de sulfuros primarios, mediante bacterias, con contenidos de Au.

9.2. Anexo B: Oro en depósitos tipo pórfido cuprífero

9.2.1. Generalidad

El oro (y la plata) son co-productos o subproductos de cerca del 30 % de los depósitos tipo pórfido cuprífero (USGS, 2010). Estos depósitos minerales son fuente de cerca de un quinto de la producción mundial de Au mundial (Maksaev, 2012). En los depósitos en que el oro fue recuperado, utilizando datos de 2002, la ley promedio de oro fue 0,16 ppm, con leyes de hasta 0,65 ppm (USGS, 2010). Según datos compilados por Singer et al. (2008), la ley promedio del oro como subproducto, recuperado desde cerca de dos tercios de los depósitos, fue de 0,21 ppm.

9.2.2. Origen del oro

Evidencia de inclusiones fluidas muestran que el oro, y otros elementos (Cu, As, entre otros) son introducidos a los sistemas porfíricos por fluidos de origen magmático (Bodnar, 1995; Heinrich et al., 1999). Estos fluidos se generan mediante exsolución a partir del stock magmático vinculado al pórfido cuprífero, por primera o segunda ebullición. En la exsolución del fluido, varios elementos incompatibles son capturados y concentrados por éste, incluyendo Cu, Au y Ag, así como también S y Cl. Posteriormente Au es transportado, como indicado en la sección anterior. Cuando S es removido del fluido hidrotermal, durante la precipitación de sulfuros de cobre-hierro y hierro, el oro también precipita (Williams-Jones y Heinrich, 2005), habitualmente como solución sólida. En este sentido, el oro entra al sistema de pórfido, principalmente en eventos de alteración tempranos y de alta temperatura, como es el caso de alteración potásica (Kesler et al., 2002). Además, puede ocurrir un enriquecimiento en oro, arsénico, azufre, y en menor medida cobre, producido por separación de fases de fluidos magmáticos, en la fase de vapor, menos densa (USGS, 2010, basado en Seo et al., 2009). Esto sería responsable de ocurrencia de los elementos antes mencionados más cerca a la superficie.

9.2.3. Relaciones entre oro y otras características geológicas

En los trabajos de Perelló y Cabello (1989) y Jones (1992) se presentan las relaciones entre oro y características geológicas en depósitos tipo pórfido cuprífero “enriquecidos en Au” (contenido de Au \geq 0,3 ppm, en el trabajo de Perelló y Cabello, 1989). Estas características son alteración hidrotermal, zonación de metales y minerales, y litología, entre otras.

El oro comúnmente está asociado al núcleo de alteración potásica de un sistema (Perelló y Cabello, 1989; Jones, 1992), en donde es común una buena correlación Au – Cu (Zona Central Cu-Au; Jones, 1992 y referencias contenidas en el mismo); pero también puede estar asociado a alteración cuarzo sericítica, habitualmente superpuesta a alteración potásica inicial; y a alteración de arcillas-sericita-clorita y argílica avanzada (Perelló y Cabello, 1989).

Respecto a zonación de Au respecto a zonas de otros elementos, aparte de la relación mencionada previamente entre Cu y Au en la zona central de pórfidos cupríferos, puede haber una zona enriquecida en Au en una posición intermedia, entre la zona rica en Cu y una zona enriquecida en Pb y Zn (Zona Intermedia de Au; Jones, 1992 y referencias contenidas en el mismo), zona coincidente parcialmente con la zona de piritita periférica de algunos pórfidos cupríferos.

Si bien las relaciones antes expuestas son la generalidad, no siempre se cumplen. Existen trabajos de algunos depósitos (ej.: Bingham, Utah; Bajo de la Alumbrera) donde vistas en planta y perfiles muestran una correlación espacial general entre cobre y oro. En particular, en el caso de Bingham se observa una correlación espacial entre cobre, molibdeno y oro (USGS, 2010). En Kalamazoo, Arizona, en contraste, el oro ocurre arriba y lateralmente a la zona de mena (de cobre), en las zonas de alteración propilítica y sericitica (USGS, 2010). En el trabajo de Babcock et al. (1995), se describe un halo de As-Au rodeando al depósito tipo pórfido Cu Bingham Canyon, en Utah, que se extiende por más de 8 km al noreste.

Las características exactas de litología de un depósito tipo pórfido cuprífero generalmente son propias de cada depósito (ej.: roca de caja), por lo que vínculos Au – litología deben ser estudiados para cada pórfido cuprífero en particular. Sin embargo, existen características litológicas en común entre ellos, como la presencia de intrusiones porfídicas, y en algunos casos, brechas magmático-hidrotermales o hidrotermales. Respecto a las brechas, éstas pueden llegar a tener importante mineralización de mena, así como también altas leyes de Au. Se ha planteado que brechas tempranas tienden a tener mayor contenido de Au que brechas de eventos tardíos (Tosdal et al., 2009).

9.2.4. Ocurrencia de oro en pórfidos cupríferos

En cuanto a la ocurrencia del Au en los depósitos tipo pórfido cuprífero, éste se da principalmente como solución sólida en sulfuros Cu-Fe, en particular, en bornita (Kesler et al., 2002; USGS, 2010), la cual habitualmente contiene oro en un orden de magnitud por sobre calcopirita (Kesler et al., 2002); y también como partículas de Au nativo libre (Perelló y Cabello, 1989). En el estudio realizado por Kesler et al. (2002), se obtuvieron concentraciones de oro en bornita de alrededor de 1 ppm. El oro también está ligado a la bornita como inclusiones de oro nativo dentro del mineral y/o en los bordes (Perelló y Cabello, 1989; Kesler et al., 2002). No debe quitársele importancia a calcopirita como portador del Au en un pórfido cuprífero, ya que habitualmente está en mayor abundancia que la bornita, y por esto puede representar una fuente económicamente importante de oro (Ballantyne et al., 1997), incluso en depósitos con abundancia en bornita. Adicionalmente, en casos donde la bornita es escasa en eventos de alteración tempranos, el oro se asocia a calcopirita y/o a otros sulfuros (ej.: Perelló et al., 1995). Ocurrencia de oro en otros tipos de minerales, entre ellos telururos, selenuros y minerales con bismuto, es muy rara (Ballantyne et al., 1997). En el trabajo de Perelló y Cabello (1989) se menciona que se ha constatado asociación de partículas de Au nativo con piritita y molibdenita, en Island Copper, y asociación de Au con sulfosales, en Afton.

Eventos tardíos de alteración pueden removilizar cobre y oro de la asociación original bornita-calcopirita del depósito, y fijarlo en otros lugares (Kesler et al., 2002). Tal es el caso de la alteración sericítica pervasiva, que puede formar una nueva asociación de sulfuros: calcopirita-pirita, minerales que también pueden ser huésped de oro (ej.: Reich et al., 2013). Hay otros tipos de alteración que pueden removilizar localmente el oro, a través de estructuras: por ejemplo, alteración argílica avanzada controlada estructuralmente. Existen depósitos, ligados espacialmente a depósitos del tipo pórfido, que obtienen parte de su Au mediante removilización del oro de los pórfidos Cu-Au (Kesler et al., 2002), como por ejemplo depósitos del tipo skarn o epitermales. El reciente trabajo de Reich et al. (2013) pone de manifiesto la importancia de la pirita como mineral huésped para elementos traza en los sistemas tipo pórfido cuprífero. La importancia de elementos traza en pirita, en otros tipos de depósito (epitermal y tipo Carlin), ha sido remarcada en otros trabajos anteriores, por ej.: Reich et al. (2005); Deditius et al. (2011). El oro en pirita (arsenical) puede presentarse en dos formas: incorporado en la estructura cristalina del mineral (Reich et al., 2005; Simon et al., 1999), o como inclusiones minerales de oro, como por ejemplo, oro nativo (Palenik et al., 2004; Reich et al., 2005).

Trabajos realizados en el depósito tipo pórfido Cu-Au Esperanza (González, 2007), muestran que el oro se presenta en aquel depósito como oro nativo liberado, electrum, asociado a estructura cristalina en bornita, calcopirita, digenita; y como inclusiones dentro de cristales de sulfuros de cobre, principalmente bornita, y ganga. Además, han detectado algún grado de asociación, no especificado, entre magnetita y oro. Las inclusiones de Au nativo en minerales se estudiaron mediante calcografía mediante microscopio óptico, por lo que solo inclusiones grandes pudieron ser reportadas. La presencia de oro nativo fue deducida por Kesler et al. (2002) para depósitos tipo pórfido Cu, dado que concentraciones de oro en estructura cristalina de sulfuros del estudio mencionado no dan cuenta de todo el oro presente en los depósitos.

A pesar de la baja reactividad química del oro, eventos supérgenos pueden eventualmente removilizar el oro, como visto antes. En este caso, el oro es liberado de los sulfuros primarios presentes en el pórfido Cu, transportado, y precipitado posteriormente, en especial en el nivel de enriquecimiento supérgeno, incorporándose a sulfuros secundarios como digenita o covelina, entre otros. Estos minerales pueden tener altas concentraciones de Au, incluso mayores a las de los minerales primarios del mismo depósito. En el caso estudiado por Kesler et al. (2002), se reportan concentraciones de oro en calcosina y covelina de 10 a 20 ppm, en contraste a la menor concentración en bornita del mismo estudio. En el trabajo de Reich et al. (2010), se analizan muestras de digenita supérgenas tomadas del yacimiento Mantos Blancos y del pórfido Cu gigante Spence, los cuales muestran perfiles de enriquecimiento secundario bien desarrollados. Los resultados indican que digenita supérgena puede contener hasta 11000 ppm Ag, 6 ppm Au, y elementos como As, Sb, Se, Te.

En los casos en que el oro se comporta como elemento inmóvil, el Au se enriquece en el nivel de oxidación, por concentración residual, es decir, remoción de sulfuros y ganga soluble (Boyle, 1979). En este caso, el mineral supérgeno de oro es Au nativo. En particular, puede ocurrir enriquecimiento secundario de oro en niveles de óxidos de hierro, con Au alojado, en particular, en hidróxidos – óxidos de Fe. En este caso, las partículas minerales de Au poseen “alta fineza” (Hough et al., 2011), es decir, son partículas con concentraciones de Au que

tienden al 100 %, dado que se Au se concentra debido a su baja solubilidad relativa vs. Ag, por ejemplo (Hough et al., 2009).

Es por todo lo anterior que el Au en un depósito puede estar ligado, según los procesos hidrotermales que han ocurrido en él, a distintas zonas de alteración hidrotermal, a distintos horizontes generados por procesos supérgenos, o a distintas fases minerales. Además, una ocurrencia importante de oro en estos depósitos es en la forma de Au nativo, por lo que se debe cuantificar cuánto Au está ligado a minerales, y cuando Au está libre, con fines de obtención del elemento en procesos mineros.

9.3. Anexo C: Control de calidad de análisis químicos – mineralógicos

El muestro y análisis químicos y mineralógicos del presente trabajo incluyen un estudio de control de calidad, que debe servir de guía para la interpretación y confiabilidad de los datos. Este control de calidad incluye duplicados, replicados de laboratorio, estándares secundarios, blancos y blancos de laboratorio. El detalle de los anteriores se entrega en la Tabla 9.1. En la Tabla 9.2 se resumen los coeficientes de variación de los análisis considerados para control de calidad, con fines de comparación.

Cabe notar que el número de duplicados y estándares incluidos se aproxima al 10 % del número total de muestras de cada análisis considerado en el estudio. Teniendo en cuenta que el número de análisis es reducido, las muestras para control de calidad también, por lo que las estimaciones de error presentadas a continuación son estimaciones muy gruesas, y los cálculos de errores son hechos respecto a la muestra original (caso de duplicados).

En este estudio, análisis con más de 20 % de error global, o con error mayor a la varianza total del elemento medido (representado por el coeficiente de variación), son considerados como que no cumplen los estándares de calidad de la industria. En el caso del oro, sin embargo, es esperable un error mayor, por la naturaleza del mismo, por lo que análisis de oro con un error mayor igual fueron considerados en el trabajo.

Tabla 9.1: Número de muestras para control de calidad, por cada estudio contemplado en el estudio de Au en Los Pelambres-Frontera.

Análisis/Estudio	Muestras	Duplicados	Estándares	Blancos	Replicados	Blancos(lab)
Au-Ag roca total	23	2	2	2	3	1
Suite elementos (litogeoquímica)	23	2	2	-	6	2
Au separados sulfuros	9	-	-	-	1	1
Briquetas	23	2	-	-	-	-

Tabla 9.2: Coeficientes de variación de análisis considerados para control de calidad.

Análisis/Estudio	Coeficiente de varianza (σ/\bar{x})
Au roca total	60,0 %
Ag roca total	46,4 %
Cu roca total	53,0 %
Mo roca total	146,6 %
Au separados sulfuros	139,4 %
Briquetas (bornita)	65,1 %
Briquetas (calcopirita)	55,7 %

9.3.1. Control de calidad: Au-Ag en roca total

Los datos de control de calidad de Au-Ag en roca total se entregan en la Tabla 9.3. Para Au, de estos datos, se calcula un 36,4 % de error en precisión global, dado por duplicados; un 6,8 % de error de precisión analítica, dado por replicados de laboratorio; y un 5,1 % de error en certeza analítica, dado por estándares. De lo anterior, se deduce que los análisis de laboratorio tienen buena precisión analítica y certeza para Au: errores son menores al 20 %. Sin embargo, error global no cumple con estándares de la industria.

Si se resta del error global el error de precisión analítica, se obtiene 26,6 % de error total de muestreo (>20 %, no cumple exigencias usuales de la industria), el que puede corresponder en gran parte a un error de heterogeneidad propio de Au en las muestras analizadas.

En el caso de Ag, se calcula un error de precisión global de 4,7 %, y un error de certeza de 8,3 %, resultados que aseguran buena calidad de datos.

Los blancos analizados por Au y Ag, tanto los enviados como los propios del laboratorio, entregan concentraciones bajo el límite de detección, por lo que se descarta contaminación significativa en proceso de análisis.

9.3.2. Control de calidad: Cu-Mo en roca total

Los datos de control de calidad de análisis de Cu-Mo en roca total se entregan en la Tabla 9.4. En el caso de Cu, el error global de precisión es de 0,85 %, mientras que el error de precisión analítico es de 0,7 %, asegurando una buena repetibilidad de datos. El error de certeza es de 1,8 %. Por otro lado, el error global de precisión para Mo es de 9,2 %, el error de precisión analítico es de 3,0 %, y el error de certeza es de 7,4 %. Error total es menor a la variación de la variable estudiada (Tabla 9.2). Los blancos de laboratorio entregan resultados bajo límite de detección. Así, Cu y Mo cumplen con estándares de aseguramiento de calidad.

Tabla 9.3: Muestras para control de calidad de análisis de Au y Ag en roca total.

Muestra duplicada	Au [ppm] muestra	Au [ppm] duplicado	Ag [ppm] muestra	Ag [ppm] duplicado	Diferencia Au	Diferencia Ag
NRM-12	0,035	0,060	2,0	1,9	71,4 %	-5,0 %
NRM-19	0,144	0,146	4,5	4,3	1,4 %	-4,4 %
Muestra replicada	Au [ppm] muestra	Au [ppm] replicado	Ag [ppm] muestra	Ag [ppm] replicado	Diferencia Au	Diferencia Ag
NRM-08	0,201	0,201	3,6	3,9	0,0 %	8,3 %
Blanco	<0,005	<0,005	<0,1	<0,1	0,0 %	0,0 %
NRM-31	0,022	0,025	1,3	1,4	13,6 %	7,7 %
Estándar (95 %)	Au [ppm] std	Au [ppm] analizado	Ag [ppm] std	Ag [ppm] analizado	Diferencia Au	Diferencia Ag
Cu187	0,510	0,488	12,0	13,4	-4,3 %	11,7 %
Cu187	0,510	0,480	12,0	12,6	-5,9 %	5,0 %

Tabla 9.4: Muestras para control de calidad de análisis de Cu y Mo en roca total.

Muestra duplicada	Cu [ppm] muestra	Cu [ppm] duplicado	Mo [ppm] muestra	Mo [ppm] duplicado	Diferencia Cu	Diferencia Mo
NRM-13	8269	8151	335	313,0	-1,4 %	-6,6 %
NRM-31	7912	7933	85	75,0	0,3 %	-11,8 %
Muestra replicada	Cu [ppm] muestra	Cu [ppm] replicado	Mo [ppm] muestra	Mo [ppm] replicado	Diferencia Cu	Diferencia Mo
NRM-03	6318	6385	18	17	1,1 %	-5,6 %
NRM-09	>10000	>10000	929	920	0,0 %	-1,0 %
NRM-32	7113	7184	175	179	1,0 %	2,3 %
Estándar (95 %)	Cu [ppm] std	Cu [ppm] analizado	Mo [ppm] std	Mo [ppm] analizado	Diferencia Cu	Diferencia Mo
Cu187	3800	3799	190	174	0,0 %	-8,4 %
Cu187	3800	3938	190	178	3,6 %	-6,3 %

Tabla 9.5: Muestra para control de calidad de análisis de Au en separados de minerales.

Muestra replicada	Au [ppm] muestra	Au [ppm] replicado	Diferencia
NRM-33 (covelina)	0,6	0,8	33,3 %

Tabla 9.6: Muestras para control de calidad de análisis mineralógico modal mediante briquetas. bo: bornita; cpy: calcopirita

Muestra duplicada	bo(%)	bo(%) duplicado	cpy(%)	cpy(%) duplicado	Dif. bo	Dif. cpy
NRM-10	1,42	1,32	1,71	1,46	-7,4 %	-14,6 %
NRM-19	0,40	0,65	1,49	0,99	62,7 %	-34,0 %

9.3.3. Control de calidad: Au en separados de minerales

Debido al tamaño de muestras (500 mg) no se pudo crear duplicados, ni tampoco se poseen estándares para este tipo de análisis. Por esto, los únicos estudios a la calidad de los datos consisten en un replicado de laboratorio, mostrado en la Tabla 9.5, y un blanco de laboratorio. Este replicado puede hacerse gracias a que la muestra original es de un peso mayor al resto de las muestras (aprox. 1,2 g). El replicado evidencia error analítico de precisión de 33,3 %, por lo que este tipo de análisis de Au no cumple estándares. El blanco da resultados bajo límite de detección, por lo que se descarta contaminación entre muestras analizadas.

9.3.4. Control de calidad: Análisis mineralógico modal mediante briquetas

Para el control de calidad del estudio de briquetas, se crearon dos duplicados. No se poseen estándares ni blancos para briquetas. Los resultados de estos duplicados se exponen en la Tabla 9.6. Se constata que error de precisión total es aproximadamente de 35 % para bornita, y 24,3 % para calcopirita, valores bastante elevados, aunque menores a la variación total de las variables en cuestión (Tabla 9.2). Como no se tienen datos de replicados, no se conoce si la fuente más importante del error está en la fase de toma y preparación de muestra, o en la de análisis. Errores de esta magnitud hacen que estimaciones que utilicen datos de briquetas tengan alta dispersión.

9.3.5. Conclusiones

Análisis de Ag, Cu y Mo en roca total cumplen con los estándares de calidad requeridos por la industria. Análisis de Au, tanto en roca total como en separados, no cumplen los estándares de calidad, algo esperado para oro. Análisis de composición mineralógica modal, mediante briquetas, poseen baja precisión, al menos para calcopirita o bornita.

9.4. Anexo D: Certificados de análisis de materiales de referencia

CERTIFICATE OF ANALYSIS WCM Minerals CU 187

Copper, Molybdenum, Silver, Gold Reference Material

Page 1 of 2

LAB	LAB 1	LAB 1	LAB 1	LAB 1	LAB 2	LAB 2	LAB 2	LAB 2	LAB 2	LAB 3	LAB 3	LAB 3	LAB 3	LAB 3	LAB 4	LAB 4	LAB 4
Replicate	Cu %	Mo %	Ag g/t	Au g/t	Cu %	Mo %	Ag g/t	Au g/t	Cu %	Mo %	Ag g/t	Au g/t	Cu %	Mo %	Ag g/t	Au g/t	Mo %
1	0.377	0.020	11	0.51	0.371	0.019	11	0.516	0.379	0.017	12.2	0.496	0.3930	0.0184			
2	0.388	0.021	11	0.54	0.367	0.019	12	0.546	0.377	0.020	12.3	0.521	0.3820	0.0186			
3	0.382	0.020	11	0.55	0.371	0.019	12	0.517	0.375	0.017	12.1	0.519	0.3820	0.0191			
4	0.380	0.020	10	0.51	0.369	0.019	12	0.523	0.378	0.018	12.2	0.517	0.3500	0.0195			
5	0.381	0.020	11	0.50	0.371	0.019	11	0.539	0.379	0.018	12.3	0.516	0.3940	0.0190			
6	0.375	0.020	11	0.54	0.371	0.020	12	0.523	0.382	0.020	12.2	0.454	0.3890	0.0192			
Average	0.3805	0.0202	10.833	0.5250	0.3700	0.0192	11.667	0.5273	0.3783	0.0183	12.217	0.5038	0.3817	0.0190			
Std Dev.	0.0045	0.0004	0.4082	0.0207	0.0017	0.0004	0.5164	0.0123	0.0023	0.0014	0.0753	0.0260	0.0164	0.0004			
Average T	0.3827	0.0192	12.017	0.5137													
Std Dev.	0.0132	0.0008	0.7830	0.0234													
Recommended Value	Cu %	Mo %	Ag g/t	Au g/t													
	0.38	0.019	12	0.51													

Country of Origin - Canada

Legal Notice: WCM Sales Ltd. (WCM Minerals) has prepared and analyzed the reference materials using qualified analytical laboratories and generally accepted assay procedures. WCM Sales Ltd. accepts liability only for the cost of the standards purchased. The purchaser, with the receipt of the product, releases WCM Sales Ltd. from all liabilities related to the use of the reference materials and information.

Lloyd Twaites
Registered Assayers, Province of British Columbia
Glen Armanini
WCM Sales Ltd. 7729 Patterson Avenue Burnaby, BC, Canada V5J 3P4
Phone: 604-437-0280
E-mail: WCMminerals@telus.net
Web-site: www.WCMminerals.ca

Figura 9.3: Certificado de Análisis de material de referencia Cu187 (estándar secundario). Página 1 de 2.

CERTIFICATE OF ANALYSIS
WCM Minerals
CU 187

Copper, Molybdenum, Silver, Gold Reference Material

Page 2 of 2

LAB	LAB 4	LAB 4	LAB 4	LAB 5	LAB 5	LAB 5	LAB 5	LAB 6	LAB 6	LAB 6	LAB 6	LAB 6	LAB 6	LAB 7	LAB 7	LAB 7	LAB 7
Replicate	Ag g/t	Au g/t	Cu %	Mo %	Ag g/t	Au g/t	Cu %	Mo %	Ag g/t	Au g/t	Cu %	Mo %	Ag g/t	Au g/t	Cu %	Mo %	Ag g/t
1	12.0	0.46	0.396	0.0189	12.0	0.530	0.4018	0.020	11.6	0.510	0.3721	0.0188	12.4	0.53			
2	11.6	0.47	0.400	0.0192	12.0	0.540	0.4200	0.019	11.7	0.511	0.3798	0.0191	13.1	0.51			
3	12.2	0.46	0.400	0.0197	12.5	0.516	0.3847	0.020	12.3	0.510	0.3715	0.0183	12.7	0.53			
4	12.0	0.48	0.401	0.0190	11.5	0.522	0.3818	0.019	11.9	0.524	0.3735	0.0186	12.5	0.54			
5	12.5	0.48	0.399	0.0194	12.0	0.500	0.3794	0.019	11.8	0.517	0.3745	0.0194	13.6	0.54			
6	12.3	0.50	0.407	0.0200	13.0	0.530	0.3973	0.020	14.5	0.510	0.3693	0.0183	12.7	0.52			
Average	12.100	0.4750	0.4005	0.0194	12.167	0.5230	0.3942	0.0195	12.300	0.5137	0.3735	0.0188	12.833	0.5283			
Std Dev.	0.3098	0.0152	0.0036	0.0004	0.5164	0.0139	0.0154	0.0005	1.1045	0.0058	0.0036	0.0004	0.4457	0.0117			
Average T	0.3827	0.0192	12.017	0.5137													
Std Dev.	0.0132	0.0008	0.7830	0.0234													
Recommended Value	Cu %	Mo %	Ag g/t	Au g/t													
	0.38	0.019	12	0.51													

Country of Origin - Canada

Legal Notice: WCM Sales Ltd. (WCM Minerals) has prepared and analyzed the reference materials using qualified analytical laboratories and generally accepted assay procedures. WCM Sales Ltd. accepts liability only for the cost of the standards purchased. The purchaser, with the receipt of the product, releases WCM Sales Ltd. from all liabilities related to the use of the reference materials and information.

Lloyd Twaites
Registered Assayers, Province of British Columbia
Glen Armanini
WCM Sales Ltd. 7729 Patterson Avenue Burnaby, BC, Canada V5J 3P4
Phone: 604-437-0280
E-mail: WCMminerals@telus.net
Web-site: www.WCMminerals.ca

Figura 9.4: Certificado de Análisis de material de referencia Cu187 (estándar secundario). Página 2 de 2.

Certificate of Analysis

Low Gold Material – *AuBlank58*

Product contains less than 0.002 ppm gold.

Date of certification: 20 March 2013

The above value applies to product in sachets that have the identification number 279 270.

A mixture of finely pulverized feldspars and basalt that had previously been analysed and found to have a low gold content was placed into sachets in a gold-free environment. To the best of our knowledge the component materials have been obtained from areas where no gold has previously been mined and have been crushed and pulverized through machinery that has not been used for the treatment of gold ore. A total of 3821 sachets were filled with 52g of material. 24 sachets were selected at regular intervals from the packaging run and were submitted to a laboratory that specializes in low-level analysis for gold. The samples were analysed by aqua regia digestion followed by enhanced graphite furnace atomic absorption spectroscopy. The average of the 24 analyses was 0.37 parts per billion gold, with the highest value being 1.1 parts per billion gold.

We certify the material at a level that is double the highest gold value obtained in the samples analysed. It is thus certified as less than 0.002 ppm gold.

A copy of the analytical report from the independent laboratory is available on request.

Prepared and Certified By:



Malcolm Smith BSc, FNZIC
Rocklabs Reference Materials
40 Oakford Park Crescent, Greenhithe,
Auckland 0632
NEW ZEALAND
Email: Malcolm@MSRML.co.nz
Telephone: +64 9 444 3534

9.5. Anexo E: Resultados completos análisis litogeoquímica

Tabla 9.7: Resultados análisis litogeoquímica ICP-HF39 (digestión cuatro ácidos – lectura ICP-AES). Valores de Cu mayores a 10000 ppm son reemplazados por resultados de espectrometría de absorción atómica de lectura inmediata. Tabla 1 de 2.

Id.Muestra	Ag (ppm)	Al (%)	As (ppm)	Be (ppm)	Bi (ppm)	Ca (%)	Cd (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (%)	Fe (%)	Ga (ppm)	K (%)	La (ppm)	Li (ppm)	Mg (%)	Mn (ppm)	Mo (ppm)	Na (%)
NRM-01	5	6,36	<5	1	12	3,20	2	20	53	0,461	4,00	22	2,53	11	16	1,06	554	14	3,04
NRM-02	6	6,91	24	1	13	0,93	1	8	44	0,950	1,52	18	3,71	10	14	0,51	190	29	2,88
NRM-03	4	6,58	<5	1	10	1,22	1	16	29	0,632	3,64	18	3,14	26	13	0,66	433	18	3,26
NRM-04	5	7,05	65	1	22	4,11	1	24	33	1,193	4,87	12	2,31	11	21	1,11	401	14	2,87
NRM-05	4	7,85	10	1	6	0,83	<1	10	37	1,100	1,82	20	3,86	11	16	0,79	178	46	3,52
NRM-06	3	7,20	9	1	12	3,10	<1	11	28	0,621	1,76	19	3,11	16	19	0,89	188	17	3,70
NRM-07	4	6,47	<5	2	11	3,43	<1	18	29	0,592	3,51	20	1,93	16	17	0,83	406	67	3,00
NRM-08	3	7,35	6	1	10	3,15	<1	11	38	0,676	1,89	13	2,95	15	20	0,81	109	35	3,37
NRM-09	5	6,23	14	1	7	3,68	<1	5	32	1,520	1,15	2	4,50	20	12	0,70	93	929	2,21
NRM-10	5	5,70	16	<1	9	3,15	<1	4	39	1,366	1,16	8	3,83	22	12	0,48	97	715	1,88
NRM-11	4	6,66	7	1	6	2,32	<1	7	29	0,871	1,26	10	3,04	11	11	0,73	91	180	3,37
NRM-12	2	7,31	5	1	7	2,80	<1	8	30	0,559	1,48	17	3,05	13	15	0,93	117	627	3,33
NRM-13	4	6,16	9	1	10	2,84	<1	7	29	0,827	1,24	7	3,34	12	13	0,74	96	335	2,84
NRM-14	1	7,48	12	2	7	1,41	<1	17	44	0,272	2,90	14	2,67	11	10	1,04	176	63	3,37
NRM-15	4	7,40	31	2	8	0,75	<1	8	29	2,083	1,46	4	4,83	23	11	0,78	110	327	2,26
NRM-16	6	5,71	13	1	6	5,88	<1	8	31	1,545	1,68	13	2,57	14	8	0,47	155	56	2,73
NRM-17	4	6,22	31	1	11	2,42	<1	10	43	1,046	2,09	18	3,14	<10	12	0,63	187	120	2,88
NRM-18	2	5,83	14	<1	11	2,12	<1	6	38	0,680	1,56	4	2,64	12	10	0,44	165	46	2,67
NRM-19	4	6,62	8	1	8	2,39	<1	9	56	0,765	2,00	9	3,24	11	8	0,51	198	24	2,96
NRM-20	3	6,36	12	1	6	1,12	<1	10	47	0,826	1,77	16	2,95	12	13	0,68	111	16	3,28
NRM-31	<1	7,30	8	1	6	3,29	<1	10	33	0,791	1,97	11	2,54	12	13	0,91	92	85	2,75
NRM-32	2	6,62	15	1	<5	2,80	<1	8	41	0,711	1,62	10	3,04	14	11	0,60	141	175	3,01
NRM-33	9	4,93	5536	<1	20	0,25	22	128	56	2,441	6,91	2	2,03	<10	8	0,25	118	1176	0,28

Tabla 9.8: Resultados análisis litogeoquímica ICP-HF39 (digestión cuatro ácidos – lectura ICP-AES). Tabla 2 de 2.

Id.Muestra	Nb (ppm)	Ni (ppm)	P (ppm)	Pb (ppm)	S (%)	Sb (ppm)	Sc (ppm)	Sn (ppm)	Sr (ppm)	Ta (ppm)	Te (ppm)	Th (ppm)	Ti (%)	Ti (ppm)	Tl (ppm)	U (ppm)	V (ppm)	W (ppm)	Y (ppm)	Zn (ppm)	Zr (ppm)
NRM-01	<10	49	1283	<2	0,99	<5	13	<10	374	15	21	6	0,47	<10	<10	<10	87	<10	15	79	4
NRM-02	<10	39	583	20	0,44	<5	3	<10	308	<5	<10	<5	0,13	<10	<10	<10	48	<10	4	78	2
NRM-03	<10	31	1619	8	0,34	<5	13	<10	219	7	18	<5	0,35	<10	<10	<10	45	<10	23	70	11
NRM-04	<10	44	1029	8	2,38	<5	17	<10	374	11	21	<5	0,48	<10	22	<10	152	<10	16	100	6
NRM-05	<10	36	889	13	0,56	<5	5	<10	307	<5	15	<5	0,20	<10	<10	<10	54	<10	5	64	1
NRM-06	<10	43	889	<2	1,67	<5	5	<10	473	8	16	<5	0,22	<10	<10	<10	79	<10	7	48	1
NRM-07	<10	47	1350	6	1,36	<5	17	<10	347	10	24	<5	0,51	<10	<10	<10	107	<10	21	64	26
NRM-08	<10	49	818	<2	1,27	<5	4	<10	531	<5	15	<5	0,22	<10	14	<10	74	<10	7	40	2
NRM-09	<10	42	693	18	2,98	<5	4	<10	504	<5	11	<5	0,15	<10	<10	<10	69	15	7	56	2
NRM-10	<10	59	801	18	2,67	<5	3	<10	431	5	<10	<5	0,11	<10	15	<10	50	<10	6	52	2
NRM-11	<10	39	740	3	1,37	<5	4	<10	456	6	10	<5	0,14	<10	<10	<10	70	<10	4	35	2
NRM-12	<10	46	788	<2	1,43	<5	5	<10	530	11	10	5	0,19	<10	<10	<10	82	<10	6	50	2
NRM-13	<10	47	760	7	1,85	<5	4	<10	422	<5	12	<5	0,15	<10	<10	<10	68	<10	6	45	2
NRM-14	<10	37	696	7	0,24	<5	7	<10	401	6	19	<5	0,26	<10	<10	<10	91	<10	4	64	2
NRM-15	<10	34	2270	30	0,93	<5	9	<10	252	<5	12	6	0,22	<10	<10	<10	68	<10	9	64	3
NRM-16	<10	40	824	14	4,16	<5	3	<10	752	<5	13	<5	0,12	<10	<10	<10	50	<10	9	61	2
NRM-17	<10	47	741	7	1,38	<5	3	<10	418	<5	15	6	0,17	<10	<10	<10	71	<10	5	53	1
NRM-18	<10	40	517	13	1,48	<5	2	<10	359	<5	11	6	0,11	<10	<10	<10	51	<10	4	50	1
NRM-19	<10	62	555	8	1,48	<5	3	<10	413	8	11	<5	0,15	<10	<10	<10	59	<10	4	59	2
NRM-20	<10	42	674	5	0,45	<5	4	<10	355	8	13	<5	0,19	<10	15	<10	67	<10	5	43	2
NRM-31	<10	46	860	<2	1,35	<5	5	<10	487	<5	14	9	0,16	<10	<10	<10	85	18	5	32	2
NRM-32	<10	50	706	4	1,21	<5	4	<10	485	5	13	<5	0,16	<10	<10	<10	62	<10	6	60	2
NRM-33	<10	61	1273	1050	7,07	232	3	<10	105	15	16	<5	0,10	<10	<10	<10	59	50	4	7381	2

Tabla 9.9: Resultados análisis litogeoquímica ICP-FP12 (fusión alcalina con Na₂O₂ – lectura ICP-AES).

Id.Muestra	Al (%)	Ba (%)	Ca (%)	Cr (%)	Cu (%)	Fe (%)	Mn (%)	Mo (%)	S (%)	Si (%)	Sn (%)	Ti (%)
NRM-01	6,9	0,05	3,3	<0,01	0,45	4,0	0,06	<0,01	0,9	28,5	<0,1	0,5
NRM-02	7,2	0,05	1,0	<0,01	0,92	1,6	0,02	<0,01	0,4	31,9	<0,1	0,2
NRM-03	6,9	0,06	1,3	<0,01	0,63	3,7	0,05	<0,01	0,4	29,5	<0,1	0,5
NRM-04	7,5	0,04	4,2	<0,01	1,17	4,9	0,04	<0,01	2,2	25,3	<0,1	0,6
NRM-05	8,4	0,07	0,9	<0,01	1,10	1,9	0,02	<0,01	0,6	29,4	<0,1	0,3
NRM-06	7,7	0,07	3,1	<0,01	0,65	1,8	0,02	<0,01	1,4	29,1	<0,1	0,3
NRM-07	6,7	0,04	3,5	<0,01	0,59	3,5	0,04	<0,01	1,2	28,2	<0,1	0,7
NRM-08	7,9	0,05	3,4	<0,01	0,72	2,0	0,01	<0,01	1,1	29,9	<0,1	0,3
NRM-09	6,7	0,05	3,8	<0,01	1,46	1,2	0,01	0,10	2,6	28,0	<0,1	0,3
NRM-10	5,8	0,04	3,2	<0,01	1,31	1,2	0,01	0,07	2,3	29,6	<0,1	0,2
NRM-11	7,0	0,05	2,4	<0,01	0,88	1,3	0,01	0,02	1,2	30,0	<0,1	0,3
NRM-12	7,7	0,06	2,8	<0,01	0,54	1,5	0,01	0,06	1,2	30,1	<0,1	0,3
NRM-13	6,7	0,04	2,9	<0,01	0,79	1,3	0,01	0,04	1,7	30,0	<0,1	0,3
NRM-14	8,1	0,05	1,5	<0,01	0,27	2,9	0,02	<0,01	0,2	30,6	<0,1	0,4
NRM-15	8,1	0,07	0,8	<0,01	2,06	1,5	0,01	0,03	0,9	30,7	<0,1	0,3
NRM-16	5,8	0,04	5,9	<0,01	1,50	1,7	0,02	<0,01	3,7	26,4	<0,1	0,2
NRM-17	6,6	0,05	2,5	<0,01	1,03	2,1	0,02	0,01	1,2	29,2	<0,1	0,2
NRM-18	6,2	0,08	2,3	<0,01	0,70	1,7	0,02	<0,01	1,4	31,0	<0,1	0,2
NRM-19	7,0	0,04	2,5	<0,01	0,81	2,1	0,02	<0,01	1,3	32,6	<0,1	0,3
NRM-20	6,7	0,04	1,3	<0,01	0,82	1,8	0,01	<0,01	0,5	31,1	<0,1	0,3
NRM-31	7,8	0,06	3,3	<0,01	0,78	2,0	0,01	<0,01	1,5	29,1	<0,1	0,3
NRM-32	7,0	0,07	2,8	<0,01	0,71	1,7	0,02	0,02	1,3	29,6	<0,1	0,3
NRM-33	5,2	0,15	0,3	<0,01	2,42	6,9	0,01	0,13	6,3	28,8	<0,1	0,2

9.6. Anexo F: Análisis composicional de partículas minerales de Au y Ag, por microsonda electrónica

Los siguientes resultados son parte del informe sobre partículas minerales de Au que emitió B&F, enmarcado en el presente trabajo.

9.6.1. Muestra NRM-F-21

Se comprobó, mediante análisis efectuado con microsonda electrónica, que la partícula de oro detectada mediante microscopio óptico en el concentrado pesado de la muestra NRM-F-21 (Fig. 9.6), corresponde a partícula que contiene 86 % Au y 14 % Ag, como se indica en la Figura 9.7.

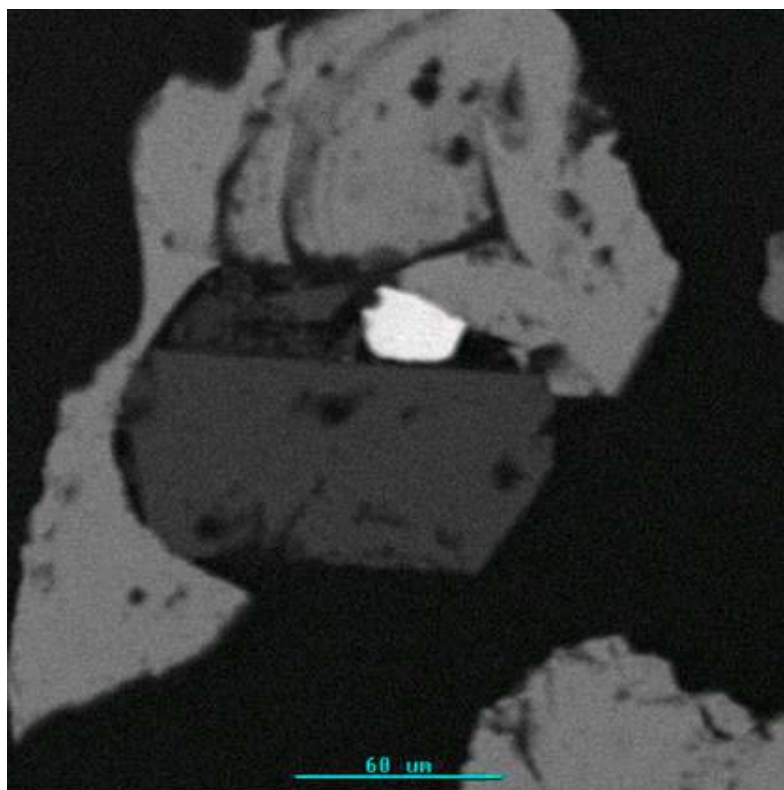
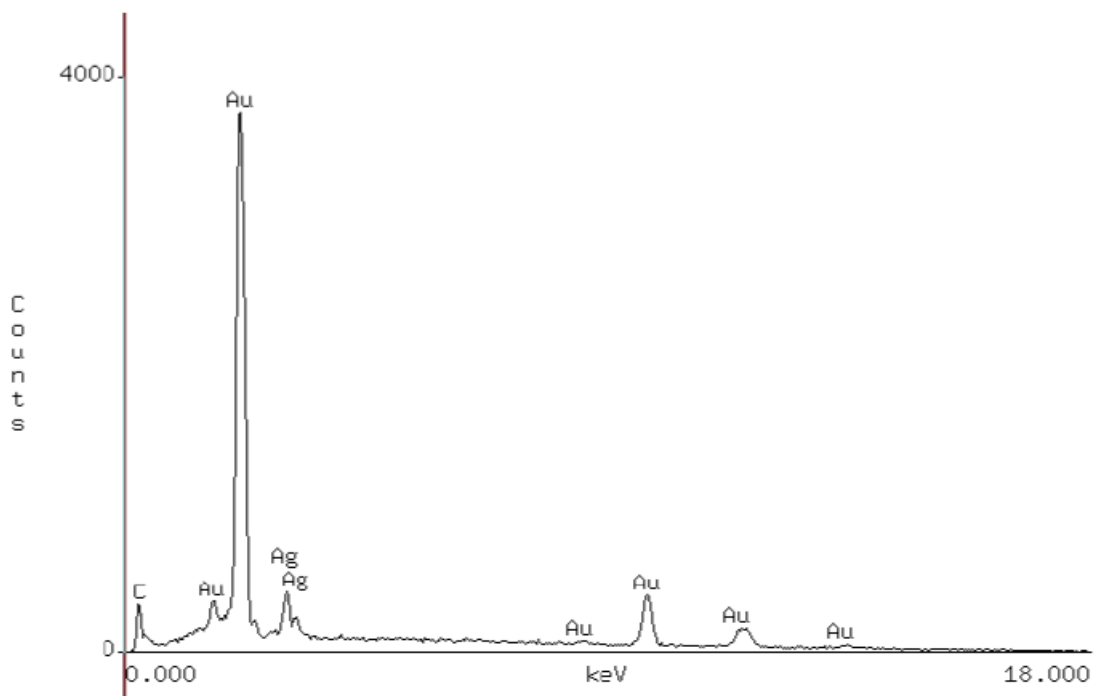


Figura 9.6: Imagen de Rayos X de la zona que contiene partícula de oro (blanca en el centro), que fue analizada con microsonda electrónica, determinándose una composición de 86 % Au y 14 % Ag. La línea azul mide 60 micrones de largo. Aumento 500 X. Muestra NRM-F-21



Accelerating Voltage: 20 KeV
 Live Time: 60 seconds

Take Off Angle: 28.7695°
 Magnification: 500

Element	k-ratio (calc.)	ZAF	Atom %	Element Wt %	Wt % Err. (1-Sigma)
Au	0.8394	1.024	76.97	85.92	+/- 0.66
Ag	0.0822	1.712	23.03	14.08	+/- 0.67
Total			100.00	100.00	

Figura 9.7: Gráfico de composición de partícula de oro nativo de la muestra NRM-F-21.

9.6.2. Muestra NRM-F-22

Mediante análisis efectuado con microsonda electrónica, se comprobó que la partícula observada en el concentrado pesado de la muestra NRM-F-22 (Fig. 9.8), que había sido originalmente detectada como “electrum” al microscopio óptico, corresponde a partícula de plata nativa, como se indica en la Figura 9.9.

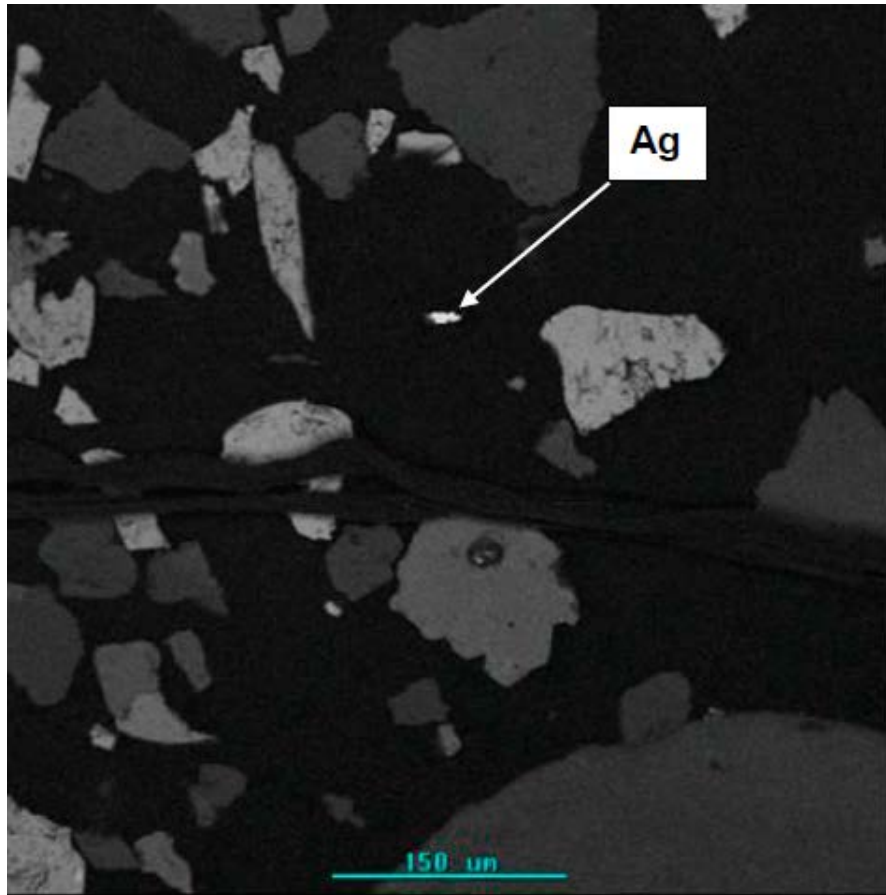
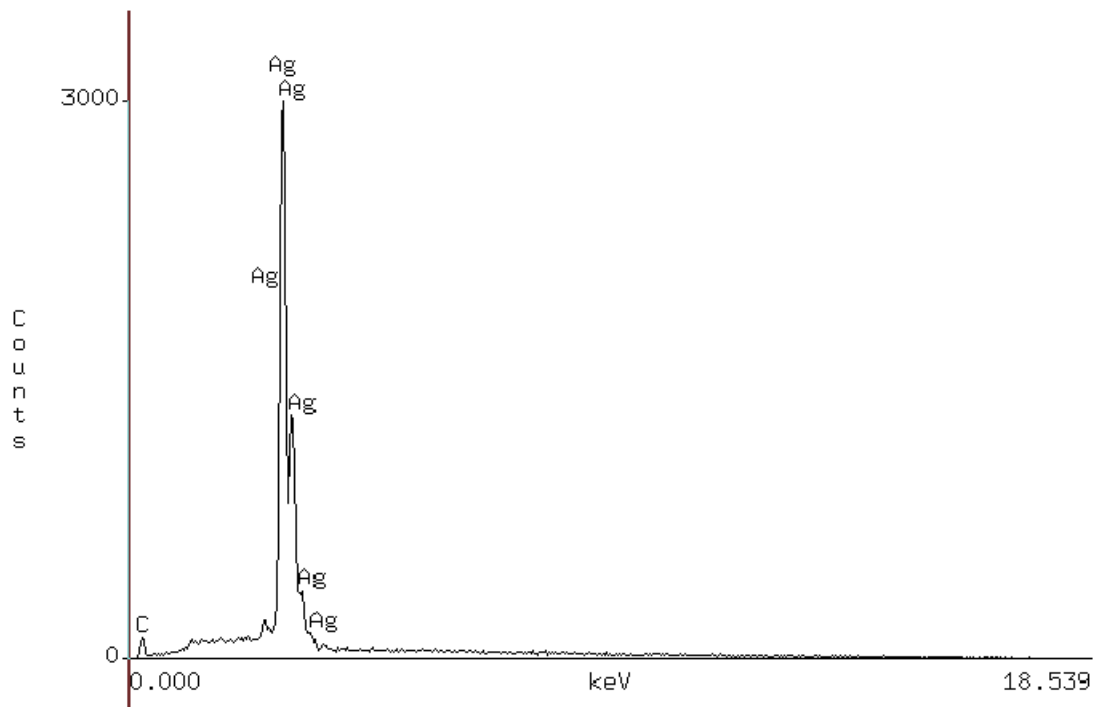


Figura 9.8: Imagen de Rayos X de la zona que contiene pequeña partícula de plata nativa libre, que fue analizada con microsonda electrónica. La línea azul mide 150 micrones de largo. Aumento 200 X. Muestra NRM-F-22.



Accelerating Voltage: 20 KeV
 Live Time: 60 seconds

Take Off Angle: 28.7695°
 Magnification: 1000

Element	k-ratio (calc.)	ZAF	Atom %	Element Wt %	Wt % Err. (1-Sigma)
Ag-L	0.9999	1.000	100.00	100.00	+/- 1.02
Total			100.00	100.00	

Figura 9.9: Gráfico de composición de partícula de plata nativa de la muestra NRM-F-22.