



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTOR EN GEOLOGÍA

**Caracterización Geológica-Estructural de las Manifestaciones
Hidrotermales del Distrito Minero Castaño Nuevo y su
Relación con el Magmatismo Gondwánico.
Cordillera Frontal de San Juan, Argentina.**

LIC. MARÍA AGUSTINA CÓCOLA.

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2020

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Geología, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otras. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en la cátedra de Geología Minera, dependiente del Departamento de Geología durante el período comprendido entre el 1 de abril de 2009 y el 2 de diciembre de 2019, bajo la dirección del Dr. Leonardo Strazzere (Profesor Adjunto de la cátedra de Geología Minera del Departamento de Geología, UNS e Investigador Asistente de CONICET) y la co-dirección del Dr. Diego M. Guido (Profesor Adjunto de la Cátedra de Geología de Yacimientos, FCNyM-UNLP e Investigador Independiente de CONICET).

Lic. María Agustina Cócola.

16 de Diciembre de 2019

Departamento de Geología

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el/..../..... , mereciendo la calificación de(.....)

“Caracterización geológica-estructural de las manifestaciones hidrotermales del Distrito Minero Castaño Nuevo, y su relación con el Magmatismo Gondwánico. Cordillera Frontal de San Juan, Argentina.” Lic. María Agustina Cócola

A mi compañero de todos los días, Yuin

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi director, Leonardo Strazzere, por su guía y apoyo incondicional. Por compartir con alegría cada logro y aceptar este reto. Por estar siempre presente, ofreciendo constantemente su conocimiento, experiencia y su dedicación. Por su enorme paciencia.

A mi co-director Diego Guido por su apoyo y sus consejos. Por aceptar ser parte de este proyecto y estar presente a la distancia. Por dedicar su tiempo para discutir y compartir ideas.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por haberme otorgado la beca de Finalización de Doctorado.

Al Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur por permitirme desarrollar mis tareas en esta institución, por facilitarme los equipos y los medios para lograr este objetivo. En particular quiero agradecer a las cátedras de Geología de Yacimientos y Levantamiento por facilitarme el uso de microscopios y lupas. A la cátedra de Geoquímica por colaborar con las muestras de difracción de rayos X. A la Dra. Ana Laura Rainoldi por su ayuda con el equipo de catodoluminiscencia. A la cátedra de Geología Minera, por recibirme y darme un lugar de trabajo hermoso, por compartir cada día conmigo.

A la Dra. Graciela Mas y al Dr. Leandro Bengochea quienes comenzaron con la idea de este trabajo y me dejaron ser parte de él.

A las Dras. Brígida Castro de Machuca y Nora Rubinstein y al Dr. Daniel Gregori, jurados de la presente tesis, por sus invaluable sugerencias y comentarios que enriquecieron el manuscrito presentado.

A la empresa Troy Resources Ltd. por facilitarme la logística y los datos para culminar este trabajo. Por permitirme trabajar en su empresa y formarme profesionalmente. En particular a Gustavo Sotarello, Irma Belvideri y Eduardo Machuca, quienes fueron los primeros en recibirme y darme una oportunidad en San Juan, por ser los mejores jefes y siempre hacerme sentir parte del equipo. A Augusto Mol y Peter Doyle por creer siempre en mí y procurar mi formación al mejor nivel. A todos mis compañeros de trabajo con quienes compartí muchos años de esfuerzo y felicidad. A Gabi e Irma, por ser mis amigas, mis compañeras y estar presentes en todo momento. Al Sota, por acompañarme al campo cada vez que tenía la oportunidad, por discutir conmigo cada idea y estar aún hoy presente. A Pedro Pablo, mi amigo, mi hermano, mi mentor, por compartir conmigo todos sus conocimientos y enseñarme que todo buen profesional es primero una buena persona.

Al grupo de trabajo del CET (Center of Exploration Targeting) de la Universidad de Western Australia, en particular a Steffen Hagemann y Jonh Miller, por su invaluable ayuda durante el trabajo de campo, por compartir conmigo sus conocimientos, las discusiones y asesoramiento. A Joao Orestes

Santos por la ayuda con las dataciones U/Pb. A Sebastián Grignola y Ana Fogliata por su ayuda y acompañamiento en los primeros trabajos de campo.

A todos mis amigos, muchos de los cuales me los dio esta hermosa profesión. En particular a ellas, mis amigas del alma Anita, Cele, Guada, Le, Orne, Nati y Vero, que estuvieron y están siempre. A Beto, por su amistad y ayuda con muchos de los cortes delgados. A Euge por su gran generosidad al compartir sus conocimientos, por su apoyo incondicional en todo momento y su hermosa amistad.

A la Dra. D’Annunzio, mi Celestita, no hubiera llegado hasta acá sin vos. Gracias por tu apoyo, tu ayuda, por estar en todo momento dándome fuerzas. Por leer cada una de las páginas que escribí sin tener por qué. Por discutir cada idea, por brindarme con generosidad y humildad todos tus conocimientos. Por cada sabio consejo que me diste. Por tu amistad incondicional y el amor inmenso que le ponés a todo lo que hacés. Que los mates juntas en las mañanas sean para siempre.

A mi familia, que estuvo siempre apoyándome para hacer cada una de las cosas que me propuse. Por aguantarme con paciencia en cada instancia, por dame mucha felicidad y amor. Gracias por creer siempre en mí más allá de los logros y fracasos, por transmitirme amor, seguridad. Son únicos e irremplazables.

A Yuin, mi gran compañero de vida. Gracias por tu eterna paciencia. Por estar al lado mío en cada paso de manera incondicional. Por tu apoyo y ayuda en cada cosa que me propuse, por ese perfeccionismo innato que hace más fácil nuestra vida. Por elegir compartir la vida juntos y hacer cada uno de mis días más hermoso. Por tu amor.

Lic. María Agustina Cócola.
Bahía Blanca, 16 de Diciembre de 2019

RESUMEN

El Distrito Minero Castaño Nuevo, localizado en el flanco oriental de la región morfoestructural de Cordillera Frontal de San Juan, constituye un sistema complejo donde dos tipos de depósitos epitermales de diferente naturaleza evolucionaron independientemente.

La geología del sector comprende una sucesión de rocas volcánicas y piroclásticas que evolucionó desde composiciones andesíticas a riódacíticas, entre los $272,6 \pm 2,3$ Ma y los $267,6 \pm 2,6$ Ma (edades U/Pb en circones). Las edades de estas rocas, en conjunto con las características petrográficas y geoquímicas permiten asignarlas a la Formación Vega de Los Machos, la cual representa rocas emplazadas en un arco magmático sobre corteza continental, activo en el Pérmico inferior a medio, y que forman parte de la sección inferior del Grupo Choiyoi.

En forma conjunta con la evolución de este vulcanismo, se desarrollaron dos sistemas hidrotermales cuyas características particulares permiten diferenciarlos. En primer lugar, se desarrolló un sistema vinculado a la circulación de fluidos ácidos, representado por texturas tipo *vuggy silica*, brechas freáticas con fragmentos de *vuggy*, y depósitos de sílice pulverulenta de tipo *steam heated*. Las asociaciones de alteración hidrotermal evidencian también el carácter ácido de los mismos, predominando dickita, NH_4 illita, jarosita, alunita y sílice. Este sistema presenta una disposición coincidente con un corredor estructural NO-SE, y contiene anomalías de Au, Bi, As, Hg. Estas manifestaciones son cortadas por venillas de cuarzo-turmalina y presentan una alteración sobrepuesta de turmalina-muscovita, en conjunto con anomalías de Cu-Mo. La edad estaría acotada por una serie de cuerpos intrusivos básicos irregulares, con edad U/Pb en circones de $270,6 \pm 3,0$ Ma.

El segundo sistema hidrotermal presente en el distrito minero es el que reviste mayor importancia. Constituye el resultado de la circulación de fluidos neutralizados, y se manifiesta como vetas epitermales de cuarzo/adularia con mineralización de Au (\pm Ag), de edades entre $267,0 \pm 2,2$ y $265,9 \pm 2,1$ (Ar/Ar en adularia). Las vetas principales se emplazan en fallas de tipo normal y de rumbo, con desarrollo de zonas de apertura donde se reconocieron seis eventos de relleno y brechamiento, que evidencian fluctuaciones en las velocidades de ascenso de los fluidos. Dichos eventos fueron agrupados en episodios de acuerdo a su relación con la mineralización. Asimismo, se registran variaciones en las temperaturas de formación del cuarzo que compone a cada uno de los eventos y se identifican procesos de enfriamiento normal, ebullición sutil y ebullición violenta. El proceso de ebullición constituye el mecanismo principal de precipitación de la mena en las vetas del distrito, caracterizando a los episodios sin- y post-mineralización. La alteración hidrotermal vinculada a estas estructuras es reducida espacialmente, y las asociaciones de minerales reflejan condiciones de pH neutro. La relación Ag/Au para estos sistemas vetiformes es inferior a 10, lo que permite catalogarlos como depósitos epitermales auríferos.

Las manifestaciones hidrotermales identificadas en el Distrito Minero Castaño Nuevo forman parte del Cinturón Metalogénico Gondwánico asociado al magmatismo del Grupo Choiyoi. Constituyen dos sistemas epitermales desarrollados en distintos niveles corticales, con anomalías moderadas de oro, cuyo estudio y correcto entendimiento son de gran importancia a escala local y regional.

ABSTRACT

The Castaño Nuevo Mining District, located on the eastern side of Cordillera Frontal, San Juan province, consists on a complex system where two different epithermal deposits with distinct characteristics evolved independently.

The studied area comprises volcanic and volcanoclastic rocks that were extruded between 272.6 ± 2.3 Ma and 267.6 ± 2.6 Ma (Zircon U/Pb dating). The ages of these rocks in addition to the petrological and geochemical characteristics, allow to assign this sequence to the Vega de los Machos Formation, which was interpreted as the result of a magmatic arc evolution developed during Lower to Medium Permian, and make up the lower part of the Choiyoi Group.

Together with the volcanism, two hydrothermal systems of different nature have evolved. The first one was developed from acidic fluids, and produced vuggy silica textures, phreatic breccias with vuggy fragments and steam heated-type alteration. Hydrothermal mineral assemblages also reflect fluid acidity, the main minerals associated are dickite, NH_4 illite, jarosite, alunite and quartz. The distribution of these features is controlled by a NO-SE structural corridor, where anomalous values of Au, Bi, As and Hg are registered. The previous manifestations are cut by quartz-tourmaline veinlets, overprinting the acidic clays and involving Cu-Mo anomalies. The age of the whole system has not been determined directly, but could be restricted by the age of the intrusion of irregular andesitic bodies (270.6 ± 3.0 Ma, zircon U/Pb).

The second hydrothermal system is the most important deposit of the Castaño Nuevo Mining District, and has been developed from neutral fluids, and is represented by quartz/adularia epithermal veins with Au (\pm Ag) mineralization also from Permian age (267.0 ± 2.2 and 265.9 ± 2.1 , adularia Ar/Ar dating). The main veins are related to normal and strike-slip faults, where, depending on the kinematics of each fault, open spaces are generated (jogs) where six events of infill and brecciation were identified. These events are related to fluid ascent velocity which fluctuated along time and was controlled by fracture opening speed. The events could be differentiated in terms of mineralization in three episodes pre-, sin- and post-mineralization. The main mechanism for gold precipitation on these veins is boiling, and each infill event could be classified as non-boiling, gentle boiling or flashing boiling event. Alteration assemblages related to these veins reflect the neutral conditions of the fluids and developed narrow halos surrounding the main structures. All veins show silver/gold ratios below 10, so quartz/adularia veins from Castaño Nuevo Mining District could be classified as gold-rich low sulfidation epithermal system.

Hydrothermal manifestations identified at Castaño Nuevo Mining District belongs to the Choiyoi Magmatic Belt related to arc and back-arc extensional tectonism. The epithermal systems identified were developed at different depths from the surface and could be derived from different magmatic sources. The study and correct understanding of this district has a relevant regional and local significance.

INDICE

Capítulo 1: Aspectos Generales	2
1.1. Introducción	2
1.2. Ubicación y vías de acceso	3
1.3. Reseña Histórica	5
1.4. Antecedentes geológico-mineros	7
1.5. Objetivos	12
Objetivo general	12
Objetivos específicos	13
1.6. Trabajos citados en el Capítulo 1	14
Capítulo 2: Marco Geológico Regional	18
2.1. Introducción	18
2.2. Geología Regional	19
2.2.1. Basamento metamórfico pre-Carbonífero	19
2.2.2. Unidades asociadas al Orógeno Gondwánico	22
2.2.2.1. Secuencias sedimentarias	23
2.2.2.2. Unidades ígneas	24
2.2.3. Unidades asociadas al Orógeno Andino	29
2.2.3.1. Unidades ígneas mesozoicas	29
2.2.3.2. Unidades ígneas y sedimentarias terciarias	30
2.2.3.3. Unidades sedimentarias cuaternarias	31
2.3. Estructuración regional	31
2.3.1. Estructuras Gondwánicas	32
2.3.2. Estructuras extensionales neopaleozoicas a mesozoicas	33
2.3.3. Estructuras compresionales cenozoicas	35
2.4. Depósitos de importancia económica asociados al Magmatismo Gondwánico en Cordillera Frontal y otros sectores	36
2.5. Trabajos citados en el Capítulo 2	39
Capítulo 3: Geología Local del Distrito Minero Castaño Nuevo	45
3.1. Introducción	45
3.2. Metodología	46
3.3. Resultados	49
3.3.1. Unidades litológicas identificadas	51
3.3.2. Litogeoquímica de las unidades	61
3.3.2.1. Clasificación química de las unidades	62
3.3.2.2. Diagramas discriminantes de ambientes tectónicos y filiación magmática	67
3.3.2.3. Diagramas multielementos	67

3.3.3. Edad de las Unidades del Distrito Minero Castaño Nuevo _____	70
3.3.3.1. Edad de la Unidad I _____	71
3.3.3.2. Edad de la Unidad III _____	72
3.3.3.3. Edad de los intrusivos básicos _____	73
3.3.4. Estructuras locales y su relación con la estructuración regional _____	74
3.4. Discusión de los Resultados y Conclusiones _____	76
3.5. Trabajos citados en el Capítulo 3 _____	81
Capítulo 4: Geofísica _____	85
4.1. Introducción _____	85
4.2. Antecedentes _____	86
4.3. Metodología _____	88
4.4. Resultados _____	92
4.4.1. Procesamiento de datos magnéticos _____	92
4.4.1.1. Campo Magnético Total _____	93
4.4.1.2. Campo Magnético Total Reducido al Polo _____	94
4.4.1.1. Señal Analítica del Campo Magnético Total _____	95
4.4.1.2. Derivada vertical del Campo Magnético Total _____	96
4.4.1.1. Mapa de Complejidad Estructural _____	97
4.4.2. Procesamiento de Datos Radiométricos _____	100
4.5. Discusión y Conclusiones _____	102
4.6. Trabajos citados en el Capítulo 4 _____	107
Capítulo 5: Imágenes Satelitales _____	110
5.1. Introducción _____	110
5.2. Antecedentes _____	112
5.3. Metodología _____	113
5.4. Resultados _____	116
5.4.1. Combinaciones de Bandas (RGB) _____	116
5.4.2. Cocientes y operaciones entre bandas _____	118
5.4.3. Aplicación de los Índices de Ninomiya _____	120
5.4.4. Clasificación supervisada SAM _____	125
5.5. Discusión y Conclusiones _____	129
5.6. Trabajos citados en el Capítulo 5 _____	132
Capítulo 6: Sistemas Hidrotermales _____	136
6.1. Introducción _____	136
6.2. Metodología _____	137
6.3. Depósitos asociados a vetas de cuarzo-adularia _____	140
6.3.1. Descripción general. _____	140

6.3.2. Estilo Estructural. _____	143
6.3.3. Caracterización del relleno de las vetas _____	149
6.3.3.1. Eventos y pulsos de relleno _____	149
6.3.3.2. Microtermometría de Inclusiones Fluidas _____	158
6.3.4. Distribución y zonación de contenidos metálicos _____	163
6.3.5. Distribución de las alteraciones hidrotermales vinculadas al sistema de vetas _____	169
6.4. Depósitos diseminados asociados a cuerpos de brechas y sílice residual _____	171
6.4.1. Descripción general _____	171
6.4.2. Descripción de los cuerpos _____	172
6.4.3. Distribución y zonación de los contenidos metálicos _____	177
6.4.4. Distribución de las alteraciones hidrotermales _____	179
6.5. Discusión e integración de los resultados _____	185
6.5.1. Sistema de vetas de cuarzo/adularia _____	186
6.5.2. Sistemas de brechas y sílice residual _____	191
6.6. Trabajos citados en el Capítulo 6 _____	194
Capítulo 7: Evolución del Distrito Minero Castaño Nuevo y Consideraciones Finales ____	199
7.1. Evolución del Distrito Minero Castaño Nuevo _____	199
7.2. Consideraciones finales y Conclusiones generales _____	202
Anexo I Localización de muestras en vetas Dios Protege y San Agustín _____	205
Anexo II Matrices de Pearson _____	208

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Detalle de los sondajes realizados en la zona de estudio.	11
Tabla 3.1. Límites de detección de los análisis efectuados en el laboratorio ALS Global. Datos tomados de https://www.alsglobal.com/en/services-and-products/geochemistry/geochemistry-testing-and-analysis/whole-rock-analysis-and-lithochemistry	47
Tabla 3.2. Resultados de los análisis litogeoquímicos sobre las muestras del Distrito Minero Castaño Nuevo. ...	63
Tabla 3.3. Datos U/Th/Pb SHRIMP en circones de las rocas del Distrito Minero Castaño Nuevo.	70
Tabla 5.1. Tabla comparativa detallando las bandas de cada tipo de imagen (VNIR/SWIR) y sus respectivos rangos de longitudes de onda y resolución, para Landsat 8-OLI, ASTER y WorldView 3.....	110
Tabla 5.2. Índices Mineralógicos de Ninomiya para la región del SWIR, de acuerdo a los propuesto por Ninomiya (2003, 2004).	122
Tabla 5.3. Índices Mineralógicos de Ninomiya para la región del TIR, de acuerdo a los propuesto por Ninomiya y Fu (2001, 2002).	124
Tabla 6.1. Parámetros espectrales calculados para las muestras del Distrito Minero Castaño Nuevo, de acuerdo a los propuesto por Pontual (2010) y Sonntag et al. (2012). <i>W</i> = <i>wavelength position</i> (valor de longitud de onda de la posición del rasgo de absorción); <i>D</i> = <i>relative absorption depth</i> (profundidad del rasgo de absorción en determinado valor de longitud de onda); <i>R</i> = <i>reflectance</i> (valor de reflectancia en determinado valor de longitud de onda).....	139
Tabla 6.3. Parámetros de contenidos metálicos para las vetas en superficie del Distrito Minero Castaño Nuevo.	164

Tabla 6.4. Parámetros de contenidos metálicos para las vetas en profundidad a partir de datos de sondajes. 164

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.a. Ubicación del Distrito Minero Castaño Nuevo y vías de acceso desde la ciudad de San Juan. b. Imagen satelital GeoEye del sector estudiado con las pertenencias mineras demarcadas.....	4
Figura 1.2.a. Fotografía de archivo de la familia Allen mostrando los cilindros de cianuración (tomado de Benavídez de Albar Díaz, 2007a). b. Fotografía de las ruinas de la mina actualmente.....	6
Figura 1.3.a. Casa principal inmediatamente al lado de la planta de procesamiento donde habitaba la familia Allen. b. John Allen en una bocamina de Castaño Nuevo con visitantes, fotografía del archivo privado de la familia Allen, en Benavídez de Albar Díaz (2007a).....	7
Figura 1.4. Restos de la maquinaria de principio de siglo XX instalada en Castaño Nuevo. Las piezas de fundición provienen en su mayoría de Inglaterra y Australia. El movimiento de cada una de las piezas era impulsado por la fuerza del agua, lograda a partir de un circuito de canales y compuertas, desviados del curso principal del Río Castaño.....	9
Figura 1.5. Localización de los sondajes realizados por las empresas Sonoma Resources, Tenke Mining Corp. y Troy Resources Ltd.....	12
Figura 2.1. a. Extensión y ubicación de la Cordillera Frontal en Argentina. b. Geología simplificada de la Cordillera Frontal (modificado de Caminos, 1979).....	18
Figura 2.2. Mapa geológico regional modificado de Heredia et al. (2002).....	20
Figura 2.3. Columna estratigráfica generalizada de Cordillera Frontal. Modificado de Sato et al. (2015).....	21
Figura 2.4. Afloramientos asociados a la Orogenia Gondwánica en Cordillera Frontal (en gris medio). En los recuadros punteados se muestra la localización de las columnas representadas en la figura 2.5.....	22
Figura 2.5. Relaciones cronoestratigráficas entre las unidades que integran al Grupo Choiyoi en la Cordillera Frontal de sur a norte (a. Cordón del Portillo, Strazzere et al., 2016 y Strazzere y Gregori, 2011; b. sector Castaño Nuevo, Cegarra et al., 1998; c. área entre las Caletas y Calingasta, Rocher et al., 2015; d. entre los ríos Manrique y Calingasta, Caballé, 1986; e. sector Castaño Viejo, Rodríguez Fernández et al., 1996b; f. en el Cordón de Colangüil, Sato et al., 2015 y Sato y Llambías, 1993). En líneas punteadas contactos difusos, en línea rectas horizontales contactos netos, en líneas negras con ángulo interdigitaciones y en líneas onduladas discordancias.....	27
Figura 2.6. Disposición de horst y hemi-grabens, limitados por fallas normales, previa a la deformación de la Orogenia Andina (Modificado de Heredia et al. 2002).....	34
Figura 2.7. Principales depósitos asociados a los diferentes estadios de evolución del CMB, agrupados según su tipo.....	37
Figura 2.8. Cinturones magmáticos gondwánicos en el sector central de Argentina, su contexto tectónico y depósitos asociados. Modificado de Zappettini y Chernicoff (2018).....	38
Figura 3.1. Ubicación de las muestras analizadas por litogeoquímica (rombos amarillos) y aquellas seleccionadas para dataciones U/Pb (círculos rojos).....	49
Figura 3.2. Perfil esquemático mostrando las relaciones entre las diferentes litologías identificadas, sobre imagen satelital Geoeye sobreimpuesta sobre un modelo 3D de la topografía del área.....	50
Figura 3.3. a. Vista en dirección al este donde se observa la estratificación gruesa de la Unidad I y la relación concordante con la unidad suprayacente (II). b. Vista hacia el sur donde nuevamente se observa a estratificación grosera (líneas punteadas amarillas) de la Unidad I. c. Detalle de los fragmentos líticos (FL) de volcanitas aplanados y orientados. d. Fotografía de la Unidad I en el sector central del área de estudio con fuerte alteración asociada a fracturas.....	51
Figura 3.4. Unidad I. a y b. Fotomicrografía sin/con analizador de cristal de plagioclasa (Pl) euhedral, fracturado	

y alterado a calcita (Ca) e illita (Ill), con agregados de epidoto (Ep). c y d. Fotomicrografía sin/con analizador de fragmento lítico (FL) de volcanita (marcado con línea punteada amarilla) completamente argilizado y cloritizado, cristales redondeados de cuarzo (Qz) con engolfamientos. e y f. Fotomicrografía sin/con analizador de fragmento lítico (FL) de cuarcita (?) con clorita (Cl) en fracturas.....	52
Figura 3.5. Columna esquemática de las facies que componen la Unidad II. a. Brecha polimíctica mátrix sostén, con leve silicificación. b. Brecha monolitológica monomíctica clasto sostén con fragmentos de hasta un metro de la Unidad I. c. Toba cristalolítica con estratificación fina, fuertemente argilizada y con pátinas de óxidos de hierro. d. Fotografía con vista hacia el este, sobre el margen oriental del río Castaño mostrando la concordancia entre las unidades I y II. e. Toba fina con intensa alteración argílica y silicificación.....	53
Figura 3.6. Unidad II. a. Facies de tobas finas en la base de la Unidad II. b. Detalle de la estratificación fina en un afloramiento fuertemente silicificado hacia el techo de la Unidad II.....	54
Figura 3.7. Unidad II. a y b. Fotomicrografía sin/con analizador de fragmentos líticos (FL) y algunos cristaloclastos (Xc) reemplazados completamente por minerales arcillosos, sobre el borde superior izquierdo se distingue un cristaloclasto de cuarzo (Qz). c y d. Fotomicrografía sin/con analizador de cristaloclastos alterados inmersos en una mátrix fina, conformada enteramente por cuarzo microcristalino y arcillas indiferenciables bajo microscopio óptico. e y f. Fragmentos líticos de diferente composición, evidenciados por la alteración diferencial que los afecta.....	55
Figura 3.8. a. Vista hacia el SO dentro de una quebrada coincidente con una falla que pone a la misma altitud a las Unidades II y III. Como puede verse sobre el flanco SE, la Unidad II fuertemente alterada subyace concordantemente a la Unidad III. b. Vista hacia el sur donde se confirma la relación entre ambas unidades. c. Detalle de afloramiento de la Unidad III donde se observa la intensa fracturación que la afecta. d. Contacto entre unidades.....	56
Figura 3.9. Unidad III. a y b. Fotomicrografía sin/con analizador de cristales de plagioclasa (Pl), uno de ellos fragmentado y anfíbol (An) completamente reemplazado por clorita. Se aprecia la pasta vítrea con incipiente pseudofluidalidad y algunos vitroclastos (Vc). c. y d. Fragmento de esferulita, evidencia de desvitrificación en la pasta. e. y f. Fragmentos líticos (FL) con textura porfírica con alteración argílica en la pasta.....	57
Figura 3.10. a. Diques riolíticos/riodacíticos emplazados en la Unidad I, observados en la Quebrada de Chile. b. Detalle del afloramiento del dique donde se aprecia el borde fino en tonalidades verdosas, en contraste con el centro rojo intenso más porfírico. c. Imagen Bing mostrando la continuidad del sistema de diques riolíticos/riodacíticos (marcados en amarillo) desde Manrique hasta Castaño Viejo. Se identifica con un punto amarillo la localización de las imágenes a y b.....	58
Figura 3.11. a y b. Fotomicrografía sin/con analizador de cristales de plagioclasa (Pl) con macla polisintética con óxidos de hierro (FeOx) como pátinas, rodeando cristales, en los planos de macla y rellenando fracturas intracristalinas. Se observan también un cristal de feldespato alcalino (FK) con borde de reacción y un pequeño cristal de cuarzo (Qz). c y d. Fotomicrografía sin/con analizador de gran cristal de cuarzo fragmentado, con engolfamientos, inmerso en una pasta conformada por pequeñas tablillas de plagioclasa.....	59
Figura 3.12.a. Afloramiento reducido dentro de la Unidad II de los cuerpos oscuros. b. Detalle de muestra de mano de dichos cuerpos, donde se aprecia la textura porfírica.....	60
Figura 3.13. a y b. Microfotografía sin/con analizador de cristal de plagioclasa con macla polisintética y forma euahedral.....	60
Figura 3.14. a. Fotografía de la veta San Agustín, emplazada en la Unidad I. b. Cuerpos de brechas asociados a la Unidad II, con fuerte alteración hidrotermal y cemento de sílice criptocristalina grisácea.....	61
Figura 3.15. Diagramas de clasificación de rocas volcánicas utilizando elementos mayores. a. Diagrama SiO ₂ vs. K ₂ O de Ewart (1982). b. Diagrama de clasificación SiO ₂ vs. K ₂ O + Na ₂ O (Le Bas et al., 1986). La muestra correspondiente a la Unidad II está fuera del rango de los diagramas, es por esto que no fue posible graficarla. Óxidos mayoritarios en porcentaje en peso.....	64
Figura 3.16. Diagramas de clasificación de rocas volcánicas utilizando elementos minoritarios. a. Diagrama SiO ₂ vs. Zr/TiO ₂ . b. Diagrama de clasificación Zr/TiO ₂ vs. Nb/Y (Winchester y Floyd, 1977).....	66
Figura 3.17. a. Diagrama AFM de Irvine y Baragar (1971) mostrando la tendencia calcoalcalina de la secuencia	

analizada. b. Diagrama Ta/Yb vs. Th/Yb de Pearce (1983) donde la totalidad de las muestras se ubica en el campo de la serie shoshonítica. c. Diagrama Zr vs. Y de MacLean y Barret (1993) mostrando también la tendencia calcoalcalina de las muestras. d. Diagrama Th-(Hf/3)-Ta de Wood (1980); CAB: calc-alkaline basalts; IAT: island-arc tholeiites; NMORB: normal mid-ocean ridge basalts; WTP: within-plate tholeiite; WPA: within-plate alkalic. e. Diagrama Rb vs. Nb+Y de Pearce et al. (1984); VA: volcanic arc granites; Syn-Col: syn-collision granites; WP: within-plate granites; OR: ocean-ridge granites. f. Diagrama Ta/Hf vs. Th/Hf de Schandl y Gorton (2002); ACM: active continental margins; WPVZ: within-plate volcanic zone. Óxidos mayoritarios en porcentaje en peso, elementos trazas en ppm.....	68
Figura 3.18. a. Diagrama multielementos normalizado a condrito de Thompson (1982). b. Diagrama de elementos de las tierras raras normalizado a condrito de Nakamura (1972).....	69
Figura 3.19. a. Población de circones analizados de la muestra D-316. b. Detalle ampliado del sector D4 demarcado en la figura anterior. c. Edad de concordia para la muestra D-316. d. Edad promedio.....	71
Figura 3.20. a. Población de circones analizados de la muestra B-516. b. Detalle ampliado del sector B6 demarcado en la figura anterior. c. Edad de concordia para la muestra B-516. d. Edad promedio principal de la muestra B-516.....	72
Figura 3.21. a. Población de circones analizados de la muestra A-216. b. Detalle ampliado del sector A8 demarcado en la figura anterior. c. Edad de concordia para la muestra A-216. d. Edad promedio principal de la muestra A-216.....	73
Figura 3.22. a. Población de circones analizados de la muestra C-416. b. Detalle ampliado del sector C5 demarcado en la figura anterior. c. Edad de concordia para la muestra C-416. d. Edad promedio principal de la muestra C-416.....	74
Figura 3.23. Imagen GeoEye del área de trabajo con las estructuras principales identificadas y elementos lineales utilizados para la identificación de las mismas (vetas y diques). Los puntos azules muestran la localización de las fotografías citadas en este apartado.....	75
Figura 3.24. a. Afloramiento de las volcánicas de la Unidad I donde se observa el fuerte diaclasamiento. b. Fotografía de fractura rellena por magnetita con halo de óxidos de hierro, cortada por venilla de cuarzo, evidenciando las relaciones temporales entre las distintas fracturas. c. Plano NE de falla donde se interrumpe el sistema vetiforme en superficie. Se marcan en amarillo la dirección de las estrías y el escalonamiento, la flecha amarilla indica el sentido de movimiento. d. Plano de falla con estrías horizontales en la quebrada de Las Mellizas. e. Brecha de falla. f. Afloramiento de la Unidad III mostrando la intensa fracturación.....	77
Figura 3.25. Mapa Geológico del Distrito Minero Castaño Nuevo.....	80
Figura 4.1. Magnetometría con IP/RES (cargadores). Tomada de informe interno de la empresa Tenke Mining Corp (2005).....	87
Figura 4.2. Magnetometría Terrestre. Tomada de informe interno de la empresa Tenke Mining Corp (2005).....	88
Figura 4.3. Mapa de líneas de vuelo sobre el Distrito Minero Castaño Nuevo mostrando las altitudes relativas levantadas por el radar altimétrico.....	89
Figura 4.4. Aeronave utilizada para el relevamiento en el Distrito Minero Castaño Nuevo.....	90
Figura 4.5. Diagrama de flujo mostrado las imágenes generadas a partir de los datos aeromagnéticos y radiométricos.....	93
Figura 4.6.a. Mapa de Campo Magnético Total obtenido durante el relevamiento aeromagnético, el recuadro negro marca la localización de la imagen 4.6.b. b. Detalle del sector del Distrito Minero Castaño Nuevo, superponiendo la imagen de Campo Magnético Total sobre imagen satelital Geoeye. Se superponen además las estructuras mapeadas presentadas en el Capítulo 3 a modo de referencia.....	94
Figura 4.7.a. Mapa de Campo Magnético Total Reducido al Polo (RTP) continuado, el recuadro negro marca la localización de la imagen 4.7.b. b. Detalle del sector del Distrito Minero Castaño Nuevo, superponiendo la imagen de RTP sobre imagen satelital Geoeye.....	95
Figura 4.8. a. Mapa de Señal Analítica (SA) del Campo Magnético Total, el recuadro negro marca la localización de la imagen 4.8.b. b. Detalle del sector del Distrito Minero Castaño Nuevo, superponiendo la imagen de SA sobre	

imagen satelital Geoeye.....	96
Figura 4.9. a. Mapa de Primera Derivada Vertical (1VD) del Campo Magnético Total, el recuadro negro marca la localización de la imagen 4.9.b. b. Detalle del sector del Distrito Minero Castaño Nuevo, superponiendo la imagen de 1VD sobre imagen satelital Geoeye.....	97
Figura 4.10. a. Mapa de Segunda Derivada Vertical (2VD) del Campo Magnético Total, el recuadro negro marca la localización de la imagen 4.10.b. b. Detalle del sector del Distrito Minero Castaño Nuevo, superponiendo la imagen de 2VD sobre imagen satelital Geoeye.....	98
Figura 4.11. a. Imágenes generadas durante el procesamiento del mapa de RTP del sector estudiado. b. Mapa de Complejidad Estructural generado a partir del Mapa de Campo Magnético Total Reducido al Polo, aplicando el algoritmo del CET Grid Analysis. c. Mapa de Complejidad Estructural sobre imagen Geoeye del Distrito Minero Castaño Nuevo. Se identifican las estructuras mapeadas y presentadas en el Capítulo 3 a modo de referencia.....	99
Figura 4.12. Mapas radiométricos de concentraciones de: a. Potasio. b. Torio. c. Uranio. Mapas de cocientes entre elementos: d. K/Th. e. K/U. f. U/Th.....	101
Figura 4.13. Mapa de cuentas totales.....	102
Figura 4.14: Mapas ternarios de concentraciones de K, Th y U. a. Imagen RGB, donde R=Potasio, G=Uranio, B=Torio. b. Imagen CMY, donde C=Potasio, M=Torio, Y=Uranio.....	104
Figura 4.15. a. Imagen de Campo Magnético Total Reducido al Polo, donde se identifican 3 Dominios Litomagnéticos, delimitados por líneas punteadas blancas. b. Mapa de señal analítica donde se marcan con líneas punteadas blancas las estructuras interpretadas. En el diagrama de rosas se vuelcan los datos de las orientaciones de las estructuras interpretadas.....	106
Figura 5.1. Comparación entre bandas de imágenes Landsat 8-OLI, ASTER y WorldView 3 en el rango del espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (modificado de Ye et al. 2017).....	111
Figura 5.2. Compuesto Crosta RGB (AR; AR + FE; FE) con inversión de tonalidades en el que se aprecian las principales clases diferenciadas por PCA. Tomado de Delendatti (2003).....	114
Figura 5.3. Firmas espectrales de los minerales de alteración más frecuentes, adaptadas a la resolución espectral de ASTER. Se marcan con franjas de colores el rango de longitud de onda que abarca cada banda donde se produce la absorción característica de cada especie mineral.....	115
Figura 5.4. a. Combinación 321 mostrando los sectores alterados en Castaño Nuevo sin diferenciación. b. Combinación 468 donde pueden discriminarse las alteraciones argílicas en rosa y la silicificación en blanco. c. Combinación 461 donde se observan tonalidades oscuras para las unidades máficas y color verde brillante para las unidades más félsicas. d. Combinación 731 donde se identifican de igual modo que en la anterior las distintas unidades, y se distinguen además diferentes alteraciones en el sector de Castaño Nuevo.....	117
Figura 5.5.a. Resultado del cociente 2/1 en el que resaltan en color blanco aquellos sectores con bajo contenido de Fe ³⁺ . b. Cociente de bandas 4/6 permite una clara determinación de las zonas con alteración argílica de aquellas con silicificación o alteración filica. c. Operación entre bandas (5+7)/6 mostrando en negro los sectores con alteración filica. d. Operación entre bandas (4+6)/5 mostrando en blanco los sectores argilizados.....	119
Figura 5.6.a. Cociente (4x7)/(8x8) discriminando claramente el sector silicificado en negro, de aquel con alteración argílica en blanco. b. Combinación RGB de los cocientes 4/5, 4/6, 4/7 mostrando en este caso la silicificación en tonos rojizos. c. Combinación RGB de cocientes 4/5, 4/6, 3/1, donde en amarillo se discriminan los sectores con alteración argílica, en azul oscuro las zonas silicificadas y con alteración filica, en verde oscuro las andesitas y en azul medio los diques riolíticos/riodacíticos y el Plutón Manrique. d. Combinación RGB de cocientes 3/1, 4/5, 4/7.....	120
Figura 5.7. Aplicación de índices de Ninomiya. a. Índice de minerales que contienen oxidrilos, utilizando la variante OHL _a . b. Índice de minerales que contienen oxidrilos, utilizando la variante OHL _b . c. Índice de minerales del grupo del caolín KLI. d. Índice de alunita (ALI). e. Índice de calcita (CLI). Figura 3.8. f. Índice de cuarzo (QI). g. Índice de carbonatos (CI). h. Índice de sílice total (SI).....	123
Figura 5.8. Comparación entre las diferentes técnicas aplicadas sobre la imagen ASTER, en el sector del Distrito	

Minero Castaño Nuevo. Combinaciones de bandas RGB: 321, 468, 461, 731. Cocientes y operaciones entre bandas: 2/1, 4/6, (5+7)/6, (4+6)/5, (4/7)*(8*8). Combinaciones RGB de cocientes: R=4/5 G=4/6 B=4/7, R=4/6 G=4/7 R=3/1, R=3/1 G=4/5 B=4/7. Índices de Ninomiya: OHI _a y OHI _b (índices de minerales que contienen OH ⁻), KLI (índice de la caolinita), ALI (índice de la alunita), CLI (índice de la calcita), QI (índice del cuarzo), CI (índice de carbonatos), SI (índice de contenido total de sílice).....	126
Figura 5.9. a. Espectros obtenidos mediante el uso de un espectrómetro portátil Terraspec® 4Hi-Res. b. Los mismos espectros re-muestreados a la resolución ASTER. En rosa se marcan las absorciones asociadas a la región del espectro de la banda 6, en amarillo las absorciones asociadas a la banda 5 y en verde las relacionadas a la banda 8.....	127
Figura 5.10. Clasificación supervisada SAM aplicada sobre el Distrito Minero Castaño Nuevo. a. Distribución de minerales con absorciones en el rango del espectro electromagnético de las bandas 5 y 6. b. Distribución de minerales con amonio. c. Distribución de minerales con absorciones en el rango del espectro electromagnético de las bandas 7 y 8. d. Distribución de minerales del grupo de la turmalina.....	128
Figura 6.1. Muestra de la veta San Agustín mostrando la sucesión de pasos llevados a cabo para la descripción y análisis mineralógico y textural. Selección del sector de la muestra a analizar, confección de cortes, estudio de las secciones bajo lupa, microscopio óptico y equipo de catodoluminiscencia.....	137
Figura 6.2. Localización de las vetas principales del Distrito Minero Castaño Nuevo. En verde se encuentran los afloramientos de las andesitas de la Unidad I (en verde). En rojo la traza de las vetas en superficie y sus respectivos nombres.....	140
Figura 6.3. a. Fotografía NNE donde se observa la corrida de la veta Dios Protege y los piques de antiguas labores. b. Detalle de afloramiento de la veta Dios Protege. c. Detalle de las labores.....	141
Figura 6.4.a. Bocamina de una de las labores de la veta San Pedro. b. Detalle de la veta de escaso espesor en superficie. c. Interior de una de las labores.....	142
Figura 6.5. Fotografías de la veta San Agustín en el sector central. a. Vista al sudeste del sector donde se bifurca la veta. b. Detalle del mismo sector. c. Afloramiento del sector norte donde los espesores se incrementan.....	143
Figura 6.6. a. Estructura principal marcada con líneas gruesas amarillas, con delgadas venillas asociadas (en líneas punteadas). La disposición de las mismas permite establecer el sentido del movimiento, marcado con flechas amarillas. b. Inflexión con desarrollo de venilleo intenso evidenciando una zona de apertura delimitada con líneas rectas amarillas, el sentido del movimiento se indica con las flechas amarillas. c. Estrías sobre plano de falla al techo de la veta, la línea delgada indica la horizontal, mientras que la línea más gruesa corresponde a la inclinación de las estrías. d. Esquema de la estructura de la veta Dios Protege, se localizan con puntos y letras las fotografías que componen el resto de la figura. Las flechas negras pequeñas indican las zonas de apertura y de cierre. e. Afloramiento en el sector norte de la estructura principal (traza completa y venillas menores asociadas (traza con puntos). f. Cruce de estructuras en el sector central sobre antiguas labores desmoronadas. Con trazo completo se demarca la estructura principal y en punteado la estructura NO-SE. G. Desarrollo de intenso venilleo (líneas punteadas) en torno a la veta principal (línea completa). En los diagramas estereográficos realizados con FaultKin 7 (Allmendinger, 2017) se representan las venillas con líneas finas, mientras que la estructura principal de representa con trazo grueso.....	145
Figura 6.7. a. Mapa de afloramientos (en rojo) de la veta San Pedro. Con flechas negras se disponen los ejes de extensión y compresión calculados. En el estereograma se muestran los planos de falla y estrías medidos en el interior de las labores. b. Fotografía hacia norte mostrando la distribución de la veta San Pedro. c y d. Fotografías de detalle de los afloramientos donde puede apreciarse el espesor reducido y el sentido del movimiento de la estructura. e. Fotografía de la estructura en una labor sobreveta donde puede apreciarse el incremento de espesor.....	147
Figura 6.8. a. Mapa de superficie de la veta San Agustín, en verde se representan los afloramientos de las andesitas de la Unidad I. b. y c. Estructura principal con venilleo asociado evidenciando la componente dextral de la fractura. d. y e. Venilleo desarrollado en los sectores de apertura donde la veta se abre en dos prolongaciones. f. Bocamina en el sector sur, donde se aprecia el escaso espesor de la veta San Agustín en este tramo.....	148

Figura 6.9: Esquema de eventos generalizado para el conjunto de vetas que conforman el Distrito Minero Castaño Nuevo, mostrando su temporalidad y relaciones de corte. Paragénesis mineral para los distintos eventos establecidos.....	150
Figura 6.10. a. Muestra del sondaje CASS-10-09, donde se observan venillas de E1 (en amarillo) cortadas por venillas de E3. Se observa también que E1 corta a un venilleo previo bandeado pero que no fue registrado dentro de las vetas principales. b y c. Fotomicrografía con y sin analizador de una muestra de superficie de la veta Dios Protege, donde se observa un fragmento de roca de caja cortado por delgadas venillas de E1, y a su vez brechado por E2.	151
Figura 6.11.a. Crecimiento de cristales de adularia a partir de las paredes de un fragmento de roca de caja. b. Afloramiento de la veta Dios Protege donde se aprecia la textura en cocarda con grandes cristales de adularia rodeando a los fragmentos. c. Fotografía de una de las labores subterráneas sobre la veta San Agustín donde se observa este mismo pulso de E2 conformando un bandeado coliforme-crustiforme.	152
Figura 6.12. a. Fotomicrografía con luz transmitida con analizador de cristales de adularia (Ad) subrómica rodeados por cuarzo (Qz). b. Bandeo fino de E2, con alternancia de bandas de cuarzo cristalino y sílice fina recristalizada. c. Fotomicrografía con luz transmitida con analizador del cuarzo bandeado con textura en mosaico. d. Fotomicrografía con luz transmitida sin analizador del borde de una de vetilla donde se observa la roca de caja (HR) en contacto con Qz, se observa clorita (Chl) dentro de la venilla. e. Fotomicrografía con luz reflejada donde se observan cristales de calcopirita (Cpy) y galena (Gn). f. Fotomicrografía con luz reflejada de pequeños cristales de oro (Au).	153
Figura 6.13. a. Fotografía de afloramiento de la veta Dios Protege donde se observa el cuarzo macizo de E3 cortando y cementando a la brecha de E2. b. Muestra de mano tomada en el interior de una de las labores de la veta San Agustín donde se observa el predominio de adularia sobre el cuarzo. c. Fotomicrografía con analizador de cuarzo (Qz) anhedral de E3. d. Fotomicrografía de catodoluminiscencia con cristales de cuarzo de E3.....	154
Figura 6.14. a. Muestra del interior del túnel principal de la veta Dios Protege donde se observan fragmentos de E2 brechados, cementados por E3, este último también brechado y cementado por E4. b. Venillas de amatista en el interior del mismo túnel. c. Fotomicrografía con luz transmitida sin analizador de cristales de amatista con zonación de E4 con abundantes inclusiones fluidas e impurezas demarcando estas líneas. d. Fotomicrografía de catodoluminiscencia de una sección basal de un cristal de amatista de E4 con líneas de crecimiento.	155
Figura 6.15. a. Fotomicrografía con luz transmitida con analizador de cristales de calcita (Cal) de E5 ocupando intersticios en medio de cuarzo (Qz) con textura en mosaico de E2. b. Fotografía de afloramiento de relleno de calcita con textura en enrejado, reemplazada por sílice, asignado al evento 5. c. Fotografía de sondaje de la veta Dios Protege donde se observa calcita en medio de la estructura interceptada.	156
Figura 6.16. a. Fotografía de afloramiento de la veta San Agustín (sector central) donde se observa al pulso de cuarzo criptocristalino (+arcillas + clorita) brechando a los pulsos anteriores. b. Fotografía de sondaje de la veta Dios Protege mostrando la brecha generada en el evento 6. c. Fotografía de sondaje de la veta San Agustín mostrando la brecha generada en el evento 6. d. Fotomicrografía sin analizador del cemento de la brecha de E6 donde se observa cuarzo en mosaico muy fino con arcillas y óxidos de hierro cementando fragmentos de los eventos anteriores. e. Sulfuros asociados a E6, calcopirita (Cpy), galena (Gn) y esfalerita (Sph).	157
Figura 6.17. a. Inclusión fluida irregular en un cristal de cuarzo proveniente del E2. b. Fotomicrografía de IF provenientes de E2, a la izquierda inclusión fluida vapor dominante, a la derecha inclusión líquido dominante, ambas coexistiendo y con Th alrededor de los 278°C. c. Fotomicrografía de E3 en superficie (02080709), mostrando la coexistencia de inclusiones fluidas primarias líquido dominante con vapor dominante. d. Trenes de inclusiones fluidas secundarias vapor dominante en un cristal de E4. e. Inclusiones fluidas vapor dominante provenientes de un borde cristalino de cuarzo del E4. f. Inclusiones fluidas vapor dominante pequeñas en cuarzo de E6.	162
Figura 6.18. Diagrama tipo <i>box-plot</i> donde se muestra la distribución de las poblaciones de Th de IF primarias para cada evento, en función de las cotas de donde se extrajeron las muestras analizadas. SA: Veta San Agustín; DP: Veta Dios Protege.	163
Figura 6.19. Mapa de distribución de contenidos metálicos (Au, Ag, Pb, Cu, Zn) para las vetas del Distrito Minero	

Castaño Nuevo.	165
Figura 6.20. a. Mapa de superficie del sistema de vetas (en rojo) con la línea de la traza de la sección longitudinal (en azul) b. Sección longitudinal de la veta Dios Protege. c. Sección longitudinal de la veta San Agustín. En rojo se marcan las muestras de superficie, labores subterráneas y sondajes que interceptaron la estructura y arrojaron valores anómalos. En celeste se marcan las trazas de los posibles clavos y con la flecha se indica los sectores hacia donde podrían continuar los mismos.	166
Figura 6.21. Diagrama ternario (Au*1000-Ag*100-Pb+Zn) para las vetas del Distrito Minero Castaño Nuevo (modificado de Albinson et al., 2001).....	167
Figura 6.22. Sección longitudinal de la veta Dios Protege y su relación con el modelo estructural propuesto para la estructura. Relaciones entre metales [Au/Pb]*100 y [Au/Cu]*100 representadas mediante el algoritmo del vecino natural, mostrando los altos en color rojo coincidente con los tramos superficiales/subsuperficiales de los sectores de apertura definidos, disminuyendo en profundidad (en tonos azules).....	168
Figura 6.23. a. Corte transversal esquemático del sector noreste de Castaño Nuevo, donde se observan las principales vetas y las asociaciones de alteración identificadas, cada una de ellas representadas con un color específico que se replica en los bordes de los espectros característicos. b. Asociación adularia + cuarzo: Fotografía del sondaje CASS-10-03, donde se observa adularia (Ad) en finas venillas y dentro de un fragmento de roca andesítica. Espectro de cuarzo (Qz) con trazas de clorita (Chl) e illita. c. Asociación illita + clorita ± esmectita ± caolinita: Fotomicrografía con analizador de la pasta de la roca de caja donde se observa la asociación de illita (Ill) con esmectita (Smc) reemplazando a la pasta. La curva espectral que acompaña presenta la firma característica de la illita, con trazas de esmectita. d. Fotomicrografía con analizador de clorita con colores verdes y otras azules. La curva espectral que acompaña la figura presenta la asociación clorita - esmectita, con trazas de caolinita. e. Asociación epidoto + clorita ± calcita: fotomicrografía sin analizador donde se observan clusters de epidoto (Ep) rellenando oquedades. La curva espectral muestra la asociación clorita-epidoto (±esmectita). f. Asociación clorita ± prehnita: Fotografía del sondaje CASS-13-28 donde se observa una venilla rellena con prehnita (Pre), clorita y abundantes óxidos de hierro (± cuarzo). La curva espectral muestra el rasgo de absorción característico de la prehnita, asociada a clorita, esmectita y hematita.....	170
Figura 6.24. Mapa de afloramientos de cuerpos de brechas y estructuras asociadas realizado a escala 1:2000 en el sector central y sector sur del Distrito Minero Castaño Nuevo.....	173
Figura 6.25. a. Fotografía de afloramiento del sector sur, donde se aprecia una estructura en la que se emplaza la brecha, con fragmentos de roca piroclástica y cemento ferruginoso. b. Fotografía en afloramiento donde se observa una <i>crackle breccia</i> con el mismo cemento de óxidos de hierro y sílice. c y d. Fotomicrografía sin/con analizador de la brecha.	174
Figura 6.26. a. Fotografía de muestra de mano de andesitas de la Unidad I fuertemente alteradas con textura tipo <i>vuggy quartz</i> . b. Fotografía en afloramiento de esta misma textura, pero con las oquedades rellenas con arcillas. c. Fotomicrografía sin analizador de cristales de cuarzo (Qz) creciendo en las paredes de uno de los huecos generados. d. Fotomicrografía con luz reflejada mostrando fina pirita (Py) diseminada.....	174
Figura 6.27. a. Fotografía con vista al este de afloramiento de la estructura vetiforme Don Guillermo donde se aprecia el buzamiento hacia el oeste. b. Detalle de muestra de mano de la estructura Don Guillermo donde es posible apreciar las diferentes variedades de sílice, desde ópalo y calcedonia como fragmentos, hasta cuarzo microcristalino cementando la brecha. Se observan abundantes óxidos de hierro y oquedades generadas por la lixiviación de algunos cristales.	175
Figura 6.28. Subaflormientos de brechas con fragmentos de <i>vuggy</i> de diversos tamaños y proporciones. La mayoría está subredondeado. Se destacan venillas de cuarzo cortando a las brechas.	176
Figura 6.29. Distribución de las anomalías en el sector de las brechas hidrotermales, en rojo las anomalías positivas, en azul las cercanas a 0.	179
Figura 6.30. Mapa de asociaciones de alteración hidrotermal relacionados al sistema de brechas, <i>vuggy quartz</i> y alteración tipo <i>steam heated</i> , en el sector central del Distrito Minero Castaño Nuevo.	180
Figura 6.31. a. Curva espectral de sílice con trazas de minerales de hierro. b. Fotografía de afloramiento donde se observa la sílice pulverulenta y óxidos de Mn como pátinas.	181

Figura 6.32. Labores sobre faldeo de toba fina silicificada donde se observa el crecimiento de cristales de alunógeno formando lentes irregulares, paralelas a la estratificación. Diagrama ASD y fotografía de detalle donde se aprecia la morfología fibrosa.	182
Figura 6.33.a. Afloramiento de rocas tobáceas fuertemente alteradas. b. Curva espectral característica de la jarosita obtenida de muestras provenientes del sector mostrado en a. c. Difractograma de Rayos X donde se observa la asociación alunita + jarosita + sílice. d. Curva espectral mostrando la asociación caolinita + yeso + jarosita obtenida sobre la misma muestra del difractograma de c. e. Fotografía de afloramiento en el sector central del área de estudio, donde se observa una fractura rellena con jarosita y un halo alrededor de la misma conformado por la asociación alunita+jarosita+cuarzo.....	183
Figura 6.34. a. Diagramas de espectrometría mostrando dos muestras puras de dickita e illita de amonio obtenidas en el sector fotografiado. b. Fotografía del sector sur (a la altura de la quebrada del Alumbre) mostrando los parches blanquecinos que identifican a esta asociación.	184
Figura 6.35. a. Curva espectral de turmalina obtenida de una muestra con textura tipo <i>vuggy silica</i> . b. Venillas de cuarzo + turmalina en muestra de toba fina fuertemente alterada. c. Soles de turmalina (Tu) en roca alterada del sector central del área de estudio, se observa la asociación cuarzo (Qz) y sericita (Se) en la pasta. d. Roca andesítica alterada y brechada con cemento de turmalina.	185
Figura 6.36. Temperaturas de Homogenización vs. Salinidad. Las tendencias de procesos de enfriamiento y ebullición se indican con flechas de colores correspondientes a los colores que identifican las muestras de cada evento. Tomado de Camprubí (2010).	188
Figura 6.37. Diagrama de Hass (1971) para estimar la profundidad del sistema en ebullición.	190
Figura 6.38. Distribución de los elementos anómalos en conjunto con las alteraciones.	193
Figura 7.1. Modelo generalizado de la evolución geológica del Distrito Minero Castaño Nuevo.	201

Capítulo 1: Aspectos Generales

1.1. Introducción

1.2. Ubicación y vías de acceso

1.3. Reseña Histórica

1.4. Antecedentes

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivos Generales

1.5.2. Objetivos Específicos

1.6. Trabajos citados en el Capítulo 1

Capítulo 1: Aspectos Generales

1.1.Introducción

Los fluidos hidrotermales se someten a cambios físico-químicos abruptos en niveles someros de la corteza terrestre, dando lugar a los sistemas epitermales (Lindgren, 1933). Los principales factores que influyen en las condiciones físicas del ambiente epitermal y que determinan el tipo y distribución de la mineralización, corresponden a los rasgos geológicos (fundamentalmente estructura y estratigrafía del área), características hidrológicas de la zona (relación entre la permeabilidad y movimiento de los fluidos), condiciones de presión y temperatura de los fluidos mineralizantes, características químicas de los fluidos (que son los factores determinantes en la reactividad de los mismos) y el desarrollo de permeabilidad contemporánea con el hidrotermalismo (White y Hedenquist, 1990).

En porciones cercanas a la superficie, la expresión de estos sistemas se traduce en depósitos tipo *hot spring* (sinters), secuencias piroclásticas y fluvio-lacustres silicificadas, mantos de alteración tipo *steam heated*, brechas de erupción hidrotermal, *stockworks* y vetas (Browne y Lawless, 2001; Henley y Ellis, 1983; Nelson, 1988; White y Hedenquist, 1995). Los cambios que sufre el fluido hidrotermal afectan su capacidad de transportar metales en solución, es por esto que el registro de las variaciones durante su ascenso, permite localizar un depósito mineralizado dentro de un espacio restringido (White y Hedenquist, 1990).

Los sistemas epitermales en Argentina revisten gran importancia ya que representan la mitad de los depósitos que actualmente se encuentran en explotación o en etapas avanzadas de exploración. Estos proyectos/minas se distribuyen entre la Patagonia Extrandina y la Cordillera de los Andes (Guido y Jovic, 2019). Dentro de esta última, en particular en la región de la Cordillera Frontal, se destacan dos eventos magmáticos a los que se asocian importantes depósitos, uno relacionado al magmatismo Gondwánico y otro al magmatismo Mioceno. En los últimos años, la exploración y el desarrollo de importantes proyectos mineros vinculados al magmatismo neopaleozoico se vieron incrementadas y por lo tanto el interés en este sector de la cordillera.

La región morfoestructural de Cordillera Frontal (Groeber, 1938), constituye una franja elongada norte – sur limitada al oeste por la Cordillera Principal y al este por el valle Rodeo-Calingasta-Uspallata. Se extiende desde el sur de la provincia de La Rioja hasta el sur de la provincia de Mendoza y parte de Neuquén (Ramos, 1999). Esta región contiene los afloramientos más representativos y extensos de un gran evento volcánico-hidrotermal de edad permo-triásica, denominado en su conjunto como Grupo Choiyoi (Stipanovic et al., 1968). La evolución del mismo se desarrolló en tres episodios bien diferenciados, con edades y ambientes tectónicos característicos, evolucionando desde un arco magmático hasta un régimen tectónico extensional (Sato et al., 2015; Strazzere et al., 2016). Asimismo, el magmatismo del Grupo Choiyoi tiene asociado un cinturón metalogenético, representado por

numerosos depósitos de interés económico los cuales se asocian a los diferentes estadios de evolución tectónica (Zappettini y Chernicoff, 2018).

El presente trabajo fue llevado a cabo en el Distrito Minero Castaño Nuevo, ubicado en el borde oriental de la Cordillera Frontal, a unos 8 km al noroeste de la localidad de Villa Nueva, departamento de Calingasta, provincia de San Juan (Figura 1.1.a). Este distrito aurífero fue descubierto en 1885 y las principales minas fueron explotadas desde esos primeros años y en distintas etapas durante el siglo pasado. El Distrito Minero Castaño Nuevo comprende un conjunto de mineralizaciones epitermales vetiformes de Au-Ag y un sector de intensa alteración hidrotermal de tipo argílica avanzada, con anomalías de Au. El sistema vetiforme se encuentra abarcado por las pertenencias mineras (Figura 1.1.b) San José (539), San Agustín (540), Desengaño (541), Dos Hermanas (542), Descarpe (543), Dios Protege (544), Victoria (545), Andacollo (546) San Pedro (547), San Antonio (548), Andacollo ampliación (549), San Antonio ampliación (550) y Bretania (551), agrupadas bajo la denominación de Grupo Minero Castaño Nuevo (Exp. 305-P-1940). El sector de alteración hidrotermal con anomalías de Au está contenido por la propiedad Don David (Exp. 181.845-B-91), que incluye a la propiedad minera San Juan (1102).

La relación entre la mineralización acotada a las vetas, aquella diseminada asociada a alteración ácida y las rocas que las contienen no ha sido establecida con seguridad hasta el presente. Es por esto que en esta tesis se propone un estudio integral de las mineralizaciones epitermales, tanto del sistema vetiforme como del sector de alteración argílica avanzada, evaluando las relaciones espaciales y temporales entre ambas manifestaciones, y su relación con las rocas hospedantes. Se enmarcaron temporalmente las secuencias que hospedan las mineralizaciones y se confeccionó un modelo de depósito.

1.2.Ubicación y vías de acceso

El área de estudio se encuentra en el sector norte del departamento de Calingasta, provincia de San Juan. Se ubica en el margen oriental de la región morfoestructural de Cordillera Frontal, a una cota promedio de 1750 m.s.n.m. y está comprendida entre las coordenadas 31°00' y 31°02' de latitud Sur y 69°32' y 69°34' de longitud Oeste (x: 6567500 – 6570660; y: 2446220 – 2448850).

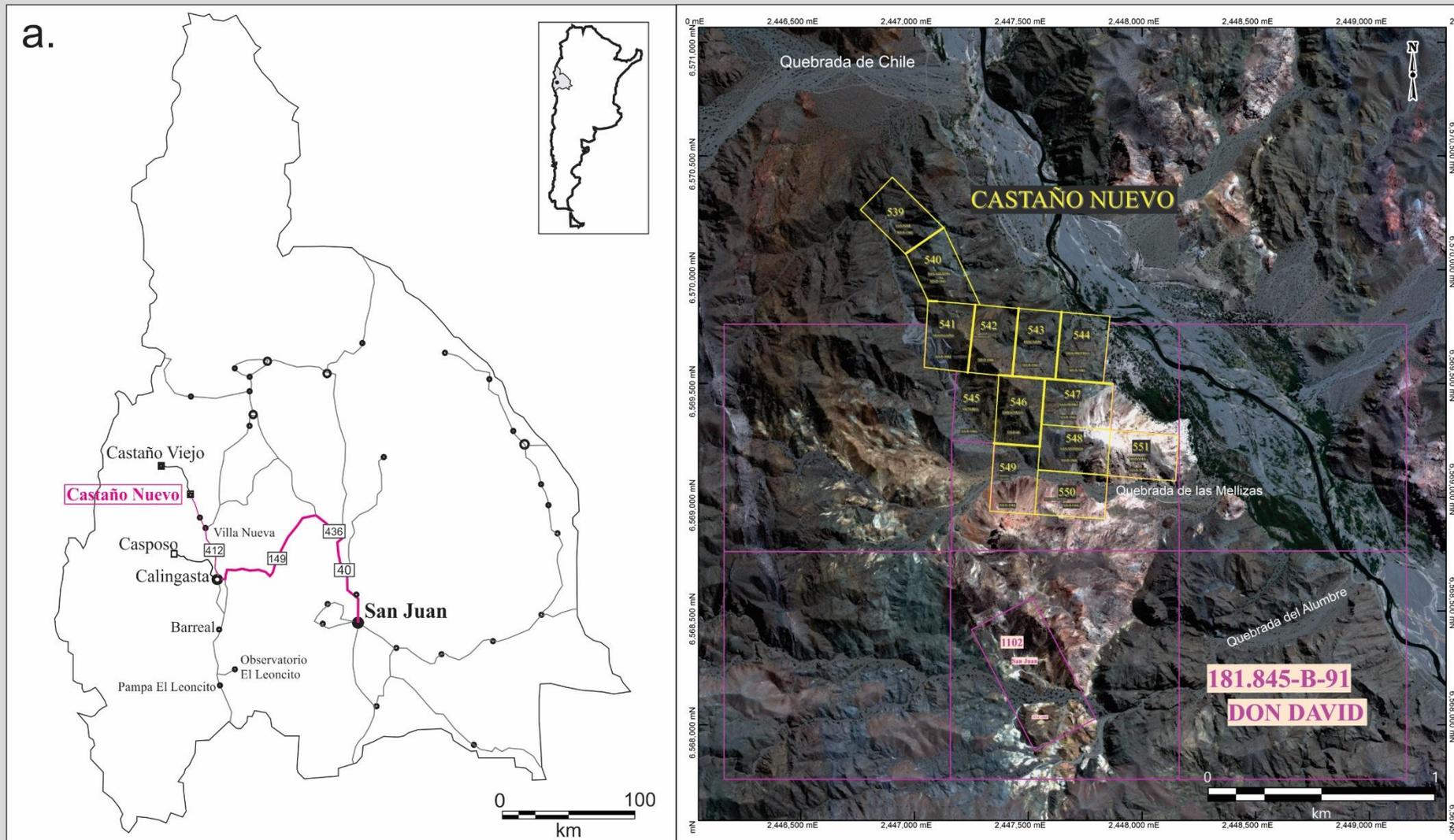


Figura 1.1.a. Ubicación del Distrito Minero Castaño Nuevo y vías de acceso desde la ciudad de San Juan. b. Imagen satelital GeoEye del sector estudiado con las pertenencias mineras demarcadas.

Se accede desde la capital sanjuanina por la Ruta Nacional 40 hasta Talacasto, desde allí por Ruta Provincial 436 hasta el empalme con la Ruta Provincial 149. Esta última se recorre, con tramos deteriorados por acción de aluviones en la época estival, hasta la localidad de Calingasta (cabecera del departamento homónimo). Desde dicha localidad se continúa hacia el norte por Ruta Provincial 412 con asfalto hasta el poblado de Villa Nueva (Figura 1.1.a). A partir de allí se emprende un camino de ripio cuya traza original constituía una huella que bordeaba el Río Castaño y llegaba hasta la mina abandonada de Castaño Viejo. Hoy en día solo quedan algunos tramos de dicha ruta ya que al quedar despobladas las localidades que unía, no se efectuó el mantenimiento necesario para evitar que la acción de las crecientes del Río Castaño la interrumpieran. Por ese motivo, el camino posee múltiples desvíos e incluye el cruce en cuatro instancias de un brazo del río. Sobre la margen izquierda de este camino, a la altura del kilómetro 7,8 desde el puente de Villa Nueva, se observan las ruinas de las instalaciones de antigua mina Castaño Nuevo y de los caseríos de los pobladores mineros.

Los accesos al interior del área se logran a través de tres quebradas principales. Al norte la Quebrada de Chile, en el sector central la Quebradas de las Mellizas y hacia el sur la Quebrada del Alumbre. Desde estas quebradas se desprenden caminos mineros deteriorados por la acción de las fuertes lluvias estivales (Figura 1.1.b).

1.3. Reseña Histórica

El distrito aurífero Castaño Nuevo fue descubierto en 1885. El nombre Castaño Nuevo proviene del color de las aguas del río y lo de “Nuevo” del hecho de que río arriba se encontraban las minas de Castaño Viejo que habían sido descubiertas con anterioridad (Benavidez de Albar Díaz, 2007a). Las principales minas, Dios Protege, San Antonio, Andacollo, San Pedro y San Agustín, fueron explotadas desde esos primeros años por la empresa *Río del Oro Mining Company*, registrada en Londres. Esta empresa pertenecía a William Treolar, quien nombró al canadiense William Finnemore como director de las minas Castaño Nuevo. La empresa había sido constituida para explorar unas minas en Chilecito, provincia de La Rioja. Para llevar a cabo este proyecto, se había adquirido importante maquinaria que no pudo utilizarse en las minas riojanas y se trasladó a las minas de Castaño (Catalano, 2004). En 1888 una fuerte crecida del río Castaño arrastró la nueva planta prácticamente sin uso, lo que provocó fuertes pérdidas económicas y el abandono de las actividades por completo.

Posteriormente, en 1896 las minas de Castaño Nuevo pasaron a ser posesión del Ingeniero en minas francés Francisco Sabatié, quien había llegado a la Argentina en 1894. El Ing. Sabatié formó la sociedad anónima “Minas de Castaño Nuevo”, instaló una batería de dos pisones movidos a vapor e introdujo el método de cianuración (Hermitte, 1914). Si bien no existen registros del momento exacto del comienzo del uso del cianuro en la concentración de minerales en nuestro país, la investigación de

la Mg. Benavidez de Albar Díaz, coloca a las minas de Castaño Nuevo entre las primeras en las cuales se utilizó este método (Benavidez de Albar Díaz, 2005). Asimismo, las tareas desarrolladas por el Ing. Sabatié fueron descritas en un informe realizado por el Jefe de la Oficina Nacional de Geología y Minas, H.D. Hoskold, titulado “*Official report upon the Mines, mining, metallurgy and mining laws of the Argentina Republic*”, presentado en la Exposición de *Saint Louis* en Estados Unidos en el año 1904, y posteriormente traducido y publicado en nuestro país (Hoskold, 1906), lo que permitiría afirmar que ya para el año 1903 el método de cianuración era utilizado en Castaño Nuevo.



Para el año 1907, el Distrito Minero Castaño Nuevo contaba con un laboratorio equipado con implementos de fabricación británica, manejado por el químico australiano John Allen (Zuber, 1909). Ese año se incorporó un molino *Hurtington* comprado en Inglaterra, capaz de procesar 25 Tn diarias y un equipo completo para la cianuración en tachos o cilindros (Benavidez de Albar Díaz, 2007b) como puede observarse en la Fig. 1.2.a y b. El químico australiano John Allen vivía junto con su familia en una casa contigua a la planta de procesamiento (Figura 1.3.a). Por ese entonces la mina pertenecía a Samuel Hale Pearson, y de acuerdo a los registros, en el año 1909 se habían tratado 2200 Tn de material, que produjeron 62,693 Kg de oro y 381,222 Kg de plata (Hermitte, 2014). En 1911 las minas de Castaño Nuevo fueron vendidas a *The San Juan Mines Argentine Ltd. Co* (Figura 1.3.b). En el año 1914 se estima que las actividades en Castaño Nuevo cesaron, y en el balance empresarial de la compañía, se registra el último asiento de venta de lingotes “*bullions*” correspondiente a £ 60.587, equivalente a 18.513 Oz de oro (Benavidez de Albar Díaz, 2007a).

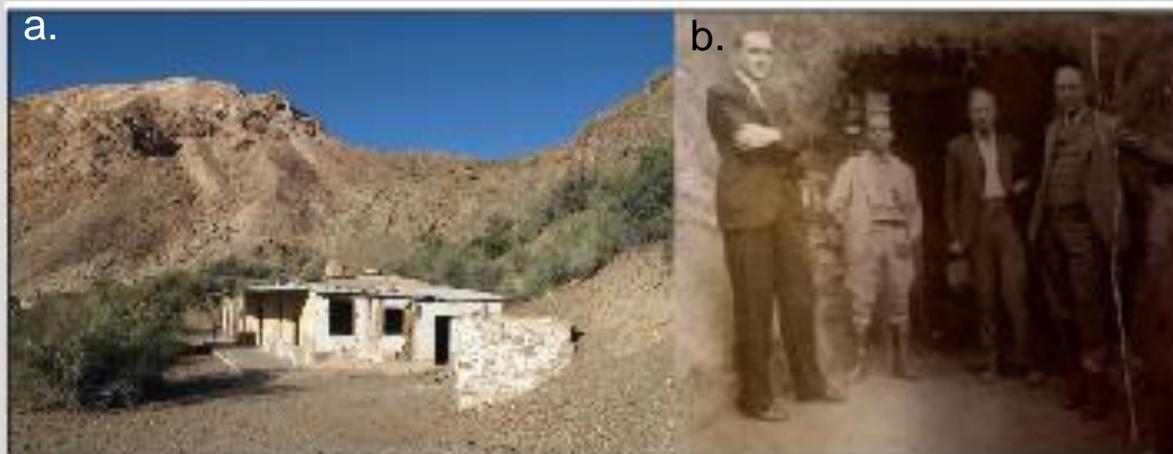


Figura 1.3.a. Casa principal contigua a la planta de procesamiento donde habitaba la familia Allen. **b.** John Allen en una bocamina de Castaño Nuevo con visitantes, fotografía del archivo privado de la familia Allen, en Benavídez de Albar Díaz (2007a).

En 1920 la empresa *The San Juan Mines Argentine Ltd. Co.* vendió sus instalaciones al inglés Jabez B. Williams, quien mantuvo a John Allen al frente de la planta de procesamiento, con una producción mínima, hasta el año 1923, cuando la familia Allen emigró a Mina Gerais (Brasil) y las actividades en la mina cesaron (Benavídez de Albar Díaz, 2007a). En 1946 los terrenos de la mina fueron rematados.

De manera artesanal siguió la explotación por pirquineros de la zona hasta la década del 60, utilizando la amalgamación con mercurio como método de concentración (Benavídez de Albar Díaz, 2007a). Actualmente, se encuentran los restos de las instalaciones de la planta y de algunas de las casas en claro deterioro por el paso de los años y por el saqueo de visitantes (Figura 1.4). La entrada a la galería principal de la veta Dios Protege se encuentra sellada, pero los piques, socavones y demás labores se encuentran abiertas, algunas de ellas anegadas y otras derrumbadas.

1.4. Antecedentes geológico-mineros

Los primeros registros mineros del área de Castaño Nuevo corresponden a los reportes oficiales de la División de Minas, Geología e Hidrología, perteneciente al Ministerio de Agricultura, Sección Geología, Mineralogía y Minería. Estos informes daban cuenta de las actividades realizadas en el sector y de las empresas que las desarrollaban (Hermitte, 1914; Hoskold, 1904, 1906; Solomjan, 1906; Zuber, 1909).

Stappenbeck (1918), hace mención a las labores en Castaño Nuevo y describe la geología del sector, definiendo un pórfido cuarífero rojizo como roca encajante del sistema de vetas. Por otro lado, determina la presencia de una unidad piroclástica fuertemente silicificada aflorante en cercanías al

establecimiento minero y al otro lado del río, y la define como Toba Dacítica.

Angelelli (1950, 1984) describe las vetas del distrito minero individualmente, definiendo las orientaciones, espesores y rellenos de las vetas San Agustín, San Antonio, Andacollo y San Pedro. Reconoce, como roca hospedante de las vetas, a un pórfido andesítico rojizo, asignándolo al ciclo Variscico y, por encima de este cuerpo, identifica capas de andesita de coloración gris del ciclo Ándico. En cuanto al origen del yacimiento, considera que el mismo es de carácter hidrotermal, en relación con el ciclo que aportó la andesita que correspondería al Ándico.

En el año 1982 se presentaron dos trabajos finales de licenciatura en la Universidad Nacional de San Juan, ambos desarrollados sobre la mineralización de Castaño Nuevo. El trabajo de Alonso (1982) se concentró en el estilo estructural del sector, definiendo dos lineamientos regionales norte-sur que limitan el área y son coincidentes con los esfuerzos compresivos este-oeste regionales que definen los dominios tectónicos de la Precordillera y Cordillera Frontal. Al oeste del distrito determina el lineamiento Las Lajitas - Castaño Viejo - Quebrada Seca, y al este el lineamiento Castaño Nuevo - Timbirimbas. Estos lineamientos se vinculan con grandes áreas de alteración hidrotermal y representan sectores de alto interés prospectivo. Entre los lineamientos definidos se dispone un pórfido andesítico rojizo, cortado por vetas de cuarzo en las que se aloja la mineralización de oro.

El segundo trabajo presentado ese año por Serafini (1982) se concentró en el sistema de vetas, las cuales fueron agrupadas de acuerdo a su localización en Vetas del Sector Este (Dios Protege, San Antonio, San Pedro) y Vetas del Sector Oeste (San Agustín, Desengaño, Andacollo). Se realizaron mapeos de detalle de las estructuras del sector oeste, principalmente dentro de las labores subterráneas. Se estableció una disposición errática de la mineralización con pocas posibilidades económicas, y un origen ligado a la actividad póstuma del magmatismo terciario, representado regionalmente por una unidad de tobas, brechas y conglomerados.

Posteriormente, se realizaron diversos estudios estratigráficos que contribuyeron a mejorar el conocimiento del magmatismo gondwánico aflorante en la región y su relación con algunos depósitos minerales. El primero en describir la secuencia del Grupo Choiyoi (Stipanovic et al., 1968) en el ámbito de la Cordillera Frontal al norte de Calingasta fue Caballé (1986), quien dividió las secuencias volcánico-piroclásticas en dos unidades: Formación Vega de los Machos y Formación El Palque. Luego, Llambias y Sato (1990) relacionaron las facies extrusivas del Grupo Choiyoi con los intrusivos asignados al Batolito de Colangüil. En el marco de la confección de las hojas geológicas a escala 1:100.000 denominadas Hoja 3169-20: Castaño Nuevo (Espina et al., 1998) y Hoja 3169-14: Paraje Castaño Viejo (Rodríguez Fernández et al., 1996), se incrementó el conocimiento de la estratigrafía regional y se realizaron contribuciones específicas con tal fin (Cegarra et al., 1998b, 1998a; González y Sato, 1998; Heredia et al., 2002; Rodríguez Fernández et al., 1999).



Figura 1.4. Restos de la maquinaria de principios del siglo XX instalada en Castaño Nuevo. Las piezas de fundición provienen en su mayoría de Inglaterra y Australia. El movimiento de cada una de las piezas era impulsado por la fuerza del agua, lograda a partir de un circuito de canales y compuertas desviados del curso principal del Río Castaño (Benavidez de Albar Díaz, 2007a).

A mediados de los años 90, algunas empresas comenzaron tareas de exploración en las unidades gondwánicas de Cordillera Frontal en torno al valle Calingasta - Rodeo. La facilidad de acceso y las condiciones geológico-geográficas favorables para el trabajo continuo, motivaron a la empresa *Battle Mountain Gold* (Minera BMG) a solicitar en el año 1994 concesiones de exploración en el área del valle Calingasta – Iglesia (Sotarello et al., 2005). Esta solicitud se basó en el análisis sobre la imagen satelital TM de fuertes anomalías de color vinculadas a eventos hidrotermales, y en los antecedentes mineros existentes sobre distritos conocidos del borde oriental de Cordillera Frontal (Sotarello et al., 2002). En este contexto la empresa BMG realizó una grilla de geoquímica en Castaño Nuevo y un mapeo litológico de detalle, sin arrojar resultados alentadores que justificaran continuar con las actividades.

En el año 1996 la compañía *Sonoma Resources* adquirió los derechos para el cateo de las áreas con intensa alteración hidrotermal al sur del sector de las vetas (propiedad Don David). Se realizaron tareas de mapeo de detalle, muestreo de superficie, líneas de geofísica (magnetometría terrestre y potencial inducido), y cuatro sondajes de diamantina (total de metros perforados: 548,6m).

Entre los años 2003 y 2005, la empresa *Tenke Mining Corp.* emprendió tareas exploratorias en el Distrito Minero Castaño Nuevo, realizando un mapeo a escala 1:5.000, muestreo de roca de superficie, así como también muestreos realizados en el interior de las galerías principales. Se realizaron nuevas líneas de geofísica, incluyendo los métodos de Polarización Inducida, Resistividad y Magnetometría Terrestre. Se perforaron cuatro sondajes con una máquina de aire reverso (total de metros perforados: 956 m), dos de ellos en el sector de las vetas y los dos restantes en el sector de intensa alteración hidrotermal, definido en el informe final de actividades de la empresa como una diatrema.

Unos años antes y durante el desarrollo de las actividades de la empresa *Tenke Mining Corp.* el Dr. Gustavo Delendatti llevó a cabo su tesis doctoral en el ámbito del Complejo Mineralizado Castaño Nuevo. Con la información disponible hasta ese momento, estableció que en la zona de estudio evolucionaron conjuntamente dos sistemas hidrotermales con características mineralógicas y geoquímicas particulares (Delendatti, 2005a). En sus primeras contribuciones, ambos sistemas fueron clasificados como epitermales de alta y baja sulfuración, denominándolos como “sistema de diques de brecha” y sistema de vetas de cuarzo respectivamente (Delendatti et al., 2001). A estas últimas, las describe como un conjunto único sin identificar las características individuales (Delendatti et al., 2003) y mediante una datación K/Ar en adularia de 267 ± 6 Ma les asigna una edad pérmica (Delendatti, 2005a). En cuanto al sistema de diques de brecha, Delendatti et al. (2002) les asignan una edad terciaria correlacionándolos con los depósitos asociados a la Faja del Indio (Araneda, 1982), en base al análisis estructural local y su extrapolación a los sistemas tectónicos regionales. En cuanto a la alteración hidrotermal, el autor desarrolla un trabajo con imágenes LANDSAT del área de estudio mediante la metodología de análisis de componentes principales (CPA), comparándolo con otros depósitos cercanos como el pórfido del Retamal, las Timbirimbas y Castaño Viejo, y haciendo un control de campo con un

equipo PIMA-II (Delendatti, 2003). Finalmente, el autor establece un sistema de diatrema para la alteración localizada en la porción sur del área estudiada, a partir de la integración del estudio detallado y clasificación de las distintas litologías, la disposición de los sistemas de brecha, la alteración hidrotermal generada y los rasgos estructurales identificados (Delendatti, 2005b).

En el año 2010 la empresa Troy Resources Ltd. firmó dos contratos de locación de derechos con opción a compra (*Joint Venture*) para la adquisición de los derechos de exploración sobre las áreas que comprenden las propiedades del Grupo Minero Castaño Nuevo y Don David. En primer lugar, se procedió a la obtención una imagen satelital GeoEye cubriendo un área de 2000 ha y a la restitución digital para la zona con un desarrollo topográfico con curvas de nivel principal cada 10 m y secundarias cada 2,5 m para mapeos de base. Se realizaron muestreos en canaletas de superficie y dentro de las labores principales. Además, se llevaron a cabo vuelos aeromagnéticos y radimétricos y se elaboró un mapa de alteración hidrotermal a partir de transectas medidas con Terraspec®. Finalmente, se efectuaron dos campañas de perforación en los años 2010-2011 y 2013, el detalle de las cuales se describe en la Tabla 1.1 junto con el de las realizadas por las empresas Tenke y Sonoma antes mencionadas (Figura 1.5).

Sondaje ID	Coord. Este (m)	Coord. Norte (m)	Elevacion (m)	Prof. final (m)	Azímüt	Inclinación	Blanco	Empresa	Propiedad
CN1-D	2446888	6568813	1771	94	90	-55	Alt. Argilica Av.	Sonoma Resources	Don David
CN2-D	2446945	6569150	1786	151	0	-90	Alt. Argilica Av.	Sonoma Resources	Don David
CN3-D	2447353	6569059	1718	102	313	-55	Alt. Argilica Av.	Sonoma Resources	Don David
CN4-D	2446841	6569166	1795	204	0	-90	Alt. Argilica Av.	Sonoma Resources	Don David
RC-C-01	2447354	6569063	1718	350	135	-70	Alt. Argilica Av.	Tenke Mining Corp.	Don David
RC-C-02	2447763	6568186	1740	276	270	-50	Alt. Argilica Av.	Tenke Mining Corp.	Don David
RC-C-03	2447674	6569706	1642	126	110	-50	Dios Protege	Tenke Mining Corp.	Castaño Nuevo
RC-C-04	2447151	6569668	1796	139	65	-70	San Agustín C	Tenke Mining Corp.	Castaño Nuevo
CASS-10-01	2447633,57	6569630,46	1695,47	157,05	90	-50	Dios Protege	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-02	2447625,66	6569633,01	1695,82	183,7	135	-50	Dios Protege	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-03	2447765,63	6569763,33	1659,27	41,8	135	-50	Dios Protege	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-04	2447034,64	6569941,87	1819,02	111,75	75	-50	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-05	2447002,58	6570044,13	1809,42	68,05	90	-50	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-06	2446992,97	6570002,91	1796,73	80,95	90	-50	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-07	2447007,62	6569971,7	1799,27	91,75	75	-20	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-08	2447034,1	6569940,3	1818,92	143,65	90	-80	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-09	2446871,81	6570146,92	1750,03	93,5	90	-60	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-10	2446902,85	6570075,39	1760,46	89,75	90	-30	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-11	2447055,37	6569887,01	1823,09	100,25	85	-25	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-12	2447073,23	6569735,49	1828,63	168,75	60	-50	San Agustín C	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-13	2447157	6569737	1823	68,65	90	-50	San Agustín C	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-14	2447205,29	6569696,34	1845,86	61,2	90	-80	San Agustín C	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-15	2447184,26	6569640,79	1819,75	134,2	105	-50	San Agustín C	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-16	2447054,85	6569886,95	1823,06	119,2	85	-50	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-10-17	2447051,56	6569881,69	1822,86	129,65	105	-50	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-11-18	2447055,75	6569879,18	1823,85	115,8	50	-50	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-11-19	2447176	6569725	1831	96,35	45	-50	San Agustín C	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-11-20	2447213,79	6569422,45	1753,25	106,8	90	-50	San Agustín S	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-11-21	2447233,13	6569378,12	1750,34	86,9	90	-50	San Agustín S	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-11-22	2447279,38	6569310,89	1745,27	62,4	90	-50	San Agustín S	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-11-23	2447404,35	6569330,85	1759,42	141,2	35	-50	San Pedro	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-11-24	2447401,83	6569334,14	1758,38	120,5	75	-50	San Pedro	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-11-25	2447468,57	6569263,12	1743,54	49,8	70	-50	San Pedro	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-11-26	2447676,51	6569271,56	1776,79	298,9	90	-60	Dios Protege	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-11-27	2447733,65	6569443,47	1698,68	123,7	45	-60	Dios Protege	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-13-28	2447631,57	6569631,57	1706,11	239,4	90	-65	Dios Protege	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-13-29	2447598,33	6569297,47	1787,51	268,4	90	-60	Dios Protege	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-13-30	2446941,82	6569897,3	1793,53	265,3	90	-45	San Agustín N	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-13-31	2447185,95	6569545,2	1793,66	186	60	-80	San Agustín S	Troy Resources Ltd.	Castaño Nuevo
CASS-13-32	2446474,47	6569448,9	1895,32	170,75	100	-65	Don Guillermo	Troy Resources Ltd.	Don David
CASS-13-33	2446459,45	6569376,52	1874,61	160,1	70	-60	Don Guillermo	Troy Resources Ltd.	Don David
CASS-13-34	2446511,35	6569339,96	1847,44	117,4	60	-65	Don Guillermo	Troy Resources Ltd.	Don David

Tabla 1.1: Detalle de los sondajes realizados en la zona de estudio.

1.5. Objetivos

Objetivo general

El objetivo de esta Tesis Doctoral es realizar el estudio integral de las manifestaciones minerales adyacentes al río Castaño dentro del Distrito Minero Castaño Nuevo. Se prevé determinar los procesos magmático-hidrotermales que intervinieron temporal y espacialmente en la formación de los diferentes depósitos para definir su evolución y establecer una posible vinculación genética entre ellos y con el Magmatismo Gondwánico.

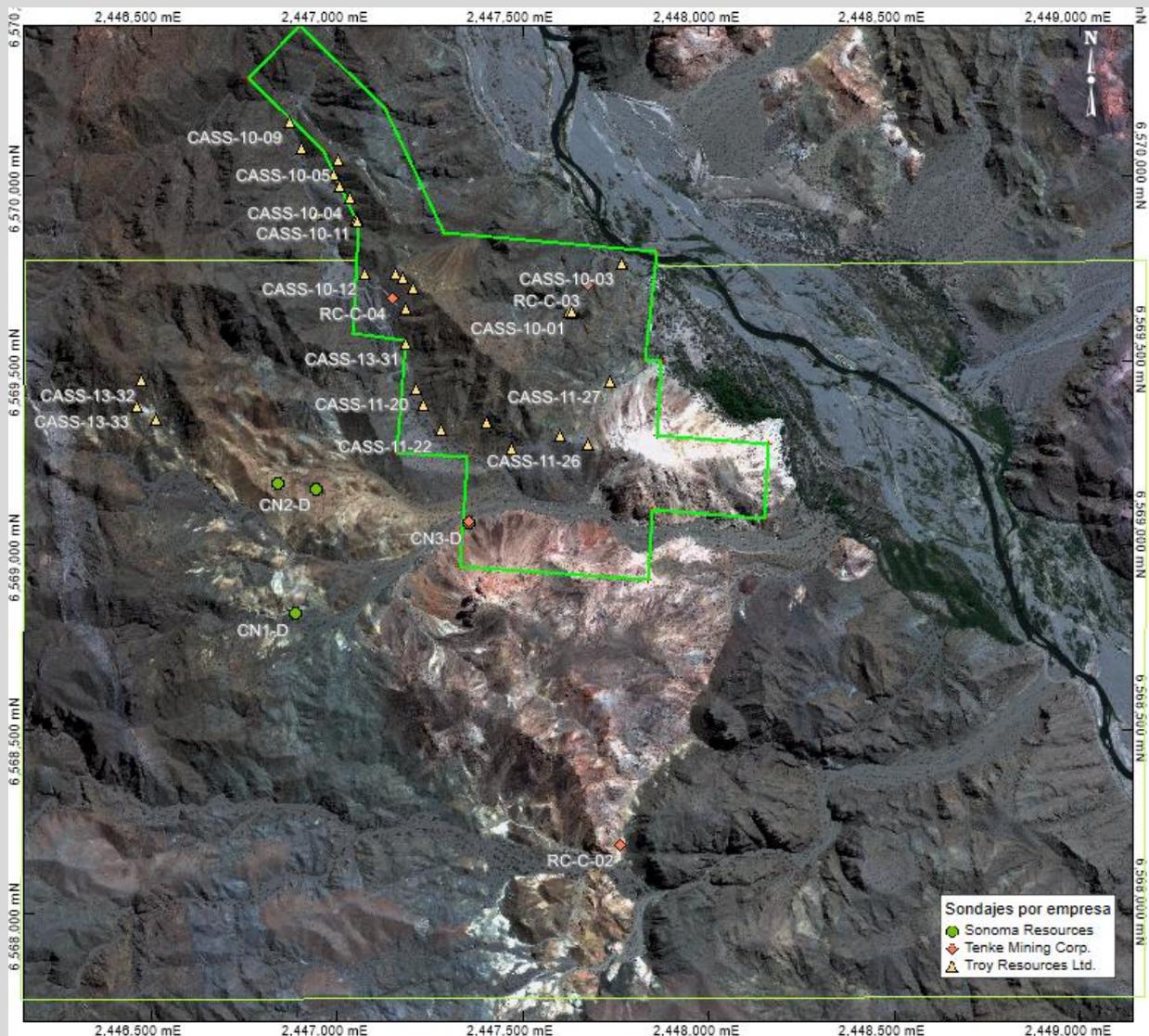


Figura 1.5. Localización de los sondajes realizados por las empresas Sonoma Resources, Tenke Mining Corp. y Troy Resources Ltd.

Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general planteado se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Definir la geología del Distrito Minero Castaño Nuevo.

Para cumplir con este objetivo se llevó a cabo un mapeo de detalle de los afloramientos presentes en el área de estudio a fin de discriminar las diferentes unidades y la relación entre las mismas. Se confeccionó una columna tentativa y a partir de ésta se seleccionaron muestras para estudios petrográficos, litogeoquímicos e isotópicos.

- Caracterizar los controles estructurales del Distrito Minero Castaño Nuevo.

Para tal fin se determinó un profundo análisis de la estructura. Se estudió la relación entre la misma y el magmatismo para establecer su vinculación con la tectónica regional. Este análisis se realizó mediante mapeos de detalle y el uso de técnicas indirectas como geofísica aérea.

- Determinar las asociaciones de alteración y mena de cada una de las manifestaciones hidrotermales.

Para cumplir con este objetivo se desarrollaron estudios petro-mineralógicos para definir las paragénesis de minerales de mena y de alteración y su vinculación en espacio y tiempo para los depósitos presentes del Distrito Minero Castaño Nuevo. Para el estudio de la alteración, a escala distrital se realizaron interpretaciones a partir de imágenes satelitales que fueron posteriormente contrastadas con datos espectrométricos de campo. Se realizó un exhaustivo análisis de los datos de geoquímica de superficie y de sondajes a fin de caracterizar la mineralización en cada uno de los sistemas presentes dentro del distrito.

- Establecer el origen y la evolución de los fluidos mineralizantes.

El análisis de las secuencias paragenéticas de relleno de los minerales de ganga, complementado con estudios de inclusiones fluidas se empleó con el fin de determinar las condiciones físico-químicas y la evolución temporal de las soluciones hidrotermales que dieron origen al sistema vetiforme presente en el área de estudio.

- Definir el modelo genético de los depósitos y su relación con el Magmatismo Gondwánico.

Este objetivo se alcanza a partir de la integración de toda la información referida a las características geológicas, estructurales, geoquímicas y mineralógica de los depósitos que forman el Distrito Minero Castaño Nuevo.

1.6. Trabajos citados en el Capítulo 1

- Alonso, J. 1982. Prospección geológica y exploración primaria del sector de alteración Castaño Nuevo. Dpto. Calingasta, San Juan. Trabajo Final de Licenciatura (inédito). Universidad Nacional de San Juan. San Juan. 126 p.
- Angelelli, V. 1950. Los recursos minerales de la República Argentina. I. Yacimientos metalíferos. Revista del Instituto Nacional de Investigación de las Ciencias Naturales anexo al Museo Argentino de Ciencias Naturales “Bernardino Rivadavia”. Ciencias Geológicas. Tomo II, 542 p. La Plata.
- Angelelli, V., Etcheverry, R., Tomasi, C. y González, A. 1984. Yacimientos Metalíferos de la República Argentina, 1ra ed., tomo 2: 444-445, Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata.
- Araneda, G. R. 1982. El Indio, Yacimiento de oro, plata y cobre, Coquimbo, Chile. Revista Minerales de Chile (37) 160: 5-13.
- Benavidez de Albar Díaz, M. 2005. El Beneficio del Oro y de la Plata en la Minería de San Juan. 1892 - 1923. XIII Congreso Nacional y Regional de La Historia Argentina. Actas: 61-76. Buenos Aires.
- Benavidez de Albar Díaz, M. 2007a. Oro y Plata en San Juan. Editorial El Viñatero, Primera edición. San Juan. 230 p.
- Benavidez de Albar Díaz, M. 2007b. El desarrollo industrial minero por empresas británicas en San Juan 1892 - 1930. Tesis de Maestría en Historia (inédita). Universidad Nacional de San Juan.
- Browne, P.R.L. y Lawless, J.V. 2001. Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere. *Earth-Science Reviews* 52: 299-331.
- Caballé, M. 1986. Estudio geológico del sector oriental de la Cordillera Frontal, entre los ríos Manrique y Calingasta (Provincia de San Juan). Tesis Doctoral Universidad Nacional de La Plata (inédita), 205 p. La Plata.
- Catalano, E. 2004. Antecedentes y Estructura Histórica de la Minería Argentina. En Lavandaio, E. y Catalano, E. (eds.). *Historia de La Minería Argentina*. SEGEMAR. Buenos Aires. Tomo 1, 326 p.
- Cegarra, M.I., Ragona, D.E. y García Espina, R. 1998a. Estructura de la Cordillera Frontal de la Región de Castaño Nuevo, provincia de San Juan. X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica. Actas II: 167-173. Buenos Aires.
- Cegarra, M.I., Ragona, D.E., García Espina, R., González, P.D., Lo Forte, G.L. y Sato, A.M. 1998b. Estratigrafía de la Región de Castaño Nuevo, Cordillera Frontal de San Juan. X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica. Actas I: 85-90. Buenos Aires.
- Delendatti, G.L., Zangrandi, M. y Bastías, H. 2001. Discusión sobre la génesis del distrito auro-argentífero Castaño Nuevo, Cordillera Frontal, San Juan. VII Congreso Argentino de Geología Económica. Actas 1: 77-80. Salta, Argentina.
- Delendatti, G.L., Zangrandi, M. y Bastías, H. 2002. Relaciones entre alteración hidrotermal y estructuras: el caso de las brechas silicificadas del distrito Castaño Nuevo, Cordillera Frontal sanjuanina. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 445-450, El Calafate.
- Delendatti, G.L. 2003. Caracterización de zonas de alteración hidrotermal en las márgenes del río Castaño, provincia de San Juan, mediante procesamiento digital de imágenes TM. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58: 97-108.
- Delendatti, G.L., Gargantini, H. y Ceballos, J. 2003. Las vetas epitermales del Complejo Mineralizado

- Castaño Nuevo, Cordillera Frontal sanjuanina. 10° Congreso Geológico Chileno. Actas: 1-8. Concepción, Chile.
- Delendatti, G.L. 2005a. La Diatrema del Complejo Mineralizado Castaño Nuevo, Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. VIII Congreso de Geología Económica. Actas: 175-182. Buenos Aires.
- Delendatti, G.L. 2005b. Caracterización genética del complejo mineralizado Castaño Nuevo y su relación con el magmatismo Gondwánico en Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. Tesis Doctoral (inérita). Universidad Nacional de San Juan. 213 p.
- Espina, R.G., Cegarra, M.I., Ragona, D., González, P. y Lo Forte, G.L. 1998. Hoja 3169-20 Castaño Nuevo, provincia de San Juan, Argentina, escala 1:250.000. SEGEMAR. Buenos Aires.
- González, P.D. y Sato, A.M. 1998. Petrología, geoquímica y geocronología del magmatismo de la Hoja 3169-20, “Castaño Nuevo”. Provincia de San Juan, Argentina. SEGEMAR. Buenos Aires.
- Groeber, P. 1938. Mineralogía y Geología. Espasa-Calpe Argentina, Buenos Aires. 492 p.
- Guido, D.M. y Jovic, S.M. 2019. Relevance of Epithermal Deposits in Argentina. Proceedings SEG Conference 2019: South American Metallogeny: Sierra to Craton. Session P07: 122. Santiago, Chile.
- Henley, R.W. y Ellis, A.J. 1983. Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. Earth-Science Reviews 19: 1-50.
- Heredia, N., Rodríguez Fernández, L.R., Gallastegui, G., Busquets, P. y Colombo, F. 2002. Geological setting of the Argentine Frontal Cordillera in the flat-slab segment (30°00' - 31°30' S latitude). Journal of South American Earth Science 15: 79-99.
- Hermitte, E., 1914. La Geología y Minería Argentinas en 1914. En Tercer Censo Nacional. Vol. VII: Censo de Las Industrias. Talleres Gráficos de L.J. Rosso y Cia. Buenos Aires, p. 404-494.
- Hoskold, H.D. 1904. The Mines, Mining, Metallurgy and Mining Laws of the Argentine Republic. South American Bank Note Company. Buenos Aires. 477 p.
- Hoskold, H.D. 1906. Informe Oficial Sobre las Minas de la República Argentina. Revista Geología y Minas 1: 51-71.
- Lindgren, W. 1933. Mineral deposits. McGraw-Hill Book Company, inc. 4th edition. Nueva York. 930 p.
- Llambias, E.J. y Sato, A.M. 1990. EL batolito de Colangüil (29-31°S) Cordillera Frontal de Argentina. Revista Geológica de Chile 17: 89-108.
- Nelson, C.E. 1988. Gold Deposits in the Hot Spring Environment. En Schafer, R.W., Cooper, J.J. y Vikre, P.G. (eds.). Bulk Mineable Precious Metal Deposits of the Western United States. Geological Society of Nevada, Nevada, p. 417-431.
- Ramos, V.A. 1999. Las Provincias Geológicas del Territorio Argentino. En Caminos, R. (ed.). Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales - SEGEMAR, p. 49-96.
- Rodríguez Fernández, L.R., Heredia, N., Gallastegui, G., Quesada, C., Robador, A., Marín, G., Cardó, R., 1996. Hoja 3169-14: Paraje Castaño Viejo. Escala 1:250.000. SEGEMAR. Buenos Aires.
- Rodríguez Fernández, L.R., Heredia, N., Espina, R.G. y Cegarra, M.I. 1999. Estratigrafía y estructura de los Andes Centrales Argentinos entre los 30° y 31° de Latitud Sur. Acta Geológica Hispana 32: 51-75.
- Sato, A.M., Llambías, E.J., Basei, M.A.S. y Castro, C.E. 2015. Three stages in the Late Paleozoic to Triassic magmatism of southwestern Gondwana, and the relationships with the volcanogenic events in coeval basins. Journal of South American Earth Science 63: 48-69.
- Serafini, R. 1982. Posibilidades de los yacimientos de plata y oro del sector oeste del distrito Castaño Nuevo.

- Trabajo Final de Licenciatura (inédito). Universidad Nacional de San Juan. 104 p.
- Solomjan, M. 1906. Padrón Minero de los Territorios Nacionales, 1890 - 1905. Buenos Aires.
- Sotarello, G., Belvideri, I., Machuca, E. y Castro de Machuca, B. 2002. Low sulfidation epithermal system in the Casposo-Villa Corral area, Calingasta, San Juan, Argentina. Argentina Mining Conference. Mendoza, p. 16.
- Sotarello, G., Belvideri, I., Castro de Machuca, B., Fernández, G., Machuca, E. y Mc Guinty, W. 2005. Avances en el conocimiento y exploración del depósito epitermal de oro y plata Casposo, Departamento Calingasta, provincia de San Juan. VIII Congreso Argentino de Geología Económica. Acta: 299-306. Buenos Aires.
- Stappenbeck, R. 1918. Los Yacimientos Minerales y Rocas de Aplicación de la República Argentina. Dirección General de Geología e Hidrología. Boletín 19 (serie B). Buenos Aires.
- Stipanovic, P.N., Rodrigo, F., Baulés, O.I. y Martínez, C.G. 1968. Las formaciones prenesonianas en el denominado Macizo Nordpatagónico. Revista de la Asociación Geológica Argentina 23: 67-98.
- Strazzere, L., Gregori, D.A. y Benedini, L. 2016. Early Permian arc-related volcanism and sedimentation at the western margin of Gondwana: Insight from the Choiyoi Group lower section. Geoscience Frontiers 7: 715-731.
- White, N.C. y Hedenquist, J.W. 1990. Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration. Journal of Geochemical Exploration 36: 445-474.
- White, N.C. y Hedenquist, J.W. 1995. Epithermal Gold Deposits: Styles, Characteristics and Exploration. Society of Economic Geologist Newsletters 23 (1): 9-13.
- Zappettini, E.O. y Chernicoff, C.J. 2018. Metallogenic Implications of Redefining the Upper Paleozoic Magmatism in Argentina: Tectonic settings and related deposit models. En IAGOD (ed.), *15th Quadrennial IAGOD International Association on the Genesis of Ore Deposits Symposium*. Anales 56 - SEGEMAR, Salta, Argentina, p. 144-145.
- Zuber, R. 1909. Padrón Minero de la República Argentina. Anales del Ministerio de Agricultura de la Nación. Sección Geología, Mineralogía y Minería. Tomo 6, N°2. Buenos Aires.

Capítulo 2: Marco Geológico Regional

2.1. Introducción

2.2. Geología Regional

2.2.1. Basamento metamórfico pre-Carbonífero

2.2.2. Unidades asociadas al Orógeno Gondwánico

2.2.2.1. Secuencias sedimentarias

2.2.2.2. Unidades ígneas

2.2.3. Unidades asociadas al Orógeno Andino

2.2.3.1. Unidades ígneas mesozoicas

2.2.3.2. Unidades ígneas y sedimentarias terciarias

2.2.3.3. Unidades sedimentarias cuaternarias

2.3. Estructuración Regional

2.3.1. Estructuras gondwánicas

2.3.2. Estructuras extensionales mesozoicas

2.3.3. Estructuras compresionales cenozoicas

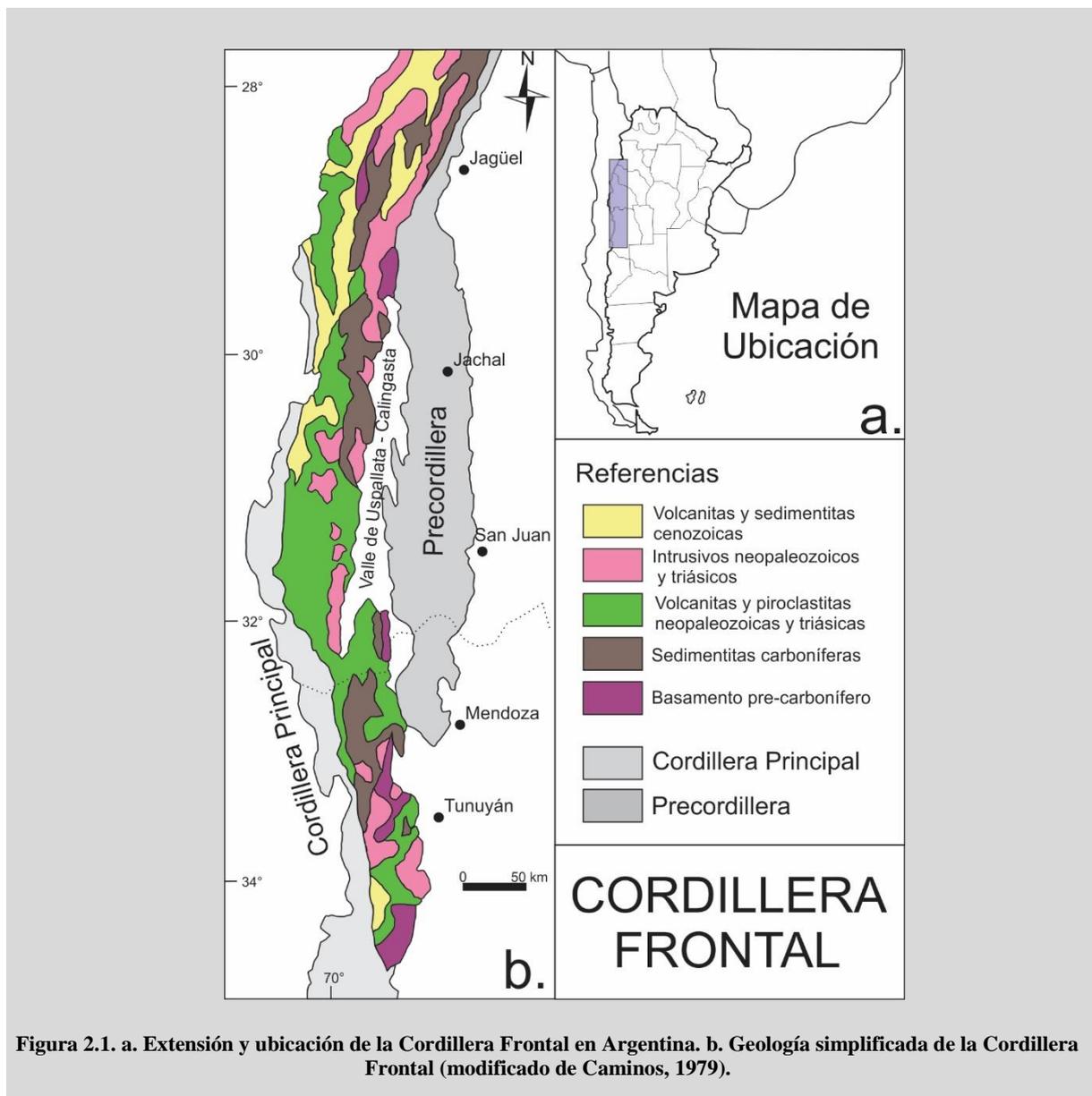
2.4. Depósitos de importancia económica asociados al Magmatismo Gondwánico en Cordillera Frontal y otros sectores

2.5. Trabajos citados en el Capítulo 2

Capítulo 2: Marco Geológico Regional

2.1. Introducción

El Distrito Minero Castaño Nuevo se localiza sobre el flanco oriental de la unidad morfoestructural denominada Cordillera Frontal (Groeber, 1938). Esta provincia geológica, asociada a la Orogenia Andina, constituye una franja elongada norte – sur, limitada al oeste por la Cordillera Principal y al este por el valle Uspallata-Calingasta-Iglesia y la Precordillera. Se extiende entre los 27° y 34°45’ de latitud sur (Caminos, 1979), desde el sur de la provincia de La Rioja hasta el sur de la provincia de Mendoza y parte de Neuquén (Figura 2.1). En la provincia de San Juan comprende los cordones de Cajón de La Brea, Colangüil, Ansilta y Espinacito, mientras que en la provincia de Mendoza abarca los cordones del Tigre, del Plata y el Portillo (Ramos, 1999).



En el presente capítulo se detallan las características geológicas y estructurales de la Cordillera Frontal, se describen las unidades litológicas características y el marco geotectónico en el cual se formaron. Adicionalmente, se resumen las investigaciones de índole estratigráfica, petrológica y estructural que incluyen la zona de estudio del presente trabajo.

A nivel regional, los relevamientos geológicos que abarcan el área de estudio corresponden a las cartas geológicas Hoja 3169-20: Castaño Nuevo (Espina et al., 1998) y Hoja 3169-14: Paraje Castaño Viejo (Rodríguez Fernández et al., 1996a). Asimismo, en inmediaciones del área de estudio, trabajos de detalle efectuados por Busquets et al. (2013), Caballé (1986), Cegarra et al. (1998 a y b), Heredia et al. (2002), Rodríguez Fernández et al. (1999), Spalletti et al. (2012), entre otros, permiten correlacionar las unidades y estructuras identificadas con sectores parecidos de la Cordillera Frontal, y de este modo otorgar un marco geológico y tectónico al presente trabajo.

2.2. Geología Regional

A grandes rasgos, la Cordillera Frontal Argentina consiste en: (1) Unidades de basamento metamórfico pre-Carbonífero; (2) Secuencias sedimentarias e ígneas asociadas al Orogéno Gondwánico; y (3) Rocas sedimentarias e ígneas de la Orogenia Andina (Sato et al., 2015). En particular, las rocas ígneas de edad permo-triásicas resultan las más significativas. Las relaciones entre las diferentes unidades se muestran en el mapa de la figura 2.2.

A continuación, se presentan las unidades geológicas que componen la estratigrafía regional de Cordillera Frontal subdivididas en base al ciclo orogénico al cual fueron asignadas, detallando su composición, ambiente, edades y correlaciones con otras unidades equivalentes. A modo de resumen se presenta una columna generalizada en la figura 2.3.

2.2.1. Basamento metamórfico pre-Carbonífero

Las unidades que conforman el basamento metamórfico corresponden a ortogneises asignados al Mesoproterozoico (Basei et al., 1998) y una secuencia metasedimentaria y metaígneas del Ediacarano – Cámbrico inferior (Complejo Guarguaraz, López de Azarevich et al., 2009). En el extremo más austral de la Cordillera Frontal aflora una secuencia silicoclástica y turbidítica denominada Formación Las Lagunitas (Volkheimer, 1978), sin relación estratigráfica evidente con el basamento antes descripto.

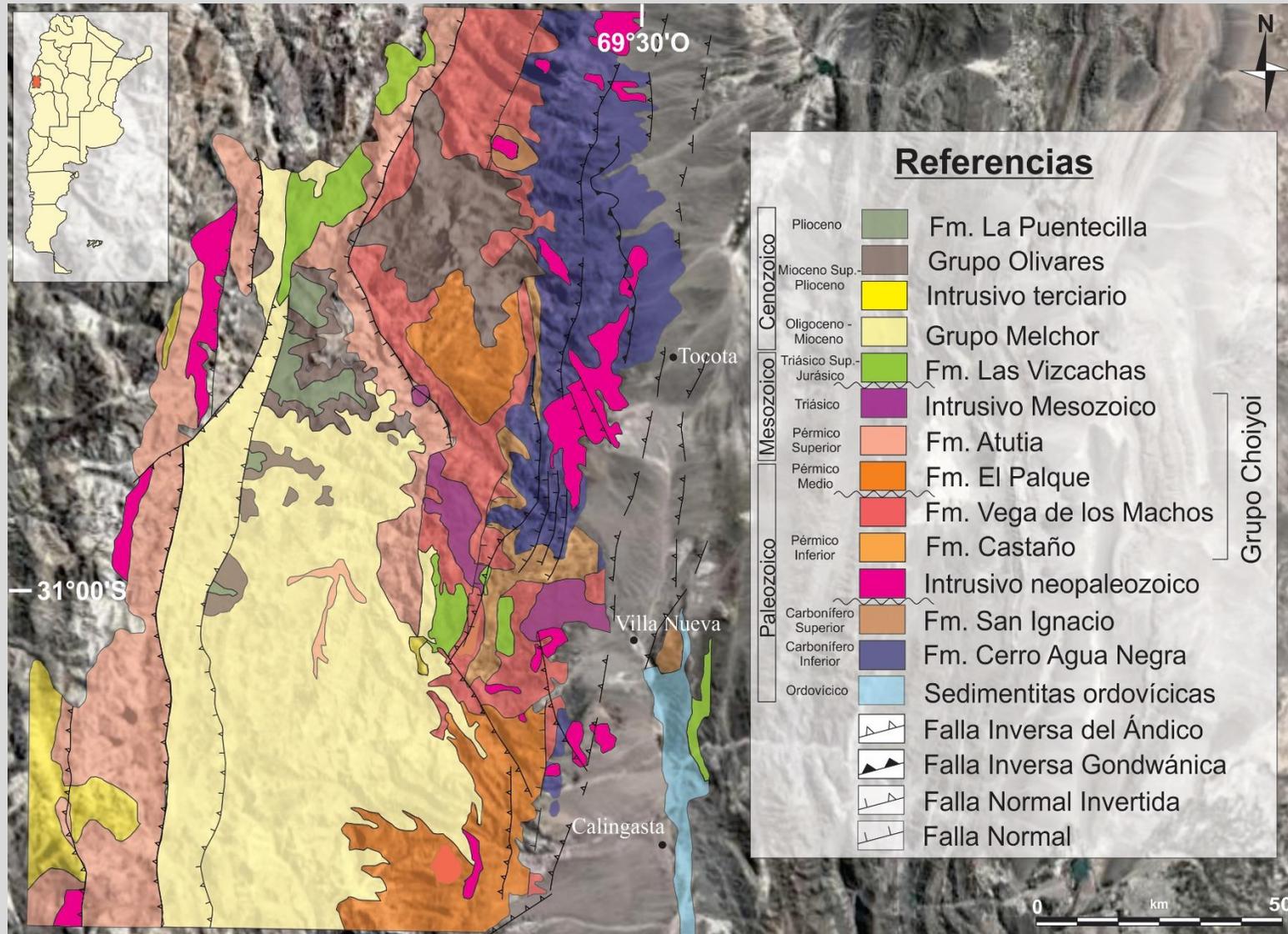


Figura 2.2. Mapa geológico regional modificado de Heredia et al. (2002)

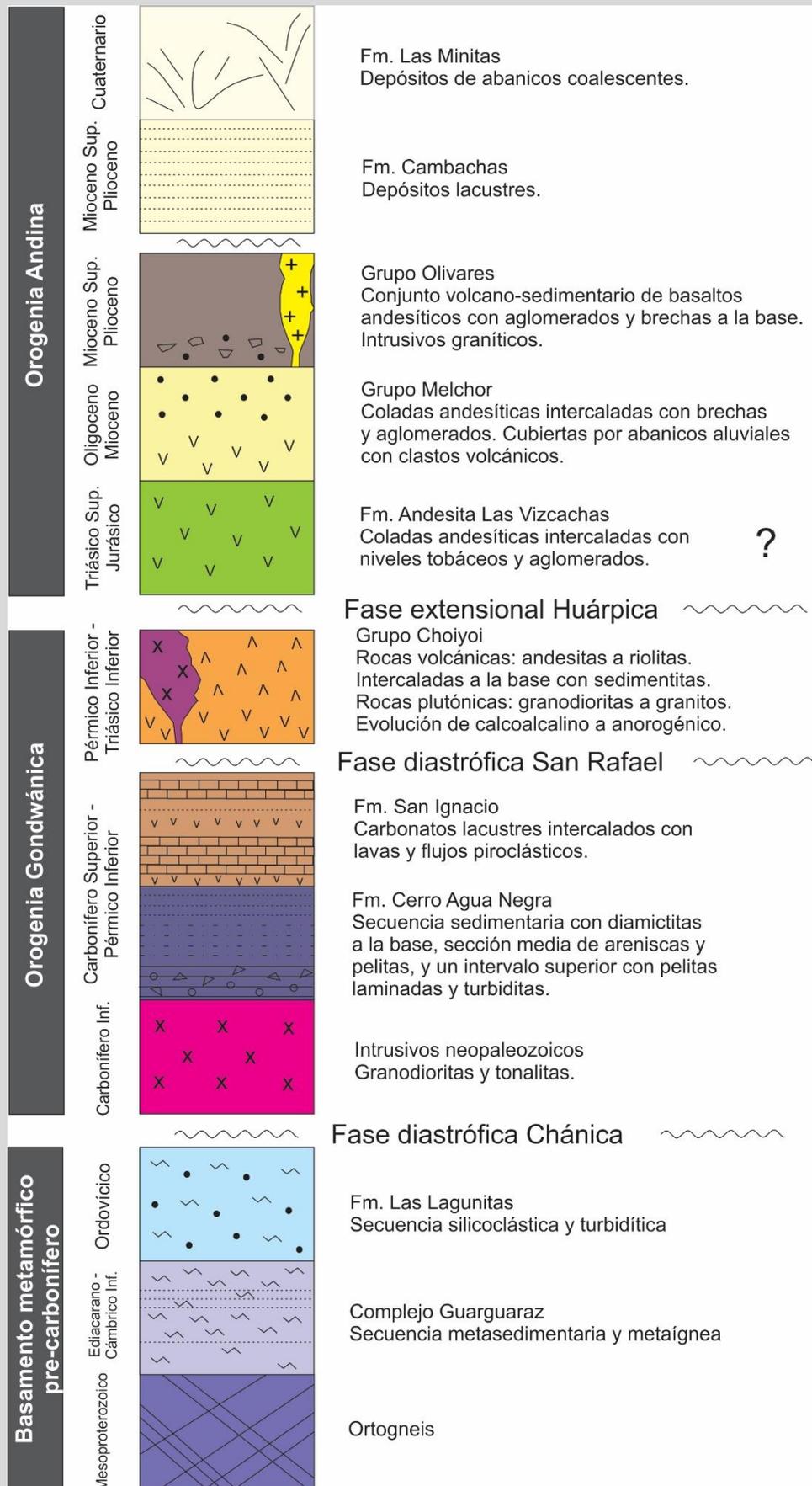
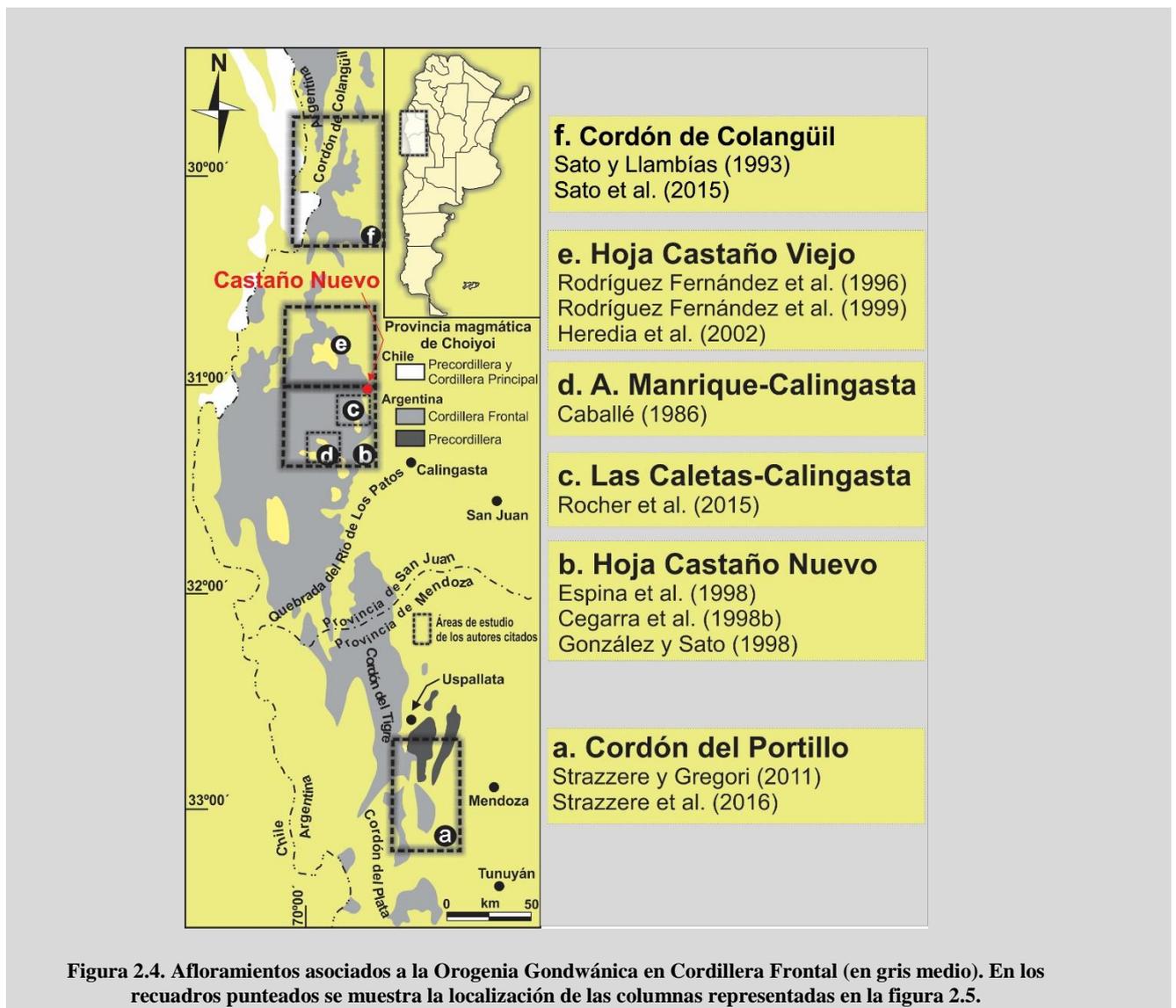


Figura 2.3. Columna estratigráfica generalizada de Cordillera Frontal. Modificado de Sato et al. (2015).

La edad de esta secuencia fue determinada por la presencia de fauna de *Climacograptus bicornis* característica del Ordovícico (Tickyj et al., 2009). En el sector sudoriental de la Cordillera Frontal se encuentran estratos marinos devónicos pertenecientes al Grupo Chinguillos (Furque y Baldis, 1973) y al Grupo Ciénaga del Medio (Amos y Marchese, 1965) con un metamorfismo de muy bajo grado y fuertemente plegados como resultado de la fase diastrófica Chánica que tuvo lugar en el Devónico medio a tardío (Caminos, 1979a, Heredia et al., 2002).

2.2.2. Unidades asociadas al Orógeno Gondwánico

Las unidades asociadas a la Orogenia Gondwánica son las que predominan en la región morfoestructural de la Cordillera Frontal. Distintas columnas fueron propuestas a lo largo de diferentes sectores. Las más relevantes para el presente trabajo se localizan en la figura 2.4 y se resumen en la figura 2.5, comparando las relaciones cronoestratigráficas de las distintas unidades en sectores determinados de la región morfoestructural estudiada.



2.2.2.1. *Secuencias sedimentarias*

En discordancia angular sobre las unidades del basamento se apoyan rocas marinas silicoclásticas y de transición a ambientes continentales, formadas en el comienzo de la Orogenia Gondwánica (Fase Diastrófica Chánica) entre el Carbonífero tardío y el Pérmico temprano. A grandes rasgos, estas rocas se agrupan en dos secuencias, la primera considerada pre-orogénica y la suprayacente con claras evidencias sin-orogénicas (Spalletti et al., 2012).

La unidad con mayor representación areal fue definida por Polanski (1970) como Formación Cerro Agua Negra. Sus afloramientos se extienden entre los 29° y 32° de latitud sur. Esta secuencia representa una cuenca de retroarco y contiene abundante contenido fósil de invertebrados marinos (asociaciones de *Balakhonia-Geniculifera* y *Trivertonia-Streptorhynchus*), paleoflora (Biozona de *Nothorhacopteris-Botrychiopsis-Ginkgophyllum*, NBG, y fitozonas de *Kraeuselcladus-Astherotheca*), así como también restos palinológicos (Biozona de *Raistrickia densa-Convolutispora muriornata*) (Azcuay et al., 2007). Estas asociaciones permiten ubicarla en el Carbonífero tardío – Pérmico temprano. La Formación Cerro Agua Negra aflora en cercanías al Distrito Minero Castaño Nuevo, dentro del área que comprende al Distrito Minero Castaño Viejo. Esta unidad y los estratos equivalentes, como Formación Las Balas y Formación Loma de los Morteritos (Polanski, 1958), Formación El Plata (Caminos, 1965) y Formación La Puerta (Caballé, 1986), constituyen secuencias pre-orogénicas (Caminos, 1979a; Heredia et al., 2002), cuya área de aporte de sedimentos estaría ubicada al este en el sector de la Precordillera y Sierras Pampeanas (Spalletti et al., 2012).

En su perfil tipo, la Formación Cerro Agua Negra puede ser dividida en tres intervalos mayores (Busquets et al., 2013; Spalletti et al., 2012): una sección inferior conformada por diamictitas glaciales, pelitas con *dropstone* y lutitas; una sección media compuesta por areniscas y pelitas con abundantes restos vegetales correspondientes a la biozona NBG (Pennsylvaniano); y un intervalo superior que incluye pelitas laminadas y turbiditas.

En torno a los 31° de latitud sur aflora la sección superior (Heredia et al., 2002) considerada sin-orogénica y denominada en este sector como Formación San Ignacio (Rodríguez Fernández et al., 1996a). El área de aporte se localizaría al oeste, en el arco volcánico, evidenciado por los depósitos gravitacionales de alta densidad que la componen (Busquets et al., 2013; Sato et al., 2015). En esta sección superior, carbonatos lacustres se intercalan con lavas y flujos piroclásticos, los cuales preservan fósiles del Pennsylvaniano tardío – Pérmico temprano (Césari et al. 2012). Se apoyan en discordancia angular sobre las sedimentitas pre-orogénicas y son cubiertos por volcanitas y coladas incluidas en el Grupo Choiyoi. Esta secuencia representa un intervalo estratigráfico de espesor variable, dominado por brechas sedimentarias y volcánicas, con participación de rocas carbonáticas, presente en gran parte de los Andes Centrales relacionando las secuencias silicoclásticas neopaleozoicas con las volcanitas del Grupo Choiyoi (Busquets et al., 2013). La primera mención sobre estas unidades fue realizada en la Sierra de San Rafael donde Dessanti (1956) agrupó bajo el nombre de “Brecha Verde” al conjunto de

brechas y conglomerados interpuestos entre la secuencia volcánica del Grupo Choiyoi y las sedimentitas paleozoicas de la Formación El Imperial. Años más tarde, esta brecha fue incluida en la base del Grupo Cochicó (equivalente al Grupo Choiyoi) por Llambías et al. (1993). Más al norte, sobre el flanco oriental del Cordón del Plata, Caminos (1965) denominó como “Conglomerado del Río Blanco” al conjunto sedimentario depositado por encima de las sedimentitas de la Formación El Plata y por debajo de las rocas eruptivas del Grupo Choiyoi. Posteriormente, Strazzere et al. (2016) incluyeron al Conglomerado del Río Blanco dentro de la base del Grupo Choiyoi.

La sedimentación cesó con el comienzo de la Fase Orogénica San Rafael, cuyo carácter fuertemente compresivo se evidencia por el intenso plegamiento acompañado por corrimientos en algunos sectores (Llambías y Sato, 1990). La superficie de erosión generada, se registra a lo largo de toda la Cordillera Frontal (Caminos, 1979b) y sobre el flanco oriental de la Precordillera, donde se observa una progresiva disminución de la deformación hacia el este (Azcuay y Caminos, 1987).

2.2.2.2. *Unidades ígneas*

Durante la transición entre la amalgamación final de Pangea y el inicio de su fragmentación, rocas ígneas, desde básicas hasta ácidas, fueron emplazadas y extruidas a lo largo del margen occidental del supercontinente Gondwana. Las rocas asociadas con este evento constituyen la denominada Provincia Magmática Choiyoi (Kay et al., 1989).

Las unidades ígneas más antiguas corresponden a granodioritas y tonalitas emplazadas en las unidades pre-carboníferas. Uno de los representantes más característicos de estos cuerpos lo constituye la Granodiorita Tabaquito (Llambías y Sato, 1995), emplazada en sedimentitas devónicas.

El magmatismo del Grupo Choiyoi (Stipanovic et al., 1968) comienza luego del desarrollo de la superficie de erosión regional San Rafael, aunque localmente se registra de manera sincrónica con la deformación (Kleiman y Japas, 2009). Este magmatismo se desarrolló durante el período comprendido entre el Pérmico inferior (Artinskiano) y el Triásico inferior (Olenikiano) (Sato et al., 2015). Los principales representantes plutónicos corresponden a granodioritas y granitos agrupados en el Batolito de Colangüil (Llambías y Sato, 1990), mientras que las volcanitas coetáneas se componen de andesitas (basandesitas) y riolitas, y se agrupan bajo la denominación del Grupo Choiyoi (Sato y Llambías, 1993) con diferentes nombres formacionales en cada una de las provincias geológicas donde fue registrado.

En su conjunto, el Grupo Choiyoi representa una secuencia compleja volcánica-volcanoclástica, con intercalaciones epiclásticas y sedimentarias de tipo lagunar de carácter local. Los primeros trabajos regionales de Caminos (1965), Groeber (1946, 1948) y Stipanovic et al. (1968) reportan este evento y proponen una columna estratigráfica generalizada compuesta por una secuencia sedimentaria a la base seguida por facies volcánicas basálticas-andesíticas pasando transicionalmente a unidades dacíticas y riolíticas. Contribuciones posteriores de Kay et al. (1989), Kleiman y Japas (2009), Llambías et al. (1993, 2003), Mpodozis y Kay (1992), Strazzere et al. (2006), entre otros, indican que la sección

basáltica-andesítica corresponde a facies relacionadas a subducción, mientras que la sección superior dacítica-riolítica indica un régimen extensional de intraplaca.

La sección basal del Grupo Choiyoi se caracteriza por unidades sedimentarias y volcánicas que se apoyan en discordancia sobre las sedimentitas carboníferas de la Formación Cerro Agua Negra y equivalentes. Estas secuencias, caracterizadas por conglomerados polimícticos interestratificados con aglomerados, tobas y volcanitas andesíticas, e intercalaciones calcáreas, fueron asignadas a la base del Grupo Choiyoi por Llambías et al. (1993) y Strazzere et al. (2016).

La secuencia inferior volcánica corresponde a la Formación Vega de los Machos (Caballé, 1986), definida en su localidad tipo Arroyo Derecho, con unos 500 m de potencia y conformada por un conjunto de rocas piroclásticas, con volcanitas subordinadas e intercalaciones de niveles epiclásticos (Espina et al., 1998). Localmente se observa mayor participación de brechas, aglomerados y coladas andesíticas, y escasas intercalaciones calcáreas (Cegarra et al., 1998b). Los afloramientos de esta unidad presentan una coloración verde-grisácea, localmente morada por efecto de la oxidación.

De acuerdo a González y Sato (1998), las andesitas presentan textura porfírica, con cristales euhedrales de plagioclasa (An₄₀) y en menor proporción minerales máficos, entre los que predominan los anfíboles, con cristales subhedrales que presentan inclusiones de opacos y como mineral accesorio apatito. Las rocas más evolucionadas presentan escaso cuarzo con engolfamientos. Los fragmentos líticos son en general volcánicos con texturas felsíticas.

Los aglomerados volcánicos tienen muy mala selección y son matrix sostén. Los litoclastos son grandes bloques angulosos de la misma andesita que conforma la matriz y de otras andesitas texturalmente diferentes. Localmente se registran litoclastos de sedimentitas de la Formación Cerro Agua Negra.

La Formación Vega de los Machos fue atribuida por Caballé (1986) al Pérmico inferior tardío a Pérmico medio, en base a criterios estratigráficos. Sato y Llambías (1993), en el sector del Batolito de Colangüil definen la Sección Inferior Andesítica del Grupo Choiyoi, correlacionable con la Formación Vega de los Machos, y le asignan una edad pérmica inferior (Asseliano) de acuerdo a una isocrona Rb/Sr en roca total de $289,2 \pm 19,3$ Ma. Posteriormente, una muestra de la misma unidad tomada en la Quebrada de Agua Negra arrojó una edad U/Pb en circones de $272.8 \pm 3,9$ Ma (Sato et al., 2015). Espina et al. (1998) durante la confección de la Hoja Geológica Castaño Nuevo, realizaron dos dataciones K/Ar en plagioclasas y roca total, que arrojaron valores de 288 ± 5 Ma y 294 ± 9 Ma respectivamente. En el sector del Cordón del Plata, Strazzere et al. (2016) obtuvieron una edad U/Pb en circones de 277 ± 3 Ma para la Formación Portezuelo del Cenizo, también equivalente a la Formación Vega de los Machos.

En cuanto al ambiente de formación de esta unidad, se podría vincular con un volcanismo desarrollado sobre corteza continental, de tendencias calcoalcalinas y de arco, con sedimentación asociada, probablemente bajo un régimen extensional (Espina et al., 1998). En términos generales, se trata de un magmatismo de composiciones intermedias con formación de depresiones volcano-tectónicas

e intrusiones someras, semejante al de cuencas de intraarco de posición elevada (Rocher et al., 2015).

La secuencia superior fue definida por Caballé (1986) bajo la denominación de Formación El Palque, en su localidad tipo en el tramo inferior del río Calingasta. En este sector describe una secuencia de 450 m compuesta por riolitas, tobas e ignimbritas ácidas. La Formación El Palque se apoya concordantemente sobre la secuencia predominantemente andesítica de la Formación Vega de Los Machos.

En general, la Formación El Palque está constituida por un complejo lávico-piroclástico compuesto por rocas de naturaleza mayormente dacítica a riolítica, aunque incluye algunas traquitas y andesitas. Las lavas riolíticas son las más comunes, con textura porfírica con pasta microcristalina, granofírica y esferulítica. De acuerdo a González y Sato (1998), los fenocristales suelen ser escasos (<5-10%). En las ignimbritas se reconocen texturas eutaxíticas, vitroclásticas y microcristalinas, siendo su contenido en cristaloclastos relativamente alto (15-30%). Algunas ignimbritas presentan evidencias de soldadura de alta temperatura y otras presentan deformación por compactación diagenética. La mineralogía de la Formación El Palque está representada por asociaciones de feldespato alcalino, plagioclasa y cuarzo, con anfíbol y biotita (Rocher et al., 2015).

La parte baja de la unidad, o Complejo Volcánico Inferior, es una sucesión de lavas y domos riolíticos formados por litofacies coherentes y autoclásticas que son seguidas por dos unidades ignimbríticas. La primera, denominada como Ignimbrita Cordón del Carrizalito, es de composición traquítica, rica en cristales, de moderado grado de soldadura y está acompañada por litofacies de mesobrechas estrechamente relacionadas a una falla volcano-tectónica. La segunda, la Ignimbrita Cordón del Diablo, superpuesta a la anterior, es de composición riolítica con moderado contenido en cristales y de bajo grado de soldadura. La Toba El Chalchalero es una sucesión sedimentario-volcanoclástica relativamente importante que se desarrolla sobre las ignimbritas, y en la que pueden reconocerse litofacies volcanoclásticas - epiclásticas tales como areniscas tobáceas, brechas volcanoclásticas y areniscas ricas en cristales y líticos. En la parte alta de la Formación El Palque se desarrolla la Riolita Quebrada Larga, un extenso y potente flujo de lava riolítico, pobremente porfírico de grano fino. El espesor total de la Formación El Palque se estima cercano a los 1.550 m (González y Sato, 1998).

La edad de la Formación El Palque fue atribuida al Pérmico superior por Caballé (1986) en base a criterios estratigráficos. Una datación K/Ar en plagioclasa arrojó una edad de 245 ± 7 Ma para las volcanitas ácidas en el sector de la Quebrada de La Puerta (Espina et al., 1998). Esta unidad fue correlacionada con las volcanitas ácidas de la parte alta del Grupo Choiyoi de la zona de Colangiül, donde Sato y Llambías (1993) sugieren la ocurrencia de un magmatismo calcoalcalino y alcalino tipo A, que marcan la transición entre un régimen subductivo a uno anorogénico vinculado a extensión.

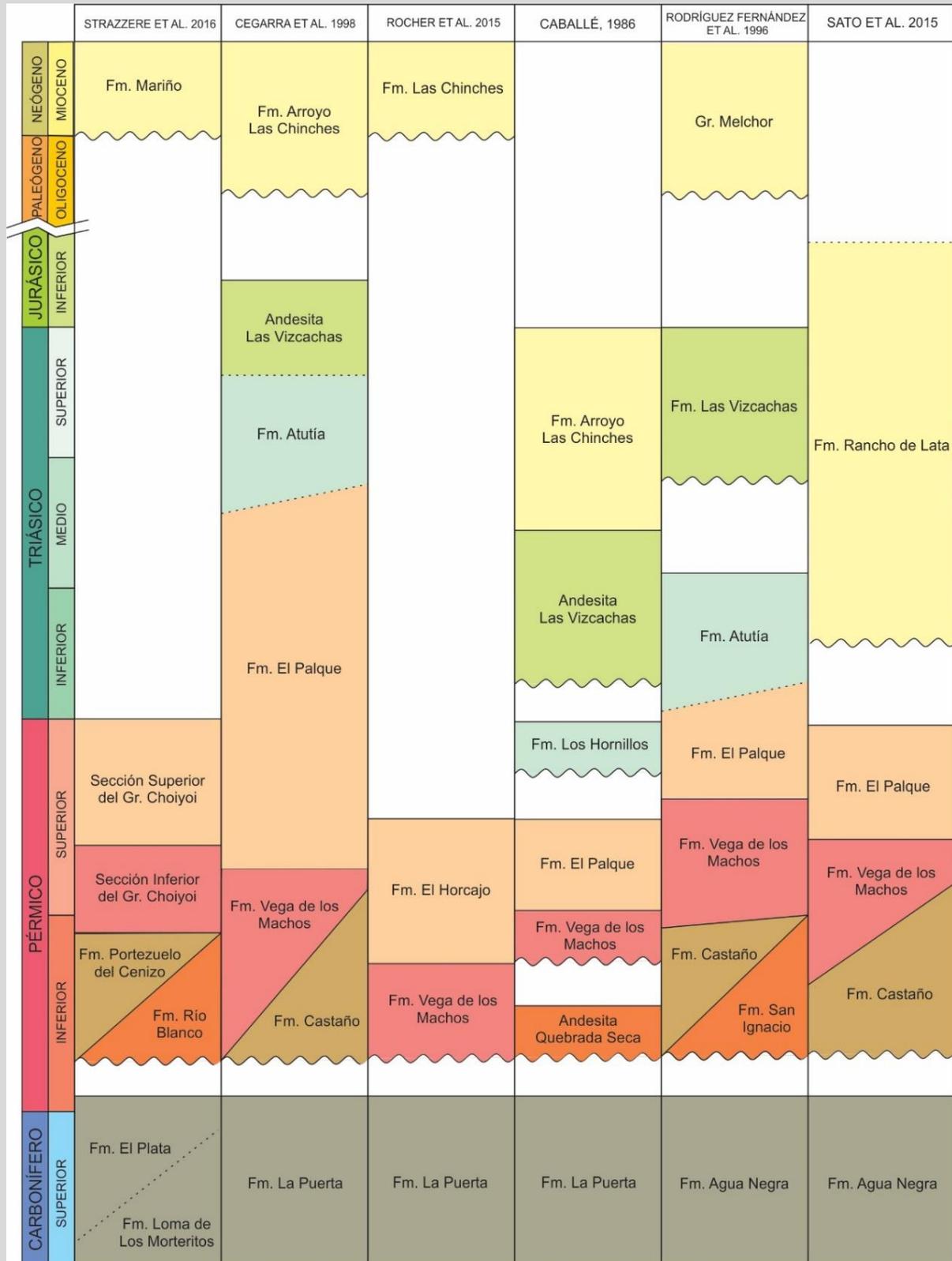


Figura 2.5. Relaciones cronoestratigráficas entre las unidades que integran al Grupo Choiyoi en la Cordillera Frontal de sur a norte (a. Cordón del Portillo, Strazzere et al., 2016 y Strazzere y Gregori, 2011; b. sector Castaño Nuevo, Cegarra et al., 1998; c. área entre las Caletas y Calingasta, Rocher et al., 2015; d. entre los ríos Manrique y Calingasta, Caballé, 1986; e. sector Castaño Viejo, Rodríguez Fernández et al., 1996b; f. en el Cordón de Colangüil, Sato et al., 2015 y Sato y Llambías, 1993). En líneas punteadas contactos difusos, en líneas rectas horizontales contactos netos, en líneas negras con ángulo interdigitaciones y en líneas onduladas discordancias.

Los eventos finales del magmatismo están representados por la Formación Atutia (Espina et al., 1998) que corresponde a una secuencia volcano-volcanoclástica de composición predominantemente andesítica. Está compuesta por mantos de andesitas e ignimbritas andesíticas y dacíticas, con intercalaciones de conglomerados y brechas volcánicas. Estas rocas, que exceden los 800 m de espesor aflorante, se presentan con una estratificación pobre y colores verdosos a morados. En ocasiones se encuentran pequeños domos riolíticos intruyendo a estas rocas, que estarían vinculados al mismo magmatismo.

Espina et al. (1998) obtuvieron dos edades K/Ar en plagioclasa y en roca total de 232 ± 6 Ma y 214 ± 5 Ma, respectivamente.

En cuanto a las facies intrusivas asociadas al Magmatismo Gondwánico, los cuerpos plutónicos y subvolcánicos de edad permo-triásica fueron agrupados según su composición en Intrusivos Granodioríticos e Intrusivos Graníticos (González y Sato, 1998). Se alojan en las sedimentitas neopaleozoicas o en distintos niveles de las volcanitas del Grupo Choyoi.

Los mejores representantes de estos intrusivos constituyen el Batolito de Colangüil, compuesto por plutones granodioríticos y graníticos, cuerpos subvolcánicos riolíticos y enjambres de diques silíceos y máficos, con composiciones contrastadas, y localmente híbridas (Llambías y Sato, 1995). Rodríguez Fernández et al. (1999) denomina Intrusivos Mesozoicos al conjunto de intrusivos que se emplazan en las volcanitas del Grupo Choyoi y las sedimentitas carboníferas.

En particular se hará mención de dos de estos cuerpos, uno denominado Pórfido Andesítico (Cegarra et al., 1998b), el cual fue identificado como la caja del Distrito Minero Castaño Nuevo (Serafini, 1982; Delendatti et al., 2003; Delendatti, 2005), y otro denominado Plutón Manrique (Caballé, 1986) localizado 7 km al oeste del área de estudio y que de acuerdo a Espina et al. (1998) sería equivalente al Pórfido Andesítico.

González y Sato (1998), definieron al Pórfido Andesítico como un cuerpo de tonalidades rojizas a gris-verdosas compuesto mayoritariamente por andesitas porfíricas. Composicionalmente está constituido por fenocristales de plagioclasa (andesina), piroxeno (augita), hornblenda, biotita y excepcionalmente cuarzo, incluidos en una matrix microgranosa de plagioclasa y cuarzo, con ortosa subordinada. Según Espina et al. (1998), el pórfido presenta una alteración hidrotermal que se manifiesta en el reemplazo de la plagioclasa por sericita y material arcilloso, junto con la cloritización de los minerales máficos.

Frente a la ausencia de datos radimétricos, se le asignó una edad triásica, coetánea con las facies superiores del Grupo Choyoi (González y Sato, 1998). Caballé (1986) vincula estos cuerpos con una unidad más joven, denominada Andesita Las Vizcachas.

2.2.3. Unidades asociadas al Orógeno Andino

El ciclo Orogénico Ándico (Ramos, 1988) es el último responsable de la estructuración de la cordillera andina. Este ciclo abarca una etapa de carácter compresivo, que va desde el Cretácico superior a la actualidad. El volcanismo del ciclo Ándico se dispone en discordancia angular de bajo ángulo sobre las volcanitas del Grupo Choiyoi y los intrusivos permo-triásicos asociados. Sobre un fuerte paleorelieve elaborado durante la etapa de no depósito y/o erosión, que abarca la mayor parte del Mesozoico y Terciario inferior, se sitúa una potente secuencia volcánica y volcanoclástica, inclinada ligeramente al oeste, en la que se incluyen dos grandes grupos. A partir del Cuaternario, las unidades constituyen secuencias sedimentarias, con pequeñas intercalaciones de rocas piroclásticas, que caracterizan el relleno de la depresión de Rodeo-Uspallata-Iglesia (Rodríguez Fernández et al., 1996b).

2.2.3.1. Unidades ígneas mesozoicas

La denominada Granodiorita Las Vizcachas (Rodríguez Fernández et al., 1996a) constituye uno de los cuerpos intrusivos mesozoicos más representativos. Es un cuerpo elongado N-S situado al oeste del Distrito Minero Castaño Viejo. Intruye al Grupo Choiyoi y es cubierto discordantemente por las volcanitas terciarias del Grupo Melchor.

La Granodiorita Las Vizcachas está constituida por plagioclasa predominantemente, biotita, cuarzo, con menor presencia de anfíboles y feldespato potásico. El tamaño de grano es medio a grueso, con facies de grano más fino de composición aparentemente tonalítica (Rodríguez Fernández et al. 1996b). Una datación por el método K/Ar en plagioclasa, realizada en el INGEIS, ha proporcionado para este cuerpo intrusivo una edad de 200 ± 7 Ma (Rodríguez Fernández et al., 1996a).

La denominada Formación Andesita las Vizcachas fue incluida por Caballé (1986) dentro del Grupo Choiyoi. Se trata de una secuencia de coladas andesíticas con una potencia máxima de 400 m, que se apoya con una fuerte discordancia angular sobre el Grupo Choiyoi. No se ha podido obtener una edad certera para esta unidad; no obstante, Rodríguez Fernández et al. (1999) la han considerado posterior al Grupo Choiyoi ya que la base refleja fosilización del periodo extensional previo, y estiman una edad que podría oscilar entre el Jurásico y el Oligoceno - Mioceno. Posteriormente Heredia et al. (2002) la incluyó en la base del Grupo Melchor, aunque sin evidencias claras de su relación con las otras unidades que conforman dicho grupo.

La Formación Andesita Las Vizcachas está constituida por una intercalación de andesitas y dacitas, con ignimbritas andesíticas subordinadas, dispuestas en mantos de varios metros de espesor, que se apoyan en discordancia angular sobre las formaciones Vega de Los Machos y Castaño, de manera subhorizontal o inclinando al E y NE. Por debajo de la discordancia citada, las unidades mencionadas presentan una importante alteración hidrotermal, de color amarillento, que no se observa en la Formación Andesita Las Vizcachas (Espina et al., 1998).

Litológicamente, la Formación Andesita Las Vizcachas se caracteriza por andesitas piroxénicas de aspecto macizo, dispuestas en forma de coladas, entre las que se intercalan algunos niveles tobáceos y de aglomerados (Rodríguez Fernández et al., 1996b). Los niveles piroclásticos se identifican en el sector superior de la secuencia, siendo su composición mayoritariamente riolítica.

Como se mencionó anteriormente, la edad de la Formación Andesita Las Vizcachas no ha sido establecida con seguridad. De acuerdo a las relaciones estratigráficas, se le asigna una edad tentativa triásica superior a jurásica (Espina et al., 1998). Por otro lado, Rodríguez Fernández et al. (1996a) consideran a estas volcánicas como el equivalente extrusivo de la Granodiorita Las Vizcachas, la cual posee dataciones K/Ar del Jurásico inferior.

2.2.3.2. Unidades ígneas y sedimentarias terciarias

Estas unidades, cuya principal área fuente se sitúa al O, están vinculadas a la compresión cenozoica de la Orogenia Andina y se les atribuye una edad terciaria (Rodríguez Fernández et al., 1996a). Las rocas sedimentarias presentan una marcada variación composicional y están afectadas por diversos intrusivos, diques y filones de naturaleza ácida e intermedia.

El primer grupo de volcánicas que se dispone sobre el paleorelieve generado sobre las unidades gondwánicas, fue denominado Grupo Melchor (Rodríguez Fernández et al., 1996a). Está conformado por dos unidades litoestratigráficas diferentes. La inferior, constituida por unos 1200 a 1400 m de tobas, flujos piroclásticos y coladas andesíticas o basálticas subordinadas, entre las que se intercalan aglomerados y brechas volcánicas y algunas coladas riolíticas, ha sido denominada Formación Puntas Negras por los autores antes citados, quienes obtuvieron una edad K/Ar de $13,4 \pm 2$ Ma para esta unidad. Es correlacionable con la Formación Arroyo de las Chinchas (Caballé, 1986), dada su idéntica posición estratigráfica, aunque este autor la incluyó dentro del Grupo Choiyoi. La parte superior del Grupo Melchor, a la que se ha denominado Formación Río Mondaca (Rodríguez Fernández et al., 1996a), está constituida por 800 m de rocas de origen sedimentario con clastos volcánicos, características de un ambiente de abanicos aluviales subaéreos, con el área fuente situada al oeste, e interpretada como un depósito asociado a un frente orogénico situado en una posición más occidental a la del área estudiada.

En discordancia sobre el grupo anterior se dispone el Grupo Olivares (Rodríguez Fernández et al., 1996a). Litológicamente está constituido por un conjunto volcánico-sedimentario, con intercalaciones de basaltos andesíticos organizados en coladas macizas, con un horizonte de aglomerados volcánicos en la base e intruido por numerosos cuerpos dacíticos a riódacíticos.

Esta formación se correlaciona con la parte superior de la Formación Cerro de las Tórtolas (Maksaev et al., 1984). De acuerdo con esta correlación, la edad del Grupo Olivares oscila entre el Mioceno superior y el Plioceno. Sobre el conjunto anterior se sitúa una secuencia sedimentaria de unos 600 m de potencia, constituida por cuatro miembros grano y estrato crecientes, formados por conglomerados heterométricos polimícticos poco consolidados, arenas y limos, a la que se ha individualizado como

Formación La Puentecilla (Rodríguez Fernández et al., 1996a). Litológicamente los conglomerados contienen clastos de las formaciones infrayacentes e, incluso, clastos de rocas graníticas, cuya procedencia más probable son los intrusivos paleozoicos y terciarios situados al oeste. Las características descritas permiten interpretarlos como abanicos aluviales originados al pie de los importantes relieves generados por un frente orogénico activo.

El magmatismo terciario también está representado por cuerpos intrusivos de composición monzodiorítica o diorítica y textura porfírica. Uno de los representantes mejor expuesto es el Plutón Entrecordillera definido por Caballé (1986). Se trata de un cuerpo monzodiorítico cuarzoso, con facies microgranosas en sus bordes. Si bien no se cuenta con dataciones de este cuerpo, se lo asigna tentativamente al terciario ya que intruye a los equivalentes del Grupo Melchor. Por otra parte, se registra una compleja red de cuerpos hipabisales menores, diques y filones capa que afectan a las unidades volcánicas y sedimentarias previas (Espina et al., 1998).

2.2.3.3. Unidades sedimentarias cuaternarias

Los depósitos cuaternarios de la Depresión de Rodeo-Uspallata-Iglesia tienen un espesor de 800 m que aumenta hacia el centro de la cuenca. Están constituidos por sedimentos poco consolidados y heterométricos, con predominio de facies gruesas, procedentes de la erosión de los relieves cordilleranos. La megasecuencia general de los depósitos parece ser negativa como consecuencia del avance del frente cordillerano, para hacerse posteriormente positiva como resultado de la estabilización y retroceso de dicho frente hacia el oeste (Rodríguez Fernández et al., 1996b).

Caballé (1986) define la Formación Cambachas para considerar a los depósitos lacustres que se encuentran entre Puchuzún y Calingasta. Se trata principalmente de arcillas y limos, de colores blanquecinos, bien estratificados, que se intercalan con delgados niveles de arenas finas y esporádicas tobas.

Por encima de esta unidad, y localmente interdigitada, se encuentra la Formación Las Minutas (Caballé, 1986), la cual corresponde a depósitos de abanicos coalescentes relacionados con el levantamiento andino de los cordones de la Cordillera Frontal (Espina et al., 1998). Litológicamente se trata de conglomerados y fanglomerados constituidos por clastos de riolitas, andesitas y plutonitas originarios de la Cordillera Frontal, incluidos en porciones variables de una matriz no litificada color gris claro a pardo, arenosa a limo-arcillosa (Rodríguez Fernández et al., 1999).

2.3. Estructuración regional

Si bien los Andes constituyen una cadena morfológicamente continua, desde un punto de vista tectónico pueden diferenciarse varios segmentos a gran escala, relacionados directamente con el ángulo

de la zona de Wadati-Benioff (Isacks y Barazangi, 1977). El área estudiada se encuentra ubicada en el segmento de los Andes Centrales donde la placa de Nazca subductada se sitúa casi subhorizontal por debajo de la placa Sudamericana (segmento de subducción subhorizontal Pampeano, 27-33°S); este hecho determina que sea éste el sector donde se encuentran las mayores altitudes topográficas de toda la cordillera andina.

Las características geológicas inherentes a este segmento andino pueden resumirse en:

- Ausencia de un magmatismo importante durante el Cuaternario y, posiblemente, durante el Cenozoico superior, en contraste con las áreas situadas inmediatamente al norte y al sur;
- Presencia de una franja deformada y corrida, situada al este de la Cordillera, constituida por la Precordillera y las Sierras Pampeanas. Estas últimas corresponden a un importante levantamiento del basamento paleozoico y proterozoico durante el Plioceno-Cuaternario.

Por otro lado, este sector constituye el área en donde se concentra la actividad sísmica de magnitud más elevada. La estructura de los Andes Centrales ha sido analizada por diversos autores como Cegarra et al. (1998b), Heredia et al. (2002), Isacks y Barazangi (1977) y Rodríguez Fernández et al. (1996b), que han propuesto diferentes modelos para explicar la actual disposición y estructura interna de las grandes unidades que los constituyen, aunque todos reconocen la superposición de varios eventos de deformación y magmatismo asociado.

En el ámbito de la Cordillera Frontal las estructuras más importantes son fallas de dirección predominante N-S, a las que se asocian pliegues de distinta magnitud, que involucran hasta las volcanitas mesozoicas. En los bloques elevados donde aflora el sustrato paleozoico, se pueden reconocer pliegues con una incipiente esquistosidad y cabalgamientos que no afectan a las volcanitas suprayacentes (Rodríguez Fernández et al., 1999). Este hecho permite reconocer la existencia de estructuras atribuibles a dos eventos compresionales separados en el tiempo, que han sido descritos repetidamente en los Andes centrales: las Orogenias Gondwánica y Ándica (Ramos, 1988). Entre ambos periodos compresivos tuvo lugar un episodio extensional, durante el cual se depositaron las volcanitas permotriásicas asignadas al Grupo Choiyoi (Heredia et al., 1996; Cegarra et al., 1998; Rodríguez Fernández et al., 1996b).

2.3.1. Estructuras Gondwánicas

La fuerte deformación que presentan las sedimentitas neopaleozoicas de la Cordillera Frontal, por debajo de la discordancia angular con el Grupo Choiyoi, ha sido vinculada con la estructuración producida por la Fase Diastrófica Sanrafaélica (Pérmico inferior) de la Orogenia Gondwánica. Esta fase es generada, según algunos autores, por variaciones en los vectores de convergencia en la subducción del margen occidental de Gondwana (Ramos, 1988), mientras que otros la vinculan a la posible acreción de un terreno alóctono desconocido (Mpodozis y Kay, 1990).

Las estructuras conservadas que aparecen ligadas a este ciclo orogénico se produjeron durante

la etapa compresiva sanrafaélica y constituyen sistemas de cabalgamientos y pliegues a distintas escalas. Las características de la deformación con ausencia de metamorfismo y esquistosidad marcada, así como la presencia de numerosos niveles de despegue, con pliegues ligados a la geometría de dichas superficies, permite considerarla como de tipo epitelial (*thin skinned*). Las superficies de cabalgamiento se sitúan generalmente en determinados niveles favorables, sobre todo en los niveles calcáreo-dolomíticos de la Formación San Ignacio, aunque existen otros despegues en distintos niveles de la Formación Cerro Agua Negra (Rodríguez Fernández et al., 1996b). Los sistemas de cabalgamientos forman abanicos imbricados y duplex. Dentro de estos últimos pueden reconocerse algunos apilamientos antiformales y sobre todo duplex normales ("*hinterland dipping duplex*"), de escala métrica a hectométrica (Rodríguez Fernández et al., 1999). Numerosos pliegues se desarrollan relacionados con diversas superficies de cabalgamiento. Los más abundantes se encuentran a mediana y pequeña escala; muestran geometrías variadas, siendo las más comunes las asimétricas cerradas y apretadas, con una vergencia general hacia el E o ESE. Los pliegues despegados a pequeña escala constituyen formas bastante evolucionadas, en ocasiones con charnelas curvadas, fuertemente asimétricas y cuyo plano axial buza moderadamente al O.

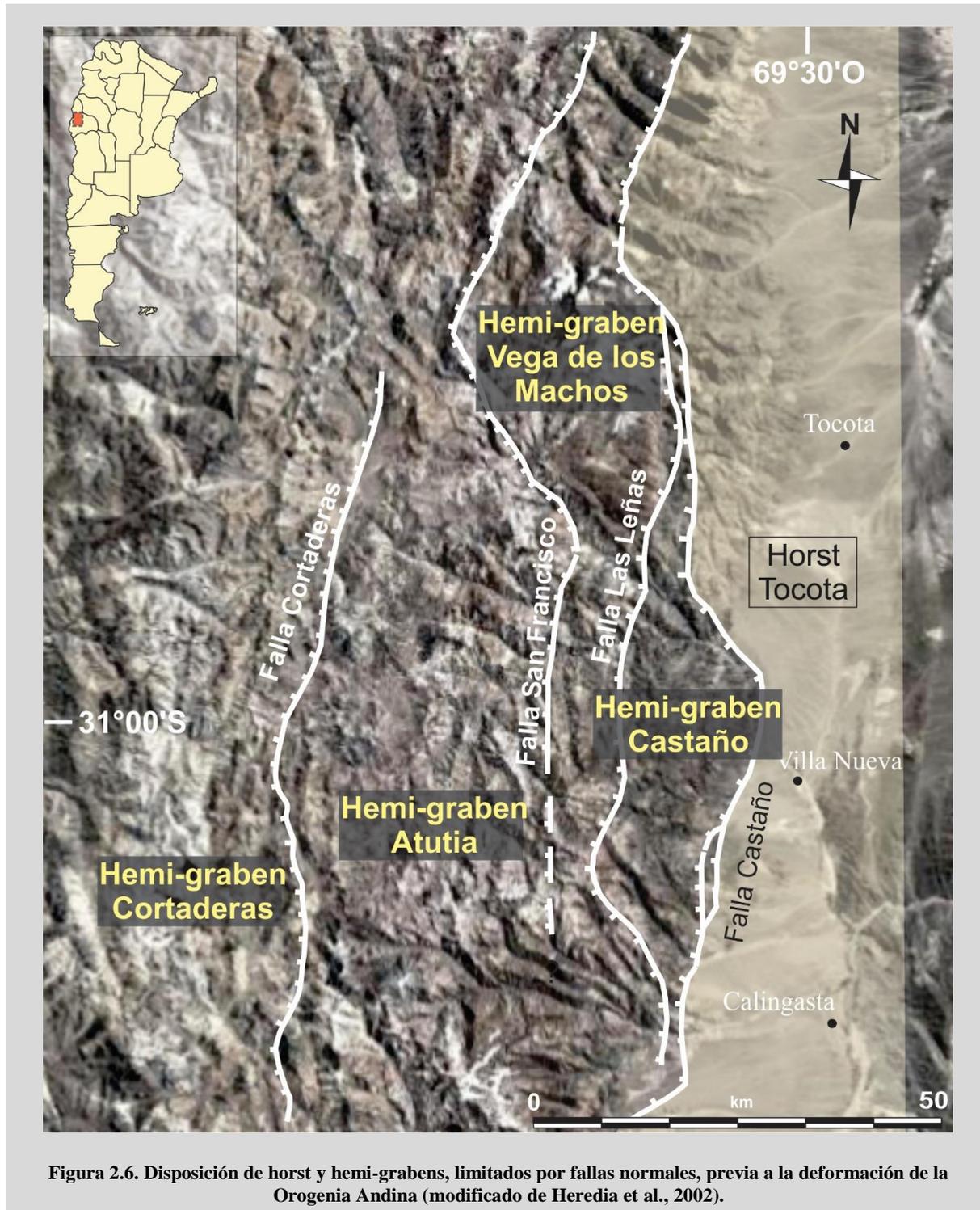
La utilización de los elementos planares y lineales de estos pliegues como indicadores cinemáticos, ha permitido deducir una dirección de transporte tectónico hacia el E para los cabalgamientos gondwánicos. Este dato concuerda con otros indicadores cinemáticos de tipo geométrico, como la trayectoria de las rampas, el sistema de apilamiento de los dúplex y las líneas de bifurcación y corte observables en algunos de estos cabalgamientos. Aunque no se ha podido restaurar la deformación gondwánica, si se ha estimado el acortamiento producido en algunas estructuras menores tales como los dúplex del río Atutia en un 70% (Rodríguez Fernández et al., 1996b), o en un 60% en los pliegues del Arroyo de las Burras (Cegarra et al., 1998a; Rodríguez Fernández et al., 1999).

2.3.2. Estructuras extensionales neopaleozoicas a mesozoicas

Con posterioridad a la principal deformación de la fase sanrafaélica, se desarrolla un importante período distensivo. Las estructuras extensionales desarrolladas corresponden a un sistema de fallas normales de trazado rectilíneo, agrupadas en bandas de dirección predominante N-S, junto a las que aparecen algunas de dirección NO-SE que representan zonas de enlace o transferencia entre las anteriores (Figura 2.6). Estas fallas se encuentran sólo parcialmente invertidas, lo que permite reconocer su geometría y salto original. En general, hundén el bloque occidental, mostrándose muy verticales en superficie. La geometría de las unidades estratigráficas contemporáneas con la extensión (Grupo Choiyoi), con importantes variaciones de espesor entre bloques y dentro de cada bloque, indica que la geometría es la de "hemi-graben" basculados hacia el E (Rodríguez Fernández et al., 1996b).

El cálculo de la extensión a lo largo de una sección E-O, no es posible realizarlo ya que no se

conocen con precisión los espesores exactos del Grupo Choiyoi en los labios hundidos de las fallas, así como la magnitud de la inversión tectónica de muchas de ellas a partir de su primitivo juego extensional. No obstante, la extensión debió ser muy importante puesto que la compresión andina no ha compensado el juego extensional de las principales fallas, salvo en casos excepcionales (Cegarra et al., 1998a; Heredia et al., 2002).



2.3.3. Estructuras compresionales cenozoicas

Las estructuras más evidentes atribuibles a la etapa compresional cenozoica son las fallas inversas de alto ángulo. La compresión cenozoica reactivó la mayor parte de las fallas extensionales anteriores, a la vez que se generaron fracturas nuevas que aparecen, en algunos sectores, cortando a las anteriores. Relacionadas con las fallas inversas aparecen algunas estructuras de compensación lateral, tales como fallas de desgarre o rampas oblicuas. Las fallas de desgarre tienen una orientación NNO-SSE, un plano de falla subvertical o ligeramente inclinado hacia el ESE y un juego siniestral. Las rampas oblicuas presentan un trazado NE-SO con una ligera inclinación hacia el NO. En algún caso estas fracturas pueden ser antiguos cabalgamientos gondwánicos reactivados (Rodríguez Fernández et al., 1996b).

Los pliegues relacionados con esta etapa compresiva son escasos, en gran parte debido al pequeño acortamiento que se produce y el débil contraste de competencia entre las rocas a deformar. Las estructuras plegadas corresponden casi siempre a estructuras de gran radio y escala regional, con elevado ángulo entre flancos (Heredia et al., 2002).

La geometría profunda de las fallas inversas está condicionada por la del sistema extensional mesozoico. Las fallas inversas que son subverticales en superficie, se han interpretado con una geometría lítrica en profundidad, uniéndose a una superficie de despegue común (Cegarra et al., 1998b; Ramos, 1988; Rodríguez Fernández et al., 1999). Los datos sobre la situación del despegue principal en áreas cercanas (Allmendinger et al., 1990; Von Gosen, 1992), indican que éste se sitúa en torno a -4.000 m en la zona frontal de Precordillera, entre -6.000 y -8.000 m en el frente de la Cordillera y de -12.000 a -16.000 m en la parte más al oeste (frontera chilena).

La dirección de transporte tectónico obtenida por Rodríguez Fernández et al. (1999), indica un sentido de movimiento hacia el E (entre 91° y 100° E). La inversión de la mayor parte de las fallas normales sólo se puede poner de manifiesto cuando afectan a los materiales sinorogénicos terciarios, observándose, en estos casos, saltos que raramente superan 1 km. Esto implica que el acortamiento que presenta este sector de la cordillera, se sitúa en torno al 10% - 15% (Cegarra et al., 1998a; Rodríguez Fernández et al., 1999). Este dato contrasta con el acortamiento obtenido por Von Gosen (1992) en la unidad de Precordillera, en la que el citado autor reconoce un acortamiento superior al 50%. Se puede considerar que la deformación de la Cordillera Frontal durante el Cenozoico se ha producido sin apenas inversión tectónica, desplazándose hacia el este como un bloque transportado pasivamente a través del despegue basal y transfiriéndose la deformación hacia el sistema de cabalgamientos desarrollado por delante, en el área de Precordillera. En este contexto, la depresión de Rodeo-Uspallata-Iglesia representa una cuenca de tipo *piggy back* (Allmendinger et al., 1990; Heredia et al., 1996) y la Cordillera Frontal un bloque levantado, en el que se ha preservado la extensión mesozoica y en gran parte la estructuración gondwánica anterior (Heredia et al., 1996; Rodríguez Fernández et al., 1996b).

2.4. Depósitos de importancia económica asociados al Magmatismo Gondwánico en Cordillera Frontal y otros sectores

El magmatismo del Grupo Choiyoi tiene registros desde la Puna en el norte, extendiéndose hacia el sur hasta la provincia de Neuquén. Se asocia con un importante episodio metalogénico, evidenciado por numerosos depósitos hidrotermales genéticamente relacionados con los diferentes estadios de evolución del magmatismo. Los mismos presentan edades bien definidas y asignables a diferentes episodios de evolución tectónica (Sato et al., 2015; Strazzere et al., 2016). A cada uno de ellos se asocian depósitos de interés económico de diversos tipos, acorde al ambiente tectónico en el que se desarrollaron, el aporte de los fluidos, posición dentro de la corteza, etc. De este modo, el cinturón metalogénico asociado al magmatismo del Grupo Choiyoi (CMB: *Choiyoi Magmatic Belt*, Zappettini y Chernicoff, 2018) se compone de yacimientos asociados a un arco magmático en transición a un ambiente de extensión postorogénico.

Los principales depósitos hidrotermales asociados al cinturón CMB (Figura 2.7), incluyen pórfidos de Cu como La Voluntad (Neuquén), San Jorge (Mendoza), Yalguaraz (Mendoza), Poncha (San Juan); brechas tipo *pipe* representadas al sur del batolito de Colangüil en los depósitos de San Francisco de los Andes, La Fragüita y Amancay (San Juan); distritos mineros con vetas polimetálicas como Infiernillo/San Pedro (Mendoza), Las Opeñas (San Juan); depósitos vetiformes ricos en W y Sn como Arrequintín y La Majadita (San Juan); y depósitos epitermales de baja sulfuración como Don Sixto (Mendoza), Casoso (San Juan), Castaño Nuevo (San Juan), El Tapau (San Juan), entre otros (Llambías y Malvicini, 1966; Angelelli et al., 1984; Madrid y Williams, 1999; Williams et al., 1999; Rubinstein et al., 2002; Rubinstein et al., 2004; Delendatti, 2005; Rubinstein y Gargiulo, 2005; Sotarello et al., 2005; Cardó et al., 2008; Garrido et al., 2008, 2018; Cardó et al., 2009; Cardó et al., 2015; Gómez et al., 2015; Testa, 2016; Grignola, 2017; Mugas Lobos et al., 2018).

Otros dos cinturones magmáticos asignados al Permo-Triásico resultan relevantes en la distribución de depósitos hidrotermales de interés económico (Figura 2.8). El primero corresponde al Cinturón Gondwánico Norpatagónico (NPGb), desarrollado en sentido E-O en el norte del macizo nordpatagónico en un ambiente de arco en transición a colisional. Las mineralizaciones más destacadas incluyen vetas de wolframio (Mina San Martín en Río Negro, Angelelli et al., 1984) y vetas epitermales de Au-Ag (Los Menucos, Calcatreu en Río Negro). Asimismo, numerosos intrusivos, relacionados a magmatismo de arco fueron identificados, pero hasta el momento no se relacionan con ninguna mineralización, aunque podrían ser atractivos para la prospección de depósitos tipo pórfido de Cu (Zappettini y Chernicoff, 2018).

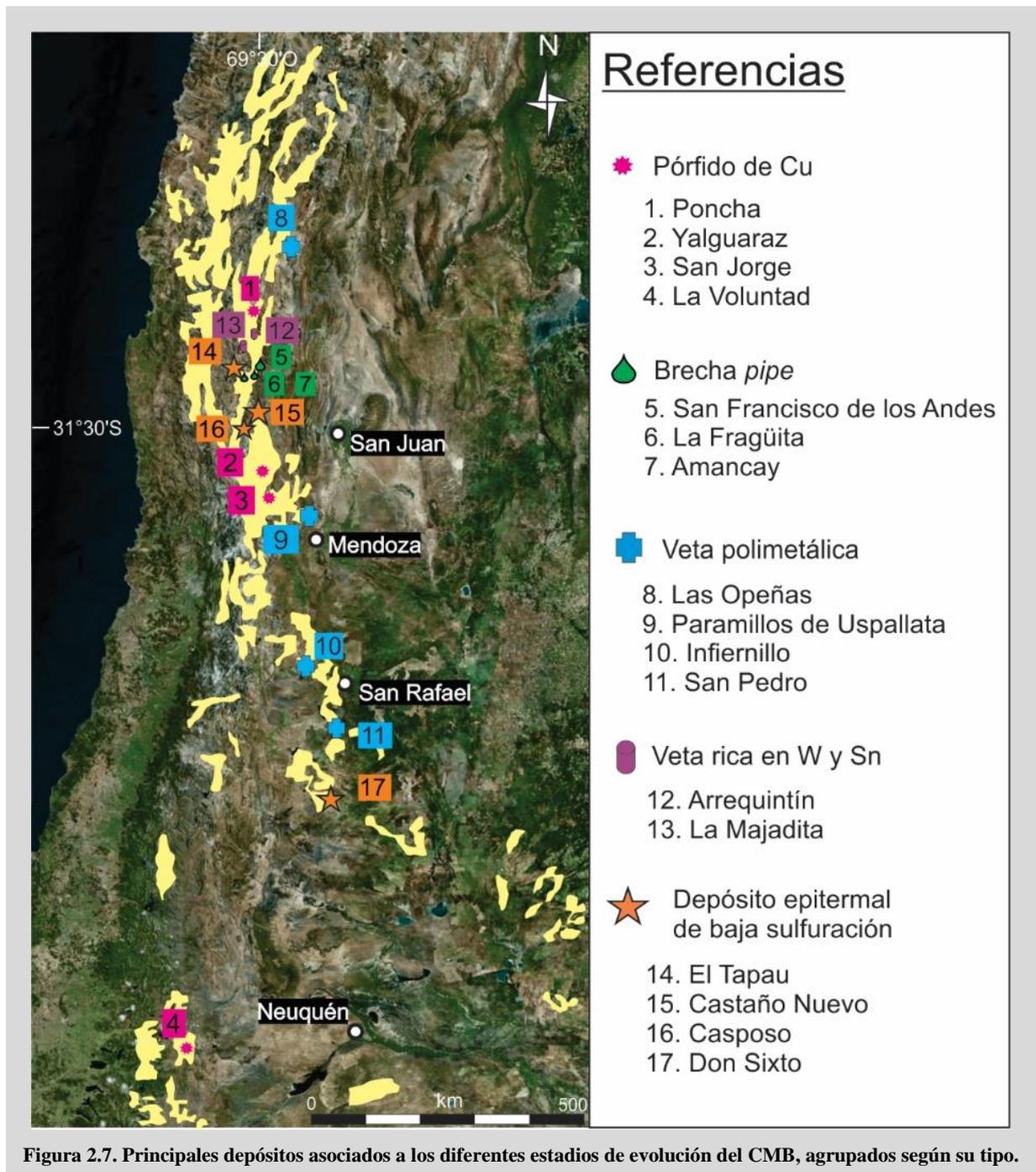
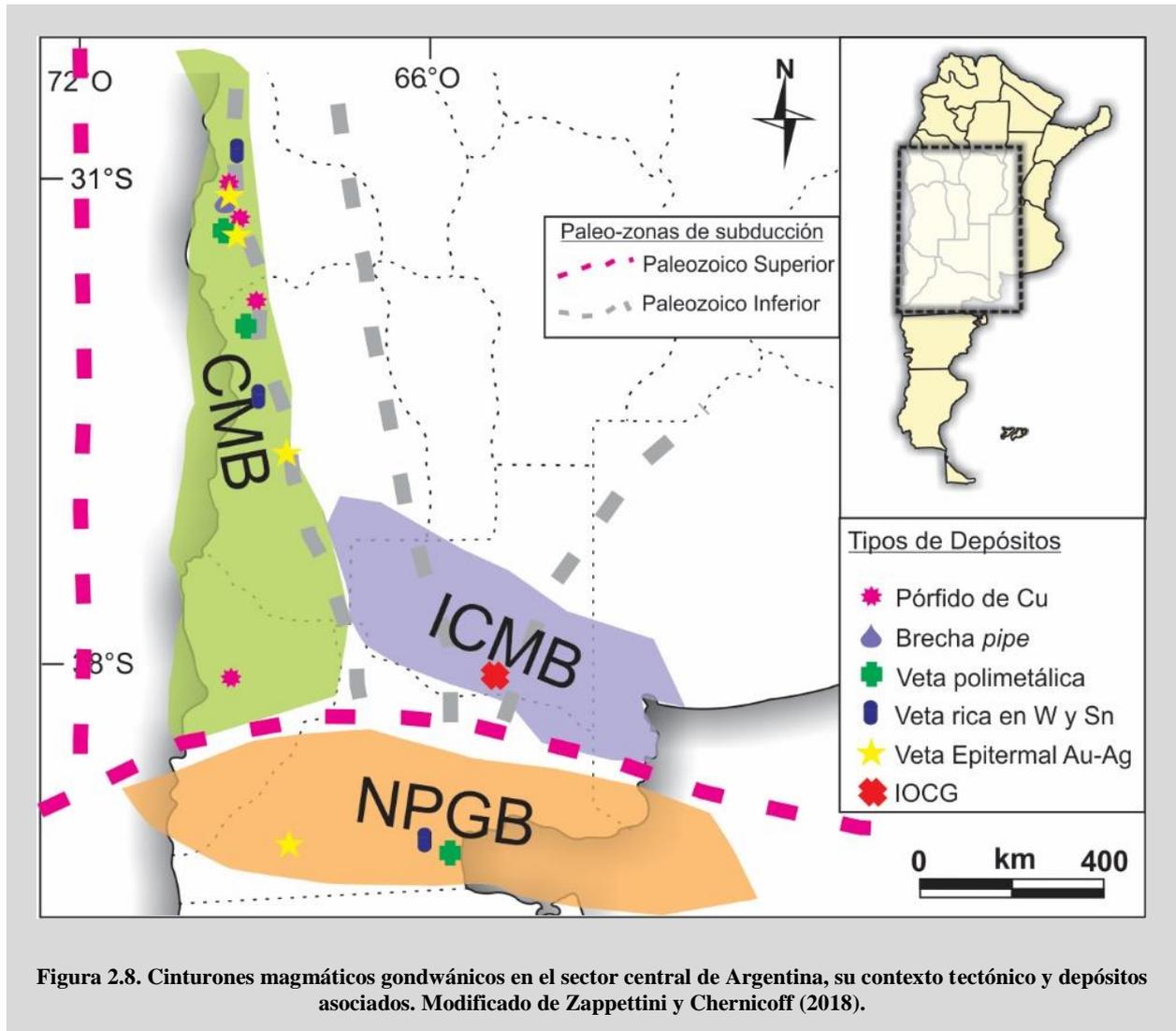


Figura 2.7. Principales depósitos asociados a los diferentes estadios de evolución del CMB, agrupados según su tipo.

Recientemente, Chernicoff et al. (2019) han re-evaluado el cinturón magmático intracratónico de La Pampa (ICMB), también de edad permo-triásica, permitiendo separarlo de los dos cinturones mencionados en los párrafos anteriores. La provincia de La Pampa presenta una extensa cubierta cuaternaria y sólo un 5% de los afloramientos corresponden a rocas gondwánicas. De esas rocas, los mejores exponentes corresponden a ignimbritas riolíticas y granitos peraluminosos. Por el momento no se conocen depósitos minerales de interés económico, a excepción de vetas de Cu-Fe caracterizadas por hematita y sulfuros de Cu en cercanías a Lihue Calel que fueron explotadas por los jesuitas en el siglo

XIX (Llambías, 2008). Las anomalías geofísicas identificadas en esta área junto con el contexto geotectónico permiten establecer la presencia de stocks graníticos relacionados al magmatismo del Paleozoico superior (Chernicoff y Zappettini, 2004), y posibles depósitos tipo IOCG (*Iron oxide copper gold deposits*) asociados (Zappettini y Chernicoff, 2018).



2.5. Trabajos citados en el Capítulo 2

- Allmendinger, R.W., Figueroa, D., Snyder, D., Mpodozis, C. e Isacks, L. 1990. Foreland shortening and crustal balancing in the Andes at 30° S latitude. *Tectonics* 9: 789–809.
- Amos, A.J. y Marchese, H.L. 1965. Acerca de una nueva interpretación de la estructura del Carbónico en la Ciénaga del Medio. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 20: 263–270.
- Angelelli, V., Etcheverry, R., Tomasi, C. y González, A. 1984. Yacimientos Metalíferos de la República Argentina, 1ra ed., tomo 2: 444-445, Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata.
- Azcuy, C.L., Beri, A., Bernardes-de-Oliveira, M.E.C., Carrizo, H.A., di Pasquo, M., Díaz Saravia, P., González, C., Iannuzzi, R., Lemos, V.B., Melo, J.H.G., Pagani, A., Rohn, R., Rodríguez Amenábar, C., Sabattini, N., Souza, P.A., Taboada, A.C. y Vergel, M.M. 2007. Bioestratigrafía del Paleozoico Superior de América del Sur: Primera etapa de trabajo hacia una nueva propuesta cronoestratigrafica. *Publicación Especial Asociación Geológica Argentina* 11: 65.
- Azcuy, C.L. y Caminos, R. 1987. Diastrofismo. En Archangelsky, S. (Ed.), *El Sistema Carbonífero en la República Argentina*. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, pp. 239–251.
- Basei, M.A.S., Ramos, V.A., Vujovich, G.I. y Poma, S. 1998. El basamento metamórfico de la Cordillera Frontal de Mendoza: nuevos datos geocronológicos e isotópicos. *X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica*. Buenos Aires. Actas II: 412-417.
- Busquets, P., Limarino, C.O., Cardó, R., Méndez-Bedia, I., Gallastegui, G., Colombo, F., Heredia, N. y Césari, S.N. 2013. The neopaleozoic of the Sierra de Castaño (Andean Cordillera Frontal, San Juan, Argentina): Tectonic and paleoenvironmental reconstruction. *Andean Geology* 40 (1): 172-195.
- Caballé, M., 1986. Estudio geológico del sector oriental de la Cordillera Frontal, entre los ríos Manrique y Calingasta (Provincia de San Juan). Tesis Doctoral Universidad Nacional de La Plata (inérita), 205p., La Plata.
- Caminos, R. 1965. Geología de la vertiente oriental del Cordón del Plata, Cordillera Frontal de Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 20: 351-392.
- Caminos, R., 1979. Cordillera Frontal. En Turner, J.C.M. (Ed.): *Segundo Simposio de Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba. Córdoba. Volumen I: 397-453.
- Cardó, R., Segal, S., Korzeniewski, L, Palacio M.B. y Chernicoff, C.J. 2008. Estudio metalogénico de brechas hidrotermales portadoras de mineralización de Bi-Au-Cu en el ámbito de la Cordillera Frontal, provincia de San Juan. Serie contribuciones técnicas N°31. Servicio Geológico Minero Argentino. 48 pp. Buenos Aires.
- Cardó, R., Díaz, I.N., Catnich, J., Litvak, V.D., Marquetti, C. y García Mestre, A. 2009. Carta Minero-Metalogénica 2969-III Malimán. Provincia de San Juan y La Rioja. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero. Boletín 355, 108 pp. Buenos Aires.
- Cardó, R., Godeas, M., Márquez, M., Ramallo, E. y Zanettini, J.C. 2015. Las fajas metalogénicas cupríferas de la República Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino. *Anales N°LIII*. 158 pp. Buenos Aires.
- Cegarra, M.I., Ragona, D.E. y Garcia Espina, R. 1998a. Estructura de la Cordillera Frontal de la Región de Castaño Nuevo, provincia de San Juan. *X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica*. Buenos Aires. Actas II: 167-173.
- Cegarra, M.I., Ragona, D.E. y Garcia Espina, R. 1998b. Estratigrafía de la Región de Castaño Nuevo,

- provincia de San Juan. X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica. Buenos Aires. Actas I: 85-90.
- Césari, S.N., Busquets, P., Méndez-Bedia, I., Colombo, F., Limarino, C.O., Cardó, R. y Gallastegui, G. 2012. A late Paleozoic fossil forest from the southern Andes, Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 333-334: 131-147.
- Chernicoff, C.J. y Zappettini, E.O. 2004. Geophysical evidence for terrane boundaries in southcentral Argentina. *Gondwana Research* 7: 1105-1116.
- Chernicoff, C.J., Zappettini, E.O., Santos, J.O. y McNaughton, N. 2019. El Corredor Magmático Intracratónico Pérmico-Triásico de la provincia de La Pampa, Argentina: nuevas edades U-Pb SHRIMP, composición isotópica de Hf e implicancias geodinámicas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 36: 13-26.
- Delendatti, G.L., Gargantini, H. y Ceballos, J. 2003. Las vetas epitermales del Complejo Mineralizado Castaño Nuevo, Cordillera Frontal sanjuanina. X Congreso Geológico Chileno. Concepción, Actas: 1-8.
- Delendatti, G.L. 2005. Caracterización genética del complejo mineralizado Castaño Nuevo y su relación con el magmatismo Gondwánico en Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Juan (inédita), 213p. San Juan.
- Dessanti, R.N. 1956. Descripción Geológica de la Hoja 27c “Cerro Diamante” (Provincia de Mendoza). Carta Geológico-Económica de la República Argentina. Escala 1:200000. Boletín 85: 86p. Servicio Nacional Geológico Minero. Buenos Aires.
- Espina, R.G., Cegarra, M.I., Ragona, D., González, P. y Lo Forte, G.L. 1998. Hoja 3169-20 Castaño Nuevo, provincia de San Juan, Argentina, escala 1:250.000. Buenos Aires.
- Furque, C. y Baldis, B.A. 1973. Nuevos enfoques estratigráficos en el Paleozoico del Noroeste de la Precordillera. V Congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca, Vol III: 241-252.
- Garrido, M., Barra, F., Domínguez, E., Ruiz, J. y Valencia, V. 2008. Late Carboniferous porphyry copper mineralization at La Voluntad, Neuquén, Argentina: Constraints from Re – Os molybdenite dating. *Mineralium Deposita* 43: 591-597.
- Garrido, M., Grecco, L.E., Gonzalez, M. V. y Pavón Pivetta, C.M. 2018. Petrography, geochemistry and geochronology of San Jorge porphyry Cu-Au deposit, Mendoza, Argentina. Constraints for the timing of magmatism and associated mineralization. *Acta Geológica Lilloana* 30: 1-22.
- Gómez, A.L.R., Rubinstein, N.A. y Valencia, V.A. 2015. Gondwanan magmatism with adakite-like signature linked to Cu (Mo)-porphyry deposits from the San Rafael Massif, Mendoza Province, Argentina. *Chemie der Erde* 75: 89-104.
- González, P.D. y Sato, A.M. 1998. Petrología, geoquímica y geocronología del magmatismo de la Hoja 3169-20, “Castaño Nuevo”. Provincia de San Juan, Argentina. SEGEMAR. Buenos Aires.
- Grignola, S. 2017. El Deposito de Casposo epitermal de baja sulfuración de oro – plata: Alteración hidrotermal e implicancias geocronológicas en la mineralización de oro – plata, rocas volcánicas, diques y granitoides asociados espacialmente, San Juan – Argentina. Tesis Doctoral (inédita). Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo. 206p.
- Grober, P., 1938. Mineralogía y Geología. Espasa-Calpe Argentina, Buenos Aires.
- Grober, P. 1946. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70°. Hoja Geológica Chos Malal. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 1: 117-208.

- Groeber, P. 1948. Geología de la Provincia de San Juan: Datos Geológicos. Buenos Aires.
- Heredia, N., Rodríguez Fernández, L.R. y Ragona, D. 1996. Estructura extensional e inversión tectónica en los Andes argentinos entre los 30°30' y 31°00' S. *Geogaceta* 20: 864-866.
- Heredia, N., Rodríguez Fernández, L.R., Gallastegui, G., Busquets, P. y Colombo, F. 2002. Geological setting of the Argentine Frontal Cordillera in the flat-slab segment (30°00' - 31°30' S latitude). *Journal of South American Earth Science* 15: 79-99.
- Isacks, B.L. y Barazangi, M., 1977. Geometry of Benioff Zones: Lateral Segmentation and Downwards bending of the subducted lithosphere. Talwani M., Pitman W.C. III (Eds.), *Island Arcs, Deep Sea Trenches, and Back-Arc Basins*, Maurice Ewing Ser., American Geophysical Union, Washington, DC. Vol 1: 99-114.
- Kay, S.M., Ramos, V.A., Mpodozis, C. y Sruoga, P. 1989. Late Paleozoic to Jurassic silicic magmatism at the Gondwana margin: Analogy to the middle Proterozoic in North America. *Geology* 17: 324-328.
- Kleiman, L.E. y Japas, M.S. 2009. The Choiyoi volcanic province at 34°S-36°S (San Rafael, Mendoza, Argentina): Implications for the Late Palaeozoic evolution of the southwestern margin of Gondwana. *Tectonophysics* 473: 283-299.
- Llambías, E.J. y Malvicini, L. 1966. Metalogénesis asociada a los plutones graníticos de la Cordillera Frontal, entre la Quebrada de Agua Negra y Río Castaño, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 21: 239-261.
- Llambías, E.J. y Sato, A.M. 1990. EL batolito de Colangiül (29-31°S) Cordillera Frontal de Argentina. *Revista Geológica de Chile* 17: 89-108.
- Llambías, E.J., Kleiman, L. y Salvarredi, J.A. 1993. El magmatismo gondwánico. En *Geología y Recursos Naturales de Mendoza - XII Congreso Geológico Argentino*. Relatorio 1 (3): 53-64.
- Llambías, E.J. y Sato, A.M. 1995. El batolito de Colangiül: Transición entre orogénesis y anorogénesis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 50: 111-131.
- Llambías, E.J., Quenardelle, S. y Montenegro, T. 2003. The Choiyoi Group from central Argentina: A subalkaline transitional to alkaline association in the craton adjacent to the active margin of the Gondwana continent. *Journal of South American Earth Science* 16: 243-257.
- Llambías, E.J. 2008. La Sierra de Lihuel Calel. En Anselmi, G., Ardolino, A., Echeverría, A. Etcheverría, M., Franchi, M., Lagorio, S. (Eds.) *Sitios de interés geológico*. IGRM. SEGEMAR. Buenos Aires, pp. 537 - 550
- López de Azarevich, V.L., Escayola, M., Azarevich, M.B., Pimentel, M.M. y Tassinari, C. 2009. The Guarguaraz Complex and the Neoproterozoic-Cambrian evolution of southwestern Gondwana: Geochemical signatures and geochronological constraints. *Journal of South American Earth Science* 28: 333-344.
- Madrid, J. y Williams, W. 1999. Pórfido cuprífero de Yalguaraz, Mendoza. En: Zappettini, E. (Ed.), *Recursos Minerales de la República Argentina*, SEGEMAR, Buenos Aires, Anales 35: 789-796.
- Maksaev, V., Moscoso, R., Mpodozis, C. y Nasi, C. 1984. Las unidades volcánicas y plutónicas del Cenozoico Superior en la alta cordillera del Norte Chico (29°-31°): geología, alteración hidrotermal y mineralización. *Revista Geológica de Chile* 21: 11-51.
- Mpodozis, C. y Kay, S.M. 1990. Provincias magmáticas ácidas y evolución tectónica del Gondwana: Andes Chilenos (28-31 S). *Revista Geológica de Chile* 17 (2): 153-180.
- Mpodozis, C. y Kay, S.M. 1992. Late Paleozoic to Triassic evolution of the Gondwana margin: evidence

- from Chilean Frontal cordilleran batholiths (28°S to 31°S). *Geological Society of America Bulletin* 104 (8): 999–1014.
- Mugas Lobos, A.C., Márquez Zavalía, M.F., Galliski, M.A. y Wälle, M. 2018. The Permian-Triassic low sulfidation epithermal Au deposit of Don Sixto, Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 75 (3): 441-456.
- Polanski, J. 1958. El bloque Variscico de la Cordillera Frontal de Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 12: 165–196.
- Polanski, J. 1970. Carbónico y Pérmico de la Argentina. EUDEBA, Manuales. Buenos Aires.
- Ramos, V.A. 1988. The tectonics of the Central Andes; 30° to 33° S latitude. En Clark Jr., S.P., Burchfiel, B.C., Suppe, J. (Eds.). *Processes in Continental Lithospheric Deformation*. Geological Society of America, pp. 31–54.
- Ramos, V.A., 1999. Las Provincias Geológicas del Territorio Argentino, in: Caminos, R. (Ed.), *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales - SEGEMAR, pp. 49–96.
- Rocher, S., Vallecillo, G., Castro de Machuca, B. y Alasino, P. 2015. El Grupo Choiyoi (Pérmico temprano-medio) en la Cordillera Frontal de Calingasta, San Juan, Argentina: volcanismo de arco asociado a extensión. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 32: 415–432.
- Rodríguez Fernández, L.R., Heredia, N., Gallastegui, G., Quesada, C., Robador, A., Marín, G., Cardó, R., 1996a. Hoja 3169-14: Paraje Castaño Viejo. Escala 1:250.000. SEGEMAR. Buenos Aires.
- Rodríguez Fernández, L.R., Heredia, N., Martín, G., Quesada, C., Robador, A., Ragona, D. y Cardó, R., 1996b. Tectonoestratigrafía y estructura de los Andes Argentinos entre los 30°30' y 31°00' de Latitud S. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas II. 111-124. Buenos Aires.
- Rodríguez Fernández, L.R., Heredia, N., Espina, R.G. y Cegarra, M.I. 1999. Estratigrafía y estructura de los Andes Centrales Argentinos entre los 30° y 31° de Latitud Sur. *Acta Geológica Hispana* 32: 51-75.
- Rubinstein, N., Carpio, F. y Mallimacci, H., 2002. Las vetas polimetálicas del área del Cerro San Pedro, provincia de Mendoza, Argentina. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 263-266, El Calafate.
- Rubinstein, N.A., Ostera, H.A., Mallimacci, H. y Carpio, F. 2004. Lead isotopes from Gondwanan polymetallic ore vein deposits, San Rafael Massif, Argentina. *Journal of South American Earth Science* 16: 579-586.
- Rubinstein, N.A. y Gargiulo, M.F. 2005. Análisis textural de cuarzo hidrotermal del depósito El Pantanito, provincia de Mendoza: Nuevos aportes sobre su génesis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60: 96-103.
- Sato, A.M. y Llambías, E.J. 1993. El Grupo Choiyoi, Provincia de San Juan: Equivalente efusivo del Batolito de Colangüil. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Mendoza. Actas IV: 156-165.
- Sato, A.M., Llambías, E.J., Basei, M.A.S. y Castro, C.E. 2015. Three stages in the Late Paleozoic to Triassic magmatism of southwestern Gondwana, and the relationships with the volcanogenic events in coeval basins. *Journal of South American Earth Science* 63: 48-69.
- Serafini, R., 1982. Posibilidades de los yacimientos de plata y oro del sector oeste del distrito Castaño Nuevo. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad Nacional de San Juan (inédito). 205p. San Juan.
- Sotarello, G., Belvideri, I., Castro de Machuca, B., Fernández, G., Machuca, E. y Mc Guinty, W. 2005. Avances en el conocimiento y exploración del depósito epitermal de oro y plata Casposo, Departamento

- Calingasta, provincia de San Juan. VIII Congreso Argentino de Geología Económica. Acta: 299-306. Buenos Aires.
- Spalletti, L.A., Limarino, C.O. y Piñol, F.C. 2012. Petrology and geochemistry of Carboniferous siliciclastics from the Argentine Frontal Cordillera: A test of methods for interpreting provenance and tectonic setting. *Journal of South American Earth Science* 36: 32-54.
- Stipanovic, P.N., Rodrigo, F., Baulfés, O.I. y Martínez, C.G. 1968. Las formaciones prenesonianas en el denominado Maciso Nordpatagónico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 23: 67-98.
- Strazzere, L., Gregori, D.A. y Dristas, J.A. 2006. Genetic evolution of Permo-Triassic volcanoclastic sequences at Uspallata, Mendoza Precordillera, Argentina. *Gondwana Research* 9: 485-499.
- Strazzere, L. y Gregori, D.A. 2011. Estratigrafía y evolución del Grupo Choiyoi entre Rincón de los Vallecillos (Cordillera Frontal) y Pampa de Canota (Precordillera Mendocina) provincia de Mendoza. XVIII Congreso Geológico Argentino, Neuquén, Argentina. Actas: 1514.
- Strazzere, L., Gregori, D.A. y Benedini, L. 2016. Early Permian arc-related volcanism and sedimentation at the western margin of Gondwana: Insight from the Choiyoi Group lower section. *Geoscience Frontiers* 7: 715-731.
- Testa, F.J. 2016. Geology, alteration, mineralization and geochemistry of tourmaline breccia complexes in the Andes: Rio Blanco-Los Bronces, Chile and San Francisco de Los Andes, Argentina. PhD Thesis. University of Tasmania (inérita). 460p. Hobart, Australia.
- Tickyj, H., Rodriguez Raising, M., Cingolani, C.A., Alfaro, M. y Uriz, N. 2009. Graptolitos Ordovícicos en el Sur de la Cordillera Frontal de Mendoza, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64: 294-301.
- Volkheimer, W., 1978. Descripción Geológica de la Hoja 27b, Cerro Sosneado, provincia de Mendoza. Carta Geológico-Económica de la República Argentina. Escala 1:200.000. Boletín 157, 87 p. Servicio Geológico Nacional. Buenos Aires.
- Von Gosen, W. 1992. Structural evolution of the Argentine Precordillera: the Rio San Juan section. *Journal of Structural Geology* 14: 643-667.
- Williams, W.C., Meissl, E., Madrid, J. y Castro de Machuca, B. 1999. The San Jorge porphyry copper deposit, Mendoza, Argentina: a combination of orthomagmatic and hydrothermal mineralization. *Ore Geology Reviews* 14: 185-201.
- Zappettini, E.O. y Chernicoff, C.J. 2018. Metallogenic Implications of Redefining the Upper Paleozoic Magmatism in Argentina: Tectonic settings and related deposit models. IAGOD, 15th Quadrennial IAGOD International Association on the Genesis of Ore Deposits Symposium, Actas: 144-145, SEGEMAR, Salta.

Capítulo 3: Geología Local del Distrito Minero Castaño Nuevo

3.1. Introducción

3.2. Metodología

3.3. Resultados

3.3.1. Unidades litológicas identificadas

3.3.2. Litogeoquímica de las Unidades

3.3.2.1. Clasificación química de las unidades

3.3.2.2. Diagramas discriminantes de ambientes tectónicos y filiación magmática

3.3.2.3. Diagramas multielementos

3.3.3. Edad de las Unidades

3.3.3.1. Edad de la Unidad I

3.3.3.2. Edad de la Unidad III

3.3.3.3. Edad de los intrusivos básicos

3.3.4. Estructuras locales y su relación con la estructuración regional

3.4. Discusión de los Resultados y Conclusiones

3.5. Trabajos citados en el Capítulo 3

Capítulo 3: Geología Local del Distrito Minero Castaño Nuevo

3.1. Introducción

Los afloramientos dentro del Distrito Minero Castaño Nuevo constituyen una secuencia estratificada en bancos groseros de hasta 5 m de potencia, de rocas volcánicas y piroclásticas. La intensa alteración en el sector sur enmascara las características originales de las rocas y ha dificultado su correcta clasificación.

De acuerdo a los trabajos regionales citados en el Capítulo 2, la totalidad de las rocas aflorantes en el distrito pertenece al Grupo Choiyoi. Espina et al. (1998) en la Hoja 3169-20: Castaño Nuevo definen, para el sector estudiado, la presencia de un cuerpo subvolcánico denominado Pórfido Andesítico emplazado en volcanitas de la Formación Vega de los Machos. De igual modo, Cegarra et al. (1998) y Heredia et al. (2002) describen un cuerpo subvolcánico intruyendo a las volcanitas andesíticas en este sector. En el texto explicativo que acompaña la hoja geológica mencionada anteriormente (González y Sato, 1998), se describe la petrografía, geoquímica y geocronología de todos los cuerpos intrusivos subvolcánicos asociados al Magmatismo Gondwánico, a excepción del Pórfido Andesítico de Castaño Nuevo, por lo que no se cuenta con mayores detalles ni descripción sobre este cuerpo.

Los primeros trabajos de detalle en este sector postulan, como roca hospedante de las mineralizaciones del Distrito Minero Castaño Nuevo, a un pórfido andesítico rojizo, cuyos contactos intrusivos son poco claros y no pudieron delimitarse correctamente (Angelelli, 1950; Alonso, 1982; Serafini, 1982; Angelelli et al. 1984). De igual modo, las primeras contribuciones de Delendatti (2003) y Delendatti et al. (2001, 2002, 2003) establecían al Pórfido Andesítico como roca de caja de las mineralizaciones. Las publicaciones más recientes de este autor postulan a las volcanitas de la Formación Vega de Los Machos como las rocas hospedantes de los sistemas hidrotermales (Delendatti, 2005a, 2005b).

En el presente capítulo se describen en detalle las rocas aflorantes, se muestra una columna estratigráfica basada en las relaciones de campo y en dataciones radimétricas. Se identifican los lineamientos regionales, así como los rasgos estructurales de menor escala que caracterizan al distrito. Se presentan además los resultados de litogeoquímica y se colocan las unidades en un contexto geotectónico, relacionando la geología del Distrito Minero Castaño Nuevo con los eventos geológicos que pudieron dar origen al mismo.

3.2. Metodología

En primer lugar se procedió a confeccionar un mapa a escala 1:1.000 cubriendo la totalidad del área. También se realizaron observaciones sobre la margen derecha del río para completar la columna estratigráfica y establecer correctamente la relación entre las unidades. Asimismo, se observaron la totalidad de testigos de perforación con diamantina (4.453,55 m) obtenidos durante las campañas de exploración de la empresa Troy Resources Ltd.

Se seleccionaron muestras representativas tanto de superficie, como de labores subterráneas y sondajes. Se efectuaron descripciones macroscópicas bajo lupa binocular y se confeccionaron cortes delgados en el Laboratorio de Petrotomía de la Universidad Nacional del Sur / INGEOSUR - CONICET para su análisis bajo microscopio óptico.

Luego de las descripciones petrográficas se procedió a la confección de una columna tentativa, en base a la cual se seleccionaron 13 muestras para ser analizadas en los laboratorios de la empresa ALS Global con sede en la ciudad de Mendoza. Las muestras fueron analizadas bajo la rutina CCP-PKG01 que comprende elementos mayoritarios, minoritarios, traza y elementos del grupo de las tierras raras. Este tipo de análisis combina varios métodos para obtener una caracterización completa de la muestra, involucrando el análisis de Fluorescencia de Rayos X *ME-XRF26* / *OA-GRA05* para los elementos mayoritarios, mientras que los elementos trazas y los del grupo de las tierras raras son reportados a partir del análisis *ME-MS81*. En la tabla 3.1. se presentan los límites de detección de cada uno de los elementos analizados y el tratamiento al que fueron sometidas las muestras. La localización de las muestras seleccionadas para el análisis litogeoquímico se muestra en la Figura 3.1 (puntos amarillos).

Por otra parte, se seleccionaron 4 muestras para geocronología con el fin de establecer las edades absolutas de las unidades identificadas y acotar temporalmente la mineralización. La metodología adoptada consistió en la datación U/Pb en circones. Dicho análisis fue realizado por el equipo del CET (*Center of Exploration and Targeting*) de la Universidad de Western Australia (Perth) y reportado por el Dr. João Orestes Schneider Santos. Las muestras fueron finamente trituradas, molidas y tamizadas a malla 60. Los minerales pesados fueron separados utilizando un líquido denso (3 g/cm^3), tetrabromuro de etano (TBE). Las fases pesadas fueron tratadas nuevamente con un separador *Franz* para eliminar los minerales magnéticos (magnetita). Los circones finalmente fueron separados manualmente y montados en discos de *Epoxy* (UWA N15-11) junto con fragmentos de estándares. Una vez montados los granos, se procedió a pulir la superficie hasta desgastar aproximadamente un cuarto de los cristales y así obtener una superficie plana para cubrirlos con una lámina de carbono.

Código de Análisis	Elemento	Unidad	Límite Inferior	Límite Superior	Preparación de la muestra	Método Analítico
ME-XRF26	Al ₂ O ₃	%	0,01	100	Fusión con tetraborato de litio	Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X (XRF)
	BaO	%	0,01	66		
	CaO	%	0,01	60		
	Cr ₂ O ₃	%	0,01	10		
	Fe ₂ O ₃	%	0,01	100		
	K ₂ O	%	0,01	15		
	MgO	%	0,01	50		
	MnO	%	0,01	39		
	Na ₂ O	%	0,01	10		
	P ₂ O ₅	%	0,01	46		
	SO ₃	%	0,01	34		
	SiO ₂	%	0,01	100		
SrO	%	0,01	1,5			
TiO ₂	%	0,01	30			
OA-GRA05	LOI	%	0,01	100	Termogravimetría (TGA)	Gravimétrico
ME-MS81	Ba	ppm	0,5	10000	Fusión con tetraborato de litio, digestión ácida	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
	Ce	ppm	0,1	10000		
	Cr	ppm	10	10000		
	Cs	ppm	0,01	10000		
	Dy	ppm	0,05	1000		
	Er	ppm	0,03	1000		
	Eu	ppm	0,03	1000		
	Ga	ppm	0,1	1000		
	Ge	ppm	5	1000		
	Gd	ppm	0,05	1000		
	Hf	ppm	0,2	10000		
	Ho	ppm	0,01	10000		
	La	ppm	0,1	10000		
	Lu	ppm	0,01	1000		
	Nb	ppm	0,5	2500		
	Nd	ppm	0,1	10000		
	Pr	ppm	0,03	1000		
	Rb	ppm	0,2	10000		
	Sm	ppm	0,03	1000		
	Sn	ppm	1	10000		
	Sr	ppm	0,1	10000		
	Ta	ppm	0,1	2500		
	Tb	ppm	0,01	1000		
	Th	ppm	0,05	1000		
	Tm	ppm	0,01	1000		
	U	ppm	0,05	1000		
	V	ppm	5	10000		
	W	ppm	1	10000		
Y	ppm	0,1	10000			
Yb	ppm	0,03	1000			
Zr	ppm	2	10000			

Tabla 3.1. Límites de detección de los análisis efectuados en el laboratorio ALS Global. Datos tomados de <https://www.alsglobal.com/en/services-and-products/geochemistry/geochemistry-testing-and-analysis/whole-rock-analysis-and-lithochemisrty>

Los circones montados y cubiertos con carbono fueron analizados con el microscopio electrónico de barrido (*Scanning Electron Microscope*, SEM Tescan VEGA) del Centro de Microscopía y Microanálisis de la Universidad de Western Australia (UWA). Se obtuvieron imágenes de barrido de electrones retrodispersados (*backscattered electrons*) que permitieron el estudio de la morfología interna de cada cristal y así definir la localización de los puntos a ser analizados. La cobertura de carbono fue removida y el disco nuevamente fue cubierto, pero esta vez con oro de modo tal de permitir una

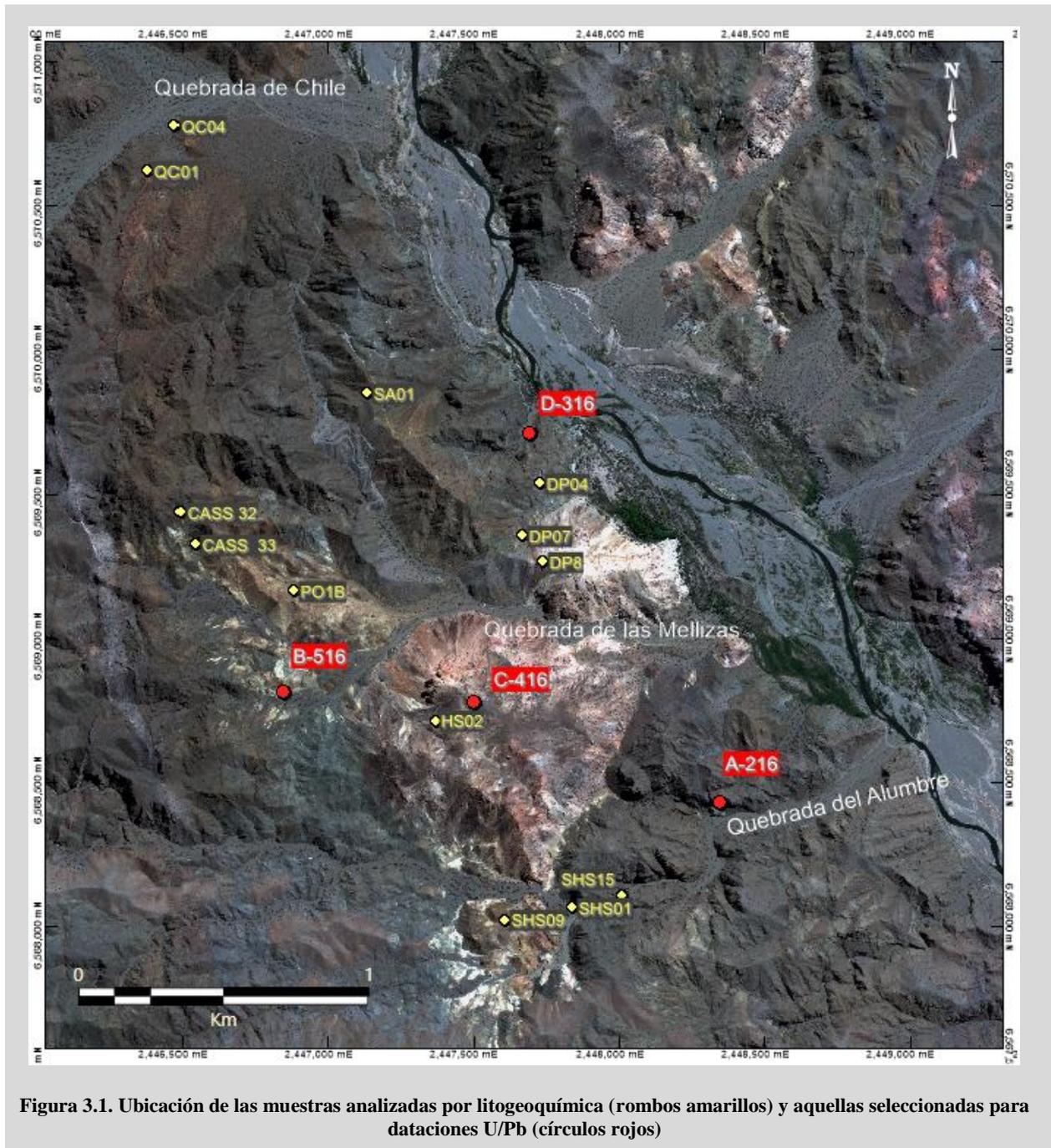
conductividad eléctrica uniforme para el análisis isotópico mediante la microsonda *Sensitive High-mass Resolution Ion MicroProbe* (SHRIMP).

Los estándares utilizados fueron BR266 (559 Ma, 903 ppm U, Stern, 2001) como estándar principal. La composición isotópica de los cristales de circón fue determinada mediante SHRIMP II (De Laeter y Kennedy, 1998) aplicando el método basado en el trabajo experimental de Compston et al. (1992). Un haz primario de iones de 4nA, 10 kVO₂, con un diámetro aproximado de 25 µm se enfocó sobre la superficie de cada cristal. Las correcciones de Pb común se llevaron a cabo utilizando las mediciones de ²⁰⁴Pb y la composición isotópica de Pb de la galena Broken Hill. Para cada análisis puntual, previo a cada medición, se efectuó una pre-pulverización iónica de unos 60 a 90 segundos para evitar analizar el Pb proveniente de la cobertura de oro.

La información obtenida fue reducida usando el software SQUID (Ludwig, 2002) y los valores fueron ploteados en diagramas de concordia empleando el software ISOPLOT/Ex (Ludwig, 1999). Las elipses de error muestran un nivel de confianza del 95% (2σ).

La localización de las muestras seleccionadas para el análisis isotópico se muestra en la Figura 3.1 (puntos rojos). De acuerdo a las relaciones estratigráficas regionales, la edad esperada para la totalidad de las muestras es relativamente joven (neopaleozoica), siendo los resultados esperados fuertemente ligados a la relación ²⁰⁶Pb/²³⁸U en lugar de ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb. Por este motivo, la rutina de análisis fue modificada duplicando las cuentas de ²⁰⁶Pb a 20 segundos para cada escaneo. En cada punto analizado, dentro cada cristal individual, se realizaron entre cinco y seis repeticiones de lecturas, en los cuales se recolectó las siguientes composiciones isotópicas: ¹⁹⁶Zr₂O, ²⁰⁴Pb, background, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb, ²³⁸U, ²⁴⁸ThO, y ²⁶⁴UO. Un gran número de circones fueron seleccionados por cada muestra (más de 50), de modo tal de poder seleccionar los cristales con las mejores áreas internas para analizar, excluyendo aquellos con micro-inclusiones, micro-fracturas y zonas en estado metamórfico.

Para definir la geología estructural se llevaron a cabo mapeos de detalle en sectores seleccionados de acuerdo a las relaciones entre unidades, presencia de brechas asociadas a movimientos, o planos que indicaran desplazamiento. Se midieron diaclasas, fracturas, planos de falla, estrías de falla. Los indicadores cinemáticos fueron utilizados para establecer el movimiento de las fallas y en los casos en que éstos no estaban presentes se infirió el comportamiento de las estructuras por las relaciones de campo de las unidades.



3.3. Resultados

En el sector estudiado las rocas aflorantes conforman una secuencia volcánico-piroclástica de rumbo general NNE, buzando con bajos ángulos hacia el SE. En base a los mapeos de detalle se reconocieron 3 unidades principales que se describen a continuación y cuyas relaciones se muestran en la figura 3.2.

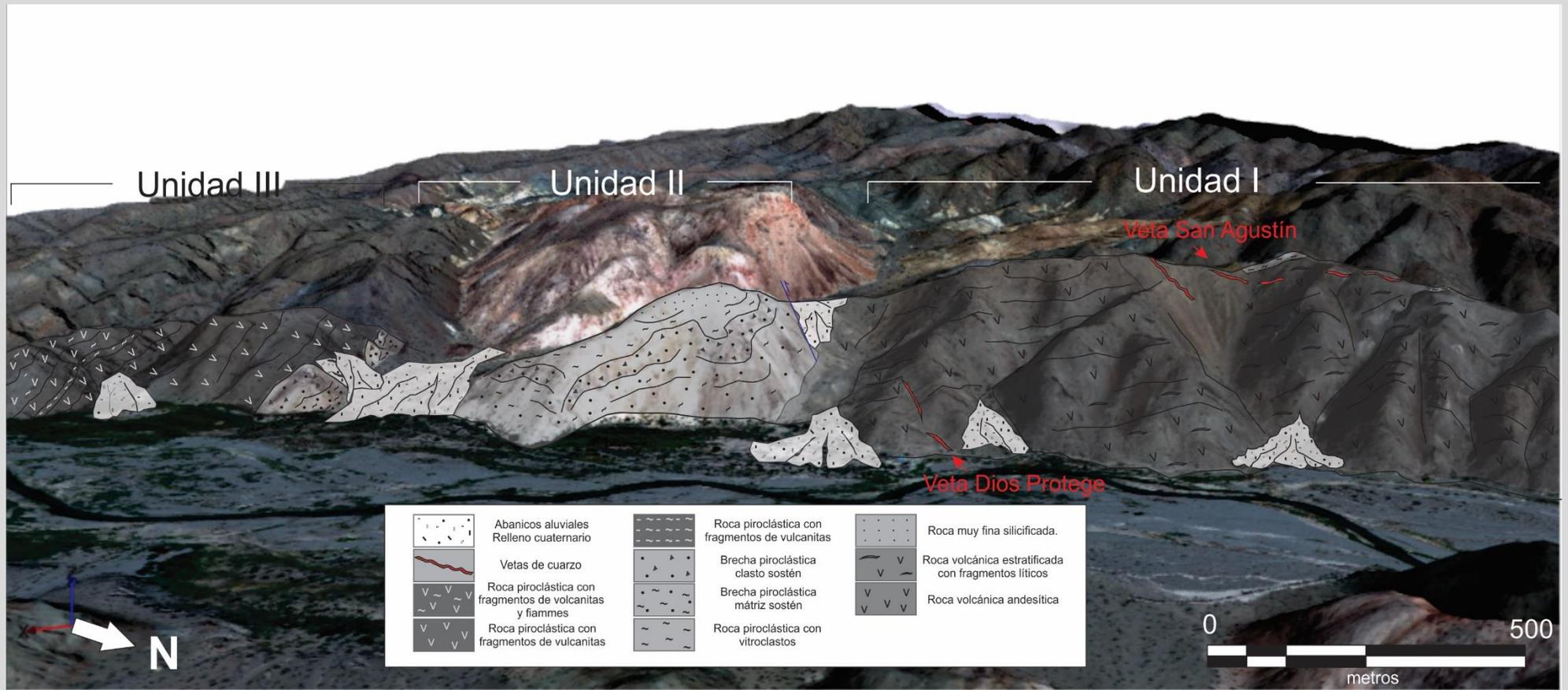
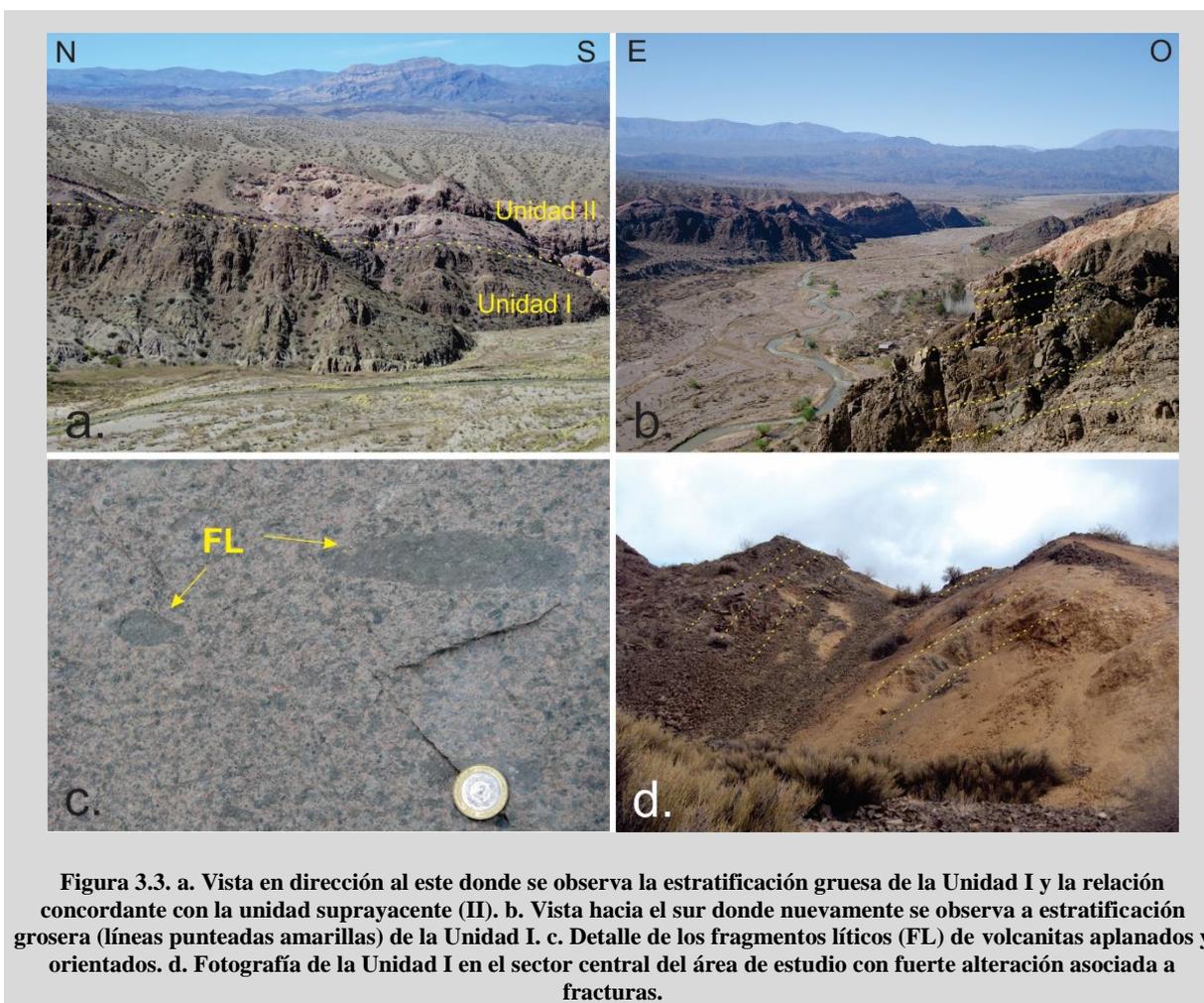


Figura 3.2. Perfil esquemático mostrando las relaciones entre las diferentes litologías identificadas, sobre imagen satelital Geoeye sobrepuesta sobre un modelo 3D de la topografía del área.

3.3.1. Unidades litológicas identificadas

La Unidad I aflora en el sector norte del área estudiada. Se dispone con una pseudiestratificación gruesa (por bandeamiento de flujo), de rumbo general N18°E y buzamiento leve entre 10° y 20° hacia el SE (Figuras 3.3 a y b). Dentro del área de estudio no es posible constatar la base de esta unidad, pero 5 km al norte (a la altura de las minas de Castaño Viejo) se observa esta unidad apoyada en discordancia angular sobre bancos de calizas con nódulos de chert, asignados a la Formación San Ignacio (Rodríguez Fernández et al., 1996). Dentro del Distrito Minero Castaño Nuevo, esta unidad comienza con volcanitas gris rojizas con textura porfírica, abundantes fenocristales de plagioclasa y anfíbol. En concordancia continúan lavas de tonalidad gris verdosa, con fragmentos líticos orientados de manera subparalela a la estratificación (Figuras 3.3.c). Hacia el techo disminuye la proporción de fragmentos líticos.

Los estratos se encuentran fuertemente diaclasados con orientaciones predominantes de N70° y N110°. Algunas diaclasas se hallan rellenas por magnetita y sílice pulverulenta. Se destaca también un intenso venilleo de cuarzo que corta al de magnetita y está asociado a los sistemas de vetas epitermales. Finalmente, venillas de calcita se encuentran cortando todo y en múltiples direcciones.



En el sector occidental predominan lavas rojizas asignadas a la base, localmente atravesadas por estructuras que generan una intensa oxidación y alteración de tipo argílica. Hacia el centro del área de estudio estas rocas se encuentran completamente alteradas a arcillas y óxidos (Figura 3.3.d), y están atravesadas por venillas de yeso de variados espesores y orientaciones.

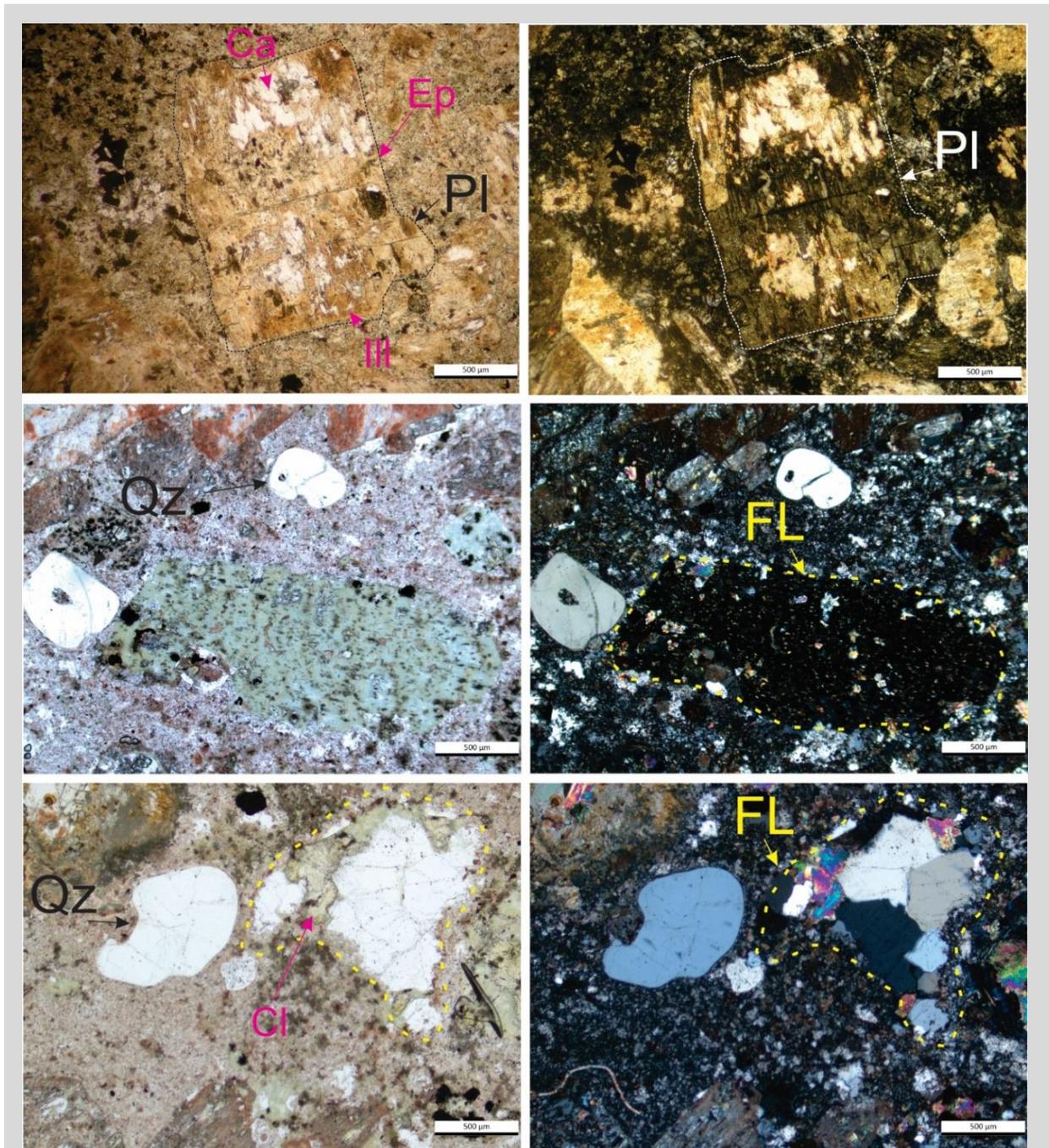


Figura 3.4. Unidad I. a y b. Fotomicrografía sin/con analizador de cristal de plagioclasa (PI) euhedral, fracturado y alterado a calcita (Ca) e illita (Ill), con agregados de epidoto (Ep). c y d. Fotomicrografía sin/con analizador de fragmento lítico (FL) de volcanita (marcado con línea punteada amarilla) completamente argilizado y cloritizado, cristales redondeados de cuarzo (Qz) con engolfamientos. e y f. Fotomicrografía sin/con analizador de fragmento lítico (FL) de cuarcita (?) con clorita (Cl) en fracturas.

En cuanto a los fragmentos líticos, se observaron dos tipos. En su mayoría, se trata de fragmentos de rocas volcánicas de grano muy fino, fuertemente reemplazados por clorita y arcillas finas (Figuras 3.4. c y d). En menor medida se observan fragmentos de rocas tipo cuarcitas, con bordes redondeados, arcillas y cloritas en fracturas (Figuras 3.4. e y f).

La alteración es selectiva, afectando fuertemente a los fragmentos líticos y con menor intensidad a la pasta y fenocristales (Figuras 3.4. a y b). Se observan además, relleno de fracturas y oquedades. El mineral principal de alteración es la clorita, seguido por caolinita de baja cristalinidad e illita. Localmente se identifican agregados de epidoto en la pasta y sobre algunos cristales. Se observan además nidos (“soles”) de turmalina relleno oquedades y afectando a las plagioclasas.

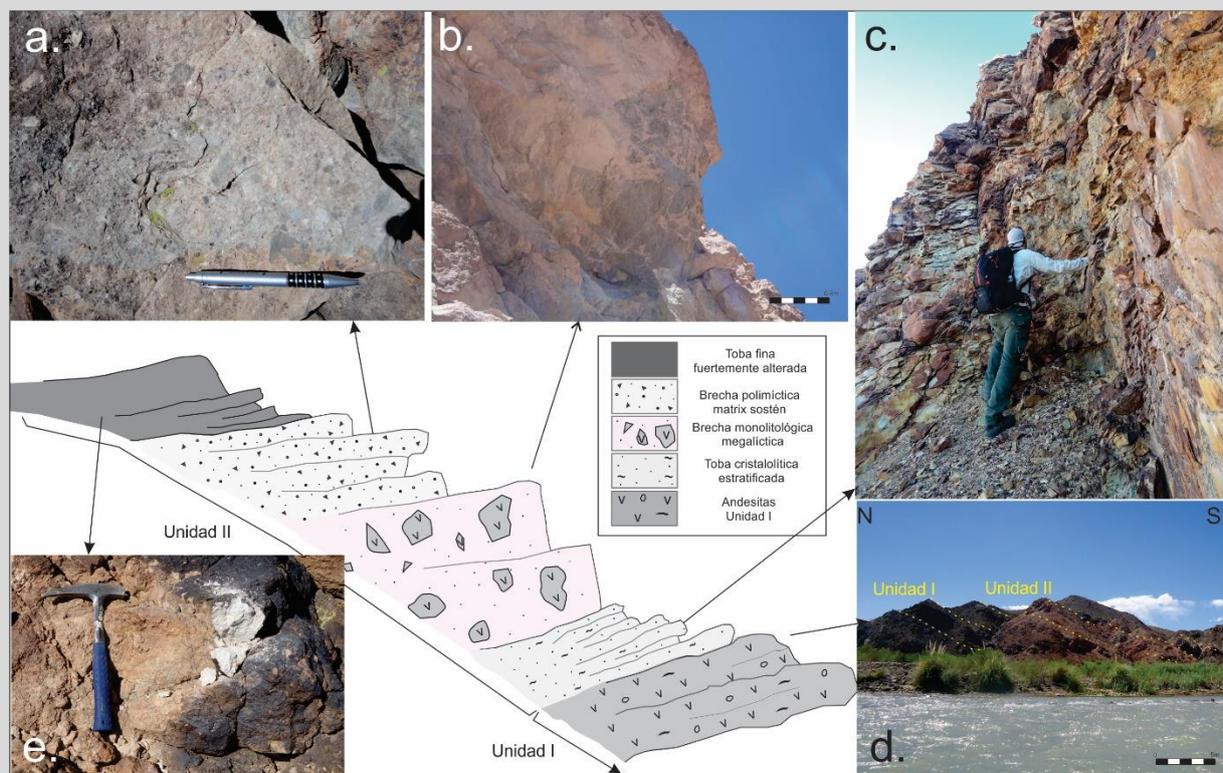


Figura 3.5. Columna esquemática de las facies que componen la Unidad II. a. Brecha polimíctica mátrix sostén, con leve silicificación. b. Brecha monolitológica monomíctica clasto sostén con fragmentos de hasta un metro de la Unidad I. c. Toba cristalolítica con estratificación fina, fuertemente argilizada y con pátinas de óxidos de hierro. d. Fotografía con vista hacia el este, sobre el margen oriental del río Castaño mostrando la concordancia entre las unidades I y II. e. Toba fina con intensa alteración argílica y silicificación.

Por encima de estas facies volcánicas, se encuentra, en aparente concordancia, un paquete piroclástico denominado Unidad II, representado por una intercalación de tobas finas y brechas piroclásticas, con contenidos variables de vitroclastos. Los afloramientos más imponentes se encuentran a lo largo de la Quebrada de las Mellizas (ver en Figura 3.1). En la figura 3.5 se muestra una columna esquemática con espesores inferidos, ya que los afloramientos son muy irregulares y aislados, impidiendo estimar correctamente espesores y relaciones entre las facies. Los afloramientos son

erráticos y se presentan de formas irregulares debido a la intensa alteración y fallamiento que afectan a esta unidad. Hacia la base se observan facies de tobas cristalolíticas muy finas con marcada estratificación (bancos de 5 a 20 cm) con buzamiento leve hacia el SE (Figura 3.5.c), incrementándose en los afloramientos más al sur (Figura 3.6.a). Se encuentran argilizadas con reemplazo casi completo por caolinita (\pm dickita). Localmente, asociado a fracturas, se observa fuerte reemplazo por cuarzo microcristalino y venilleo delgado de cuarzo macizo (\pm bandeado). Hacia arriba, y sólo en el sector central del área de estudio, se registró una brecha monolitológica megalítica clasto sostén, caracterizada por fragmentos de hasta un metro de la Unidad I (fuertemente alterada) con mátrix tobácea fina (Figura 3.5.b). Esta facies se encuentra estratificada en bancos groseros (de 2 a 5 m). Otro tipo de brecha registrada, en algunos casos apoyando directamente sobre las facies de tobas finas, corresponde a brechas polimícticas mátrix sostén (Figura 3.5.a), con fragmentos angulosos a subredondeados de composición variada, frecuentemente de la Unidad I, aunque también se registran algunos de volcanitas finas oscuras y sedimentitas (areniscas/pelitas). Finalmente, cubren tobas muy finas, cuya intensa alteración enmascara todas las características de la roca original. En algunos sectores se encuentra reemplazada por arcillas (Figura 3.5.e), pero predomina el reemplazo casi completo por sílice (Figura 3.6.b).

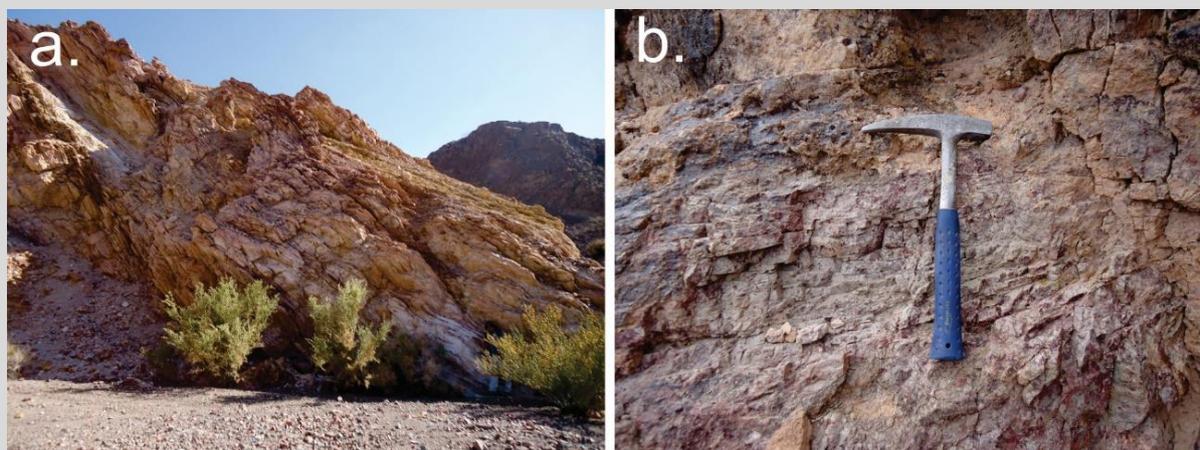


Figura 3.6. Unidad II. a. Facies de tobas finas en la base de la Unidad II. b. Detalle de la estratificación fina en un afloramiento fuertemente silicificado hacia el techo de la Unidad II.

Al microscopio resulta muy complejo distinguir los componentes de cada una de las facies debido al tamaño fino de cada elemento y a la intensa alteración que los afecta. Se efectuaron cortes de las facies más finas de la base de la unidad y en las brechas heterolíticas, ya que en muestras de mano aparentaban estar menos alteradas. Las facies más finas se caracterizan por tamaños, formas y grados de alteración homogéneos, tanto para los de fragmentos líticos como para cristaloclastos (Figura 3.7. a y b). La mátrix fina, inicialmente vítrea se encuentra reemplazada por minerales arcillosos (principalmente del grupo del caolín y esmectitas) y cuarzo microcristalino, que a su vez reemplazan

por completo a los cristaloclastos (Figuras 3.7. c y d).

En el corte efectuado sobre una muestra de las brechas polimícticas mátrix sostén, se observa nuevamente un reemplazo completo de los elementos que componen la roca, distinguiéndose los distintos fragmentos líticos en base a la alteración diferencial que los afecta (Figura 3.7. e y d). La mátrix se encuentra completamente reemplazada por minerales arcillosos (caolín ± esmectitas) y sílice, se observan además illita y clorita asociadas a fracturas o formando pequeños parches.

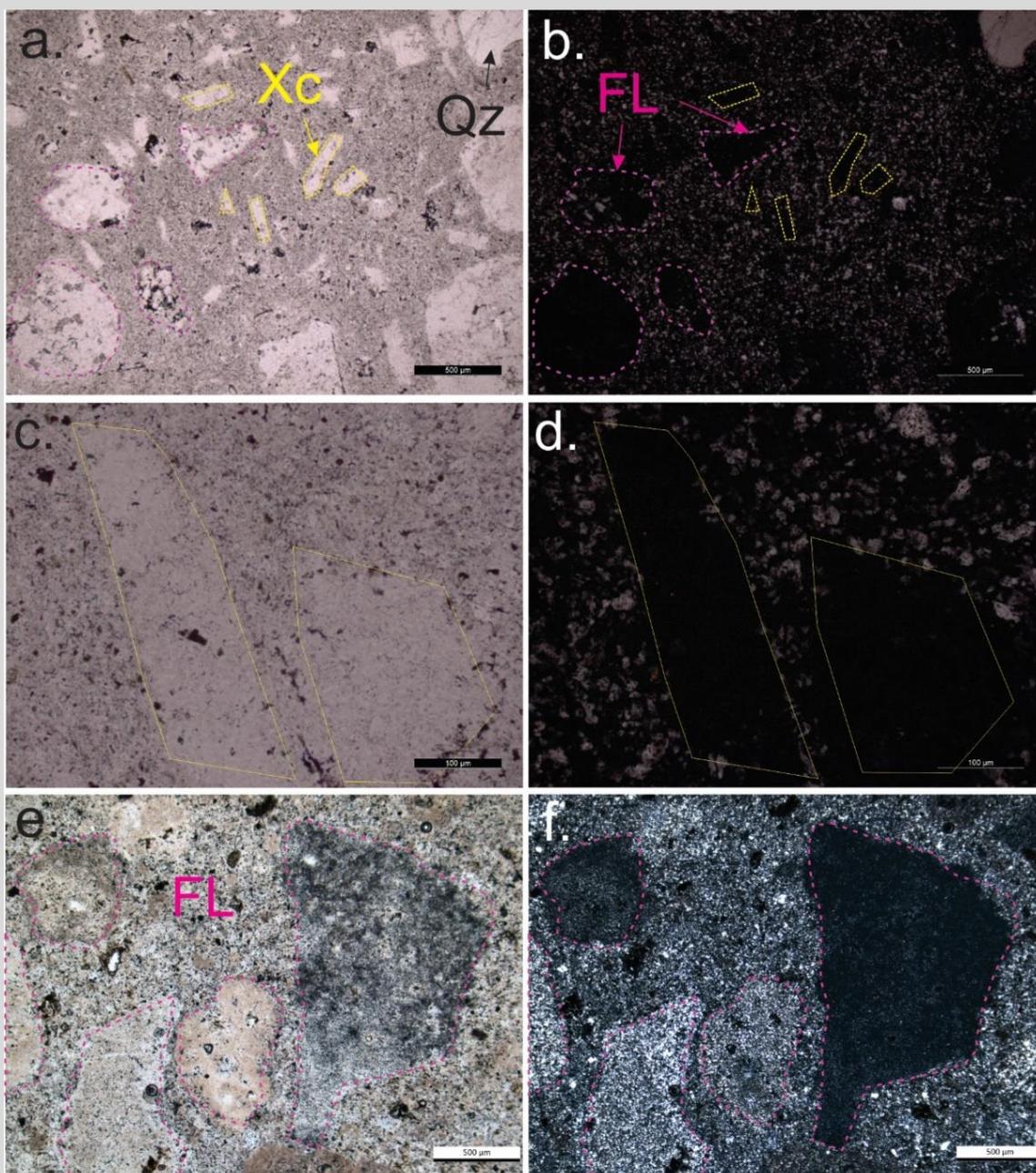
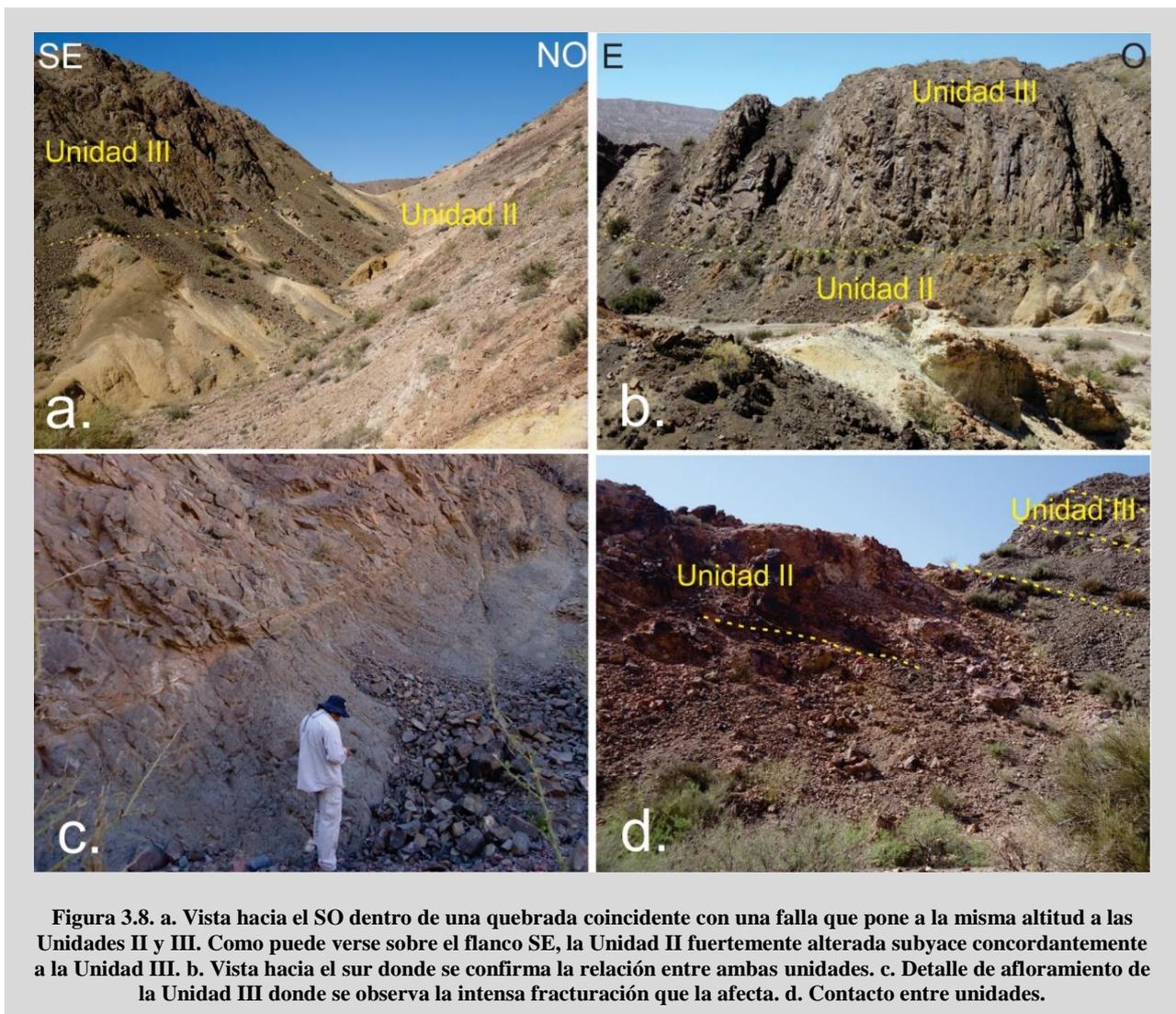


Figura 3.7. Unidad II. a y b. Fotomicrografía sin/con analizador de fragmentos líticos (FL) y algunos cristaloclastos (Xc) reemplazados completamente por minerales arcillosos, sobre el borde superior izquierdo se distingue un cristaloclasto de cuarzo (Qz). c y d. Fotomicrografía sin/con analizador de cristaloclastos alterados inmersos en una mátrix fina, conformada enteramente por cuarzo microcristalino y arcillas indiferenciables bajo microscopio óptico. e y f. Fragmentos líticos de diferente composición, evidenciados por la alteración diferencial que los afecta.

Finalmente, cubriendo a la secuencia piroclástica se reconocen rocas volcánicas estratificadas de color verde oscuro a negro, localmente con intensa fracturación, denominadas como Unidad III (Figura 3.8). Si bien en muestra de mano solo se observa una textura porfírica con fenocristales de plagioclasa y anfíbol, en sección delgada se pudo constatar su naturaleza volcánicas y en parte ignimbrítica, evidenciada por la presencia de abundantes fragmentos líticos de tamaños reducidos y algunos vitroclastos. Localmente se aprecian *fiammes* de hasta 3 cm. Los mejores afloramientos en los que se aprecia la relación con las otras unidades es a lo largo de la Quebrada del Alumbre (ver en Figura 3.1)



Bajo el microscopio óptico se observa textura porfírica, rica en cristaloclastos, la mayoría de ellos fracturados, inmersos en una pasta vítrea (Figura 3.9. a y b). Los cristales son principalmente de plagioclasas de gran tamaño (>500 μm), afectados parcialmente por cloritas y micas blancas. Los máficos corresponden a anfíbol, se observan completamente cloritizados, motivo por el cual no se pudo arribar a su correcta identificación. La pasta vítrea presenta localmente evidencias de pseudofluidalidad

y se observan indicios de desvitrificación (Figuras 3.9. c y d) y escasa alteración (arcillas indiferenciadas). Se aprecian minerales opacos dispersos a lo largo de toda la muestra. Los fragmentos líticos bajo el microscopio muestran texturas variadas, predominando las porfíricas (Figuras 3.9. e y f)

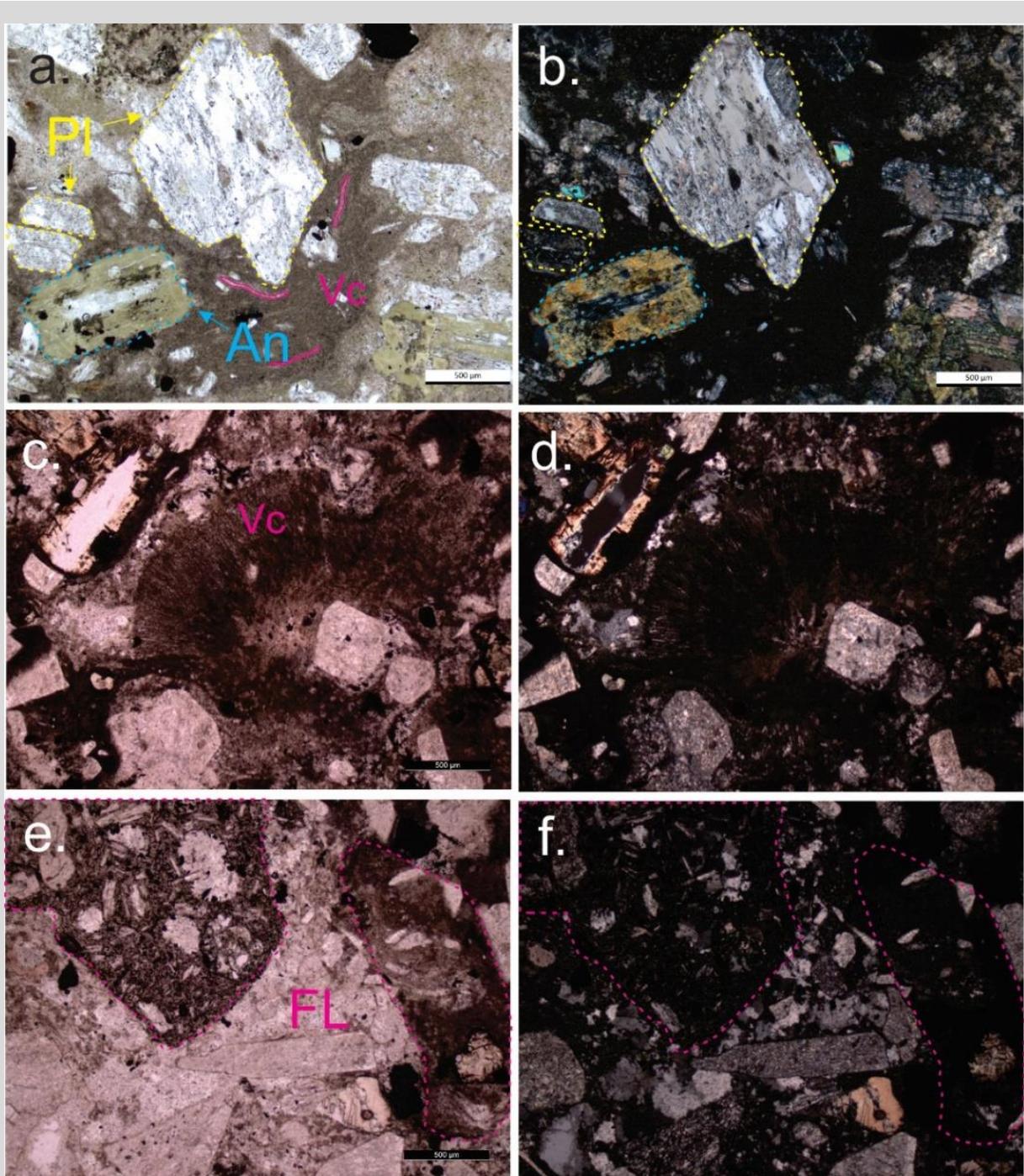


Figura 3.9. Unidad III. a. y b. Fotomicrografía sin/con analizador de cristales de plagioclasa (Pl), uno de ellos fragmentado y anfíbol (An) completamente reemplazado por clorita. Se aprecia la pasta vítrea con incipiente pseudofluidalidad y algunos vitroclastos (Vc). c. y d. Fragmento de esferulita, evidencia de desvitrificación en la pasta. e. y f. Fragmentos líticos (FL) con textura porfírica con alteración argílica en la pasta.

Sobre el sector occidental se disponen, intruyendo a la Unidad I, diques de tonalidades rojizas de orientación general NNE (Figura 3.10.a), con bordes de enfriamiento color verde oscuro y textura afanítica, mientras que en el centro se aprecia una textura porfírica gruesa y color rojo intenso (Figura 3.10.b). En las imágenes satelitales estos cuerpos se observan atravesando toda la secuencia, partiendo desde el sur a la altura del Plutón Manrique y perdiéndose hacia el norte de Castaño Viejo (Figura 3.10.c). Diques similares en términos morfológicos y de orientación, fueron descritos en el área de Mina Casposo, donde intruyen a toda la secuencia del Grupo Choiyoi (Sotarello et al., 2002; Grignola, 2017).

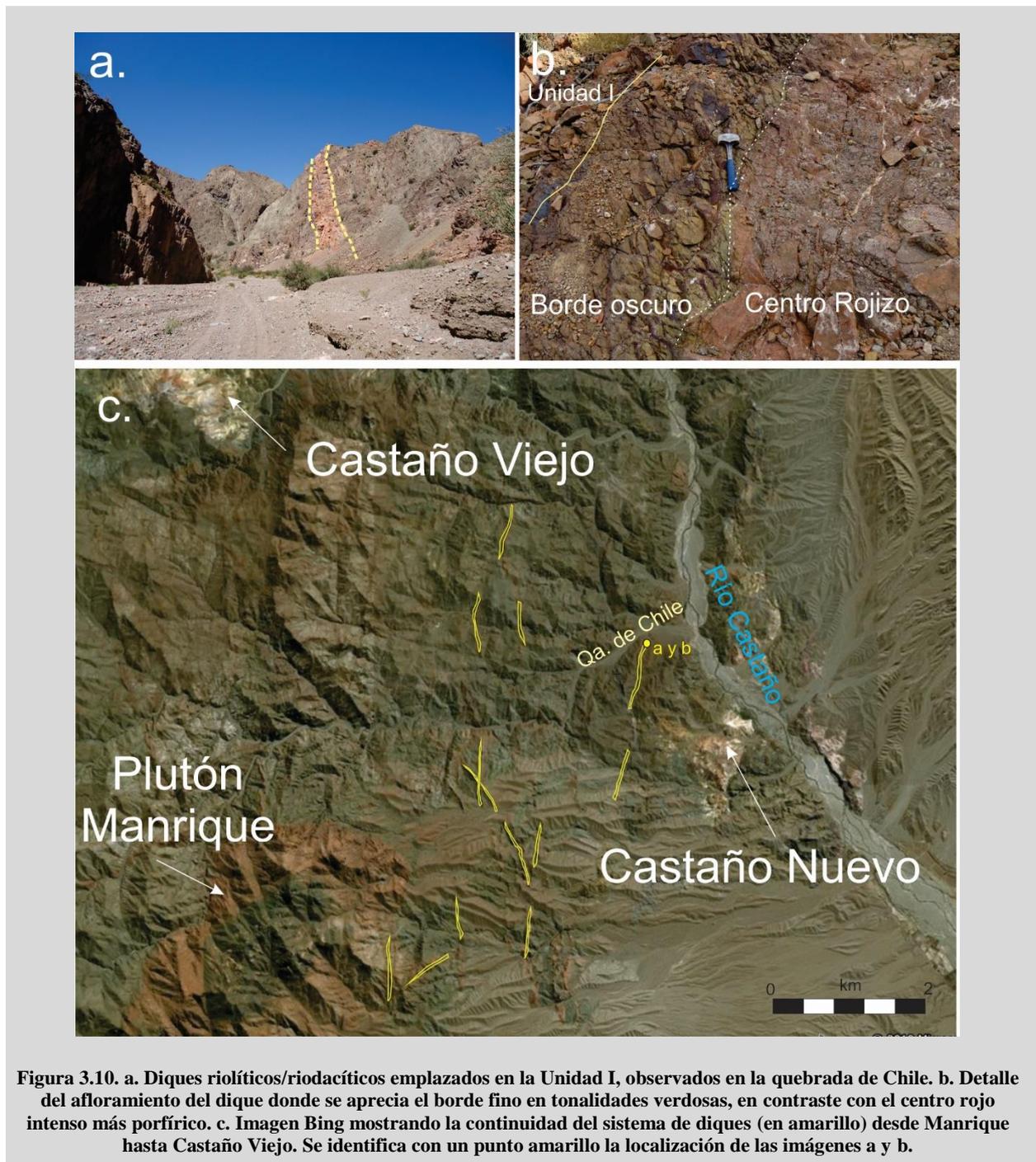


Figura 3.10. a. Diques riolíticos/riodacíticos emplazados en la Unidad I, observados en la quebrada de Chile. b. Detalle del afloramiento del dique donde se aprecia el borde fino en tonalidades verdosas, en contraste con el centro rojo intenso más porfírico. c. Imagen Bing mostrando la continuidad del sistema de diques (en amarillo) desde Manrique hasta Castaño Viejo. Se identifica con un punto amarillo la localización de las imágenes a y b.

Bajo microscopio óptico se observan cristales de plagioclasa, con macla polisintética y simple (Figuras 3.11. a y b). En menor proporción se reconoce feldespato potásico. Frecuentemente se encuentran cristales de cuarzo redondeados, con engolfamientos (Figuras 3.11. c y d), y de grandes tamaños (>500 µm). Se encuentran en una pasta de microtablillas de plagioclasa. La tonalidad rojiza se debe a tinción por óxidos de hierro, los cuales se encuentran distribuidos por toda la muestra.

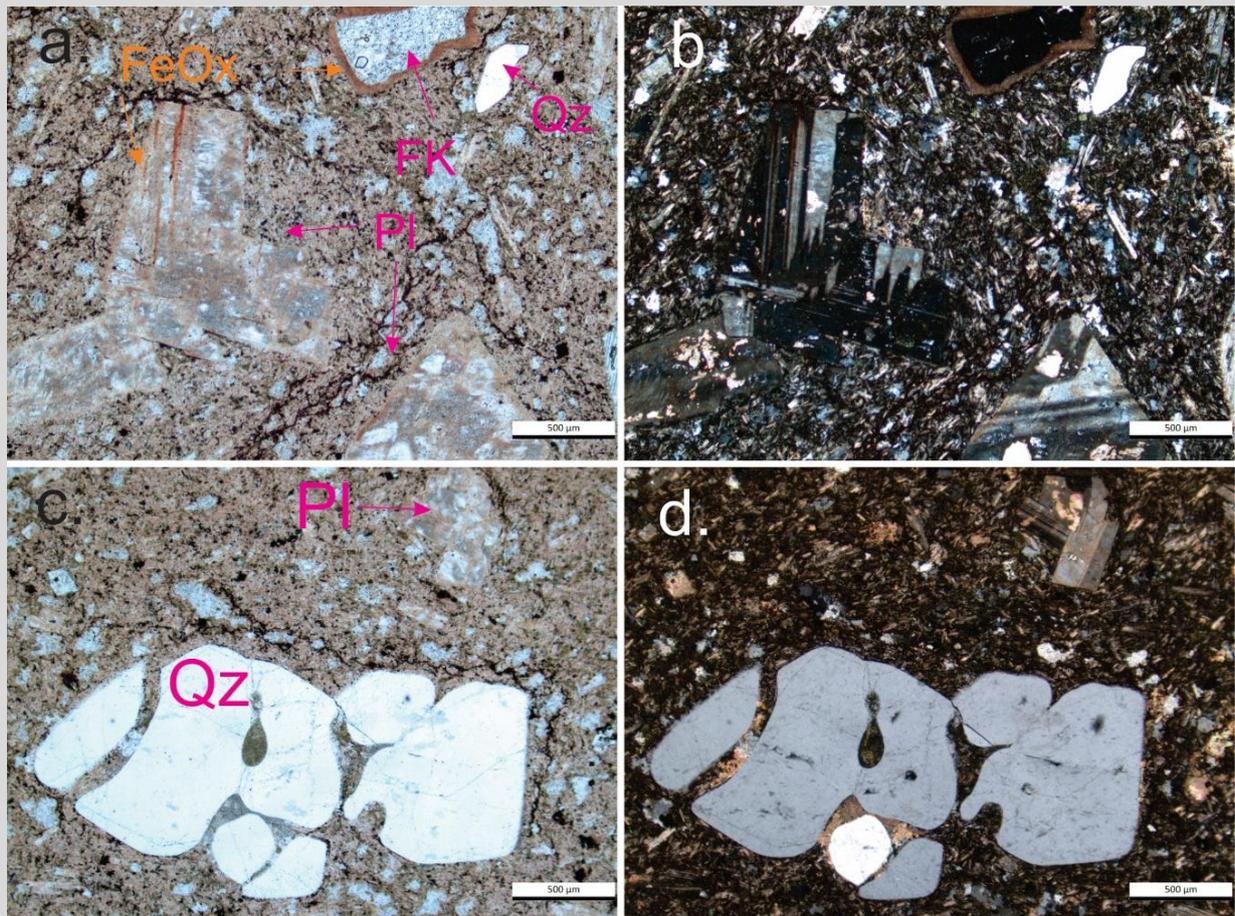


Figura 3.11. a y b. Fotomicrografía sin/con analizador de cristales de plagioclasa (PI) con macla polisintética con óxidos de hierro (FeOx) como pátinas, rodeando cristales, en los planos de macla y rellenando fracturas intracristalinas. Se observan también un cristal de feldespato alcalino (FK) con borde de reacción y un pequeño cristal de cuarzo (Qz). c y d. Fotomicrografía sin/con analizador de gran cristal de cuarzo fragmentado, con engolfamientos, inmerso en una pasta conformada por pequeñas tablillas de plagioclasa.

Otro tipo de cuerpos discordantes fueron constatados dentro de los afloramientos de las Unidades I y II en la porción central del área de estudio. Se trata de cuerpos irregulares, de dimensiones pequeñas (no más de 20 m de diámetro), que contrastan mucho particularmente dentro de la Unidad II ya que no se encuentran afectados por la intensa alteración hidrotermal (Figura 3.12.a). En el presente trabajo fueron denominados como Intrusivos Máficos. El color es negro, y se identifican fenocristales translúcidos de plagioclasa (Figura 3.12.b).



Figura 3.12.a. Afloramiento reducido dentro de la Unidad II de los cuerpos oscuros. b. Detalle de muestra de mano de dichos cuerpos, donde se aprecia la textura porfírica.

Bajo microscopio óptico se observan grandes fenocristales de plagioclasa euhedrales, con escasas fracturas y maclas polisintéticas (Figura 3.13. a y b). La pasta está conformada por pequeñas tablillas de plagioclasa y minerales máficos (?), reemplazados por clorita. La alteración es escasa, además de clorita en la pasta, se registran escasos reemplazos dentro de los grandes cristales de plagioclasa, por clorita e illita.

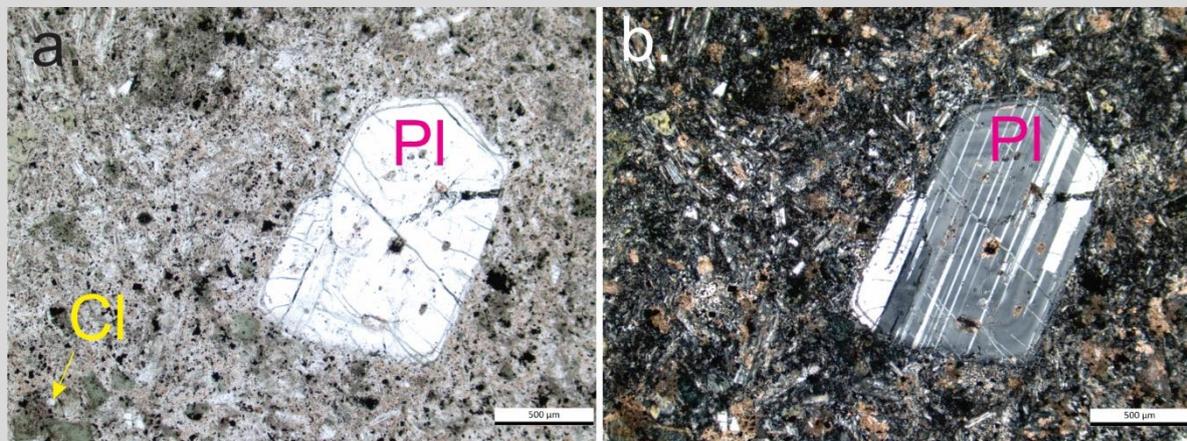


Figura 3.13. a y b. Microfotografía sin/con analizador de cristal de plagioclasa con macla polisintética y forma euhedral.

3.3.1.1. Sistemas hidrotermales asociados

Completando la geología local, se distinguen dos sistemas hidrotermales. En el sector nororiental un sistema de vetas de cuarzo-adularia, entre las que se destacan las vetas Dios Protege, San Pedro y San Agustín (Figura 3.14.a). Estos cuerpos vetiformes se hallan emplazados en la Unidad I y parecen interrumpirse hacia el sur donde una falla inversa con orientación N30°E, buzante levemente hacia el sureste, pone al mismo nivel a las Unidades I y II. El segundo sistema se caracteriza por una intensa alteración hidrotermal, extendida homogéneamente en la Unidad II y asociada a fracturas en la

Unidad I (aflorante en la porción central del área), y por pequeños cuerpos de brechas irregulares, con tendencia a elongarse en múltiples direcciones, denominados por Delendatti (2005b) como diques de brecha (Figura 3.14.b). Se destacan, además, pequeños afloramientos de *vuggy silica* muy irregulares, tanto en la porción central del área como hacia el sur.

Acorde a las relaciones de campo se puede establecer que ambos sistemas hidrotermales son previos a la depositación de la Unidad III, la cual se apoya concordantemente siguiendo la secuencia estratigráfica, pero carece de expresiones relacionadas a alguno de los dos sistemas.



Figura 3.14. a. Fotografía de la veta San Agustín, emplazada en la Unidad I. b. Cuerpos de brechas asociados a la Unidad II, con fuerte alteración hidrotermal y cemento de sílice criptocristalina grisácea.

3.3.2. Litogeoquímica de las unidades

En base a las variaciones texturales y a la columna tentativa levantada durante los trabajos de campo y revisión de los testigos de perforación, se seleccionaron 13 muestras para su análisis de roca total (ver localización en la Figura 3.2). Los resultados de los análisis químicos se resumen en la tabla 3.2. A continuación, se presentan los datos procesados por unidad litológica y se contrastan contra otros análisis realizados por González y Sato (1998) y Grignola (2017). Los primeros autores describen

petrográfica y químicamente a las unidades definidas por Espina et al. (1998) en la Hoja 3169-20 Castaño Nuevo. Por otro lado, en el área de Mina Casposo se llevaron a cabo estudios estratigráficos de detalle (Grignola, 2017) que, debido a la cercanía y similitudes con el Distrito Minero Castaño Nuevo y a las escalas de trabajo, permiten una buena comparación entre ambos sistemas.

Las muestras analizadas en el Distrito Minero Castaño Nuevo arrojaron valores de LOI (*loss on ignition*) desde 0,24 a 5,87%, pese a los recaudos tomados a la hora de realizar los muestreos, intentando evitar los afloramientos con mayor grado de alteración y los fragmentos líticos incorporados en cada una de las unidades. Los procesos de alteración (tanto meteóricos como hidrotermales) generan la movilización de la gran mayoría de los elementos mayoritarios y de algunos elementos trazas. Este hecho se constató en la muestra perteneciente a la Unidad II, la cual en la mayoría de los diagramas no es posible plotearla ya que sale de los rangos pre-establecidos.

3.3.2.1. Clasificación química de las unidades

Las muestras en conjunto muestran escasa variabilidad, con predominio de rocas intermedias (SiO_2 entre 55 y 65%), a excepción de la muestra proveniente de la Unidad II, la cual arrojó un resultado de 99% de dióxido de silicio debido a la intensa alteración. En primer lugar, se volcaron los datos en diagramas SiO_2 vs. K_2O (Ewart, 1982) y SiO_2 vs. $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (Le Bas et al., 1986) mostrados en la figura 3.15, pero al no ser definitorios y al constatar una alteración selectiva moderada, se utilizaron los diagramas de discriminación de elementos inmóviles SiO_2 vs. Zr/TiO_2 y Nb/Y vs. Zr/TiO_2 (Winchester y Floyd, 1977) para arribar a una correcta caracterización de las rocas estudiadas (Figura 3.16).

La unidad más antigua en el área de estudio (Unidad I) fue analizada en distintos sectores, y las muestras fueron agrupadas de acuerdo a la localización dentro del área relevada. Es así que en la tabla 3.2 se clasificaron como Unidad I s, e, w (*s = south; e = east; w = west*) de acuerdo a su localización en los sectores sur, este y oeste respectivamente. Cabe destacar que tanto la Unidad Is como la Iw corresponden a los sectores donde se localizaría el Pórfido Andesítico definido por Cegarra et al. (1998), pero al no encontrarse evidencias de contactos intrusivos, y al constatar las similitudes macroscópicas con las volcanitas ubicadas al este se agruparon todas en una misma unidad. En general, las muestras presentan contenidos de SiO_2 entre 55,5 y 65,57% (recalculado en base anhidra).

En el diagrama de Ewart (1982) de SiO_2 vs. K_2O la totalidad de las muestras se incluye en la Series Calcoalcalina con Alto K. En las muestras del sector este (Unidad Ie) puede observarse una diferenciación desde andesitas basálticas, andesitas a dacitas. Las muestras del sector oeste y sur caen en los campos de andesitas y dacitas. Al comparar los resultados con los análisis de otros autores puede observarse como estas mismas tendencias fueron registradas por González y Sato (1998) en las muestras pertenecientes a la Formación Vega de los Machos. De igual modo, en el diagrama de Le Bas et al. (1986) las muestras reflejan un alto contenido de K, con una diferenciación entre traquiandesitas

“Caracterización geológica-estructural de las manifestaciones hidrotermales del Distrito Minero Castaño Nuevo, y su relación con el Magmatismo Gondwánico. Cordillera Frontal de San Juan, Argentina.” Lic. María Agustina Cócola

Muestra	SA01	QC04	DP04	DP07	SHS01	SHS09	CASS 33	PO1B	CASS 32	DP8	SHS15	QC01	HS02
Ubicación	San Agustín	Qa. De Chile	Dios Protege	Dios Protege	Qa. Del Alumbre	Qa. Del Alumbre	Don Guillermo	Porphyry	Don Guillermo	Dios Protege	Qa. Del Alumbre	Qa. De Chile	High Sulp
Litología	Andesita porfírica (Este)	Andesita porfírica (Este)	Andesita porfírica (Este)	Andesita porfírica (Este)	Andesita porfírica (Sur)	Andesita porfírica (Sur)	Andesita porfírica (Oeste)	Andesita porfírica (Oeste)	Andesita porfírica (Oeste)	Toba fina	Riodacita sin alterar	Dique riolítico	Dique básico
Unidad	Unidad Ie				Unidad Is		Unidad Iw			Unidad II	Unidad III	Int. Félisico	Int. Máfico
Al ₂ O ₃ [%]	15,84	14,96	14,47	15	16,08	15,56	15,26	16,1	15,92	0,11	15,84	13,44	16,69
BaO [%]	0,08	0,07	0,05	0,05	0,07	0,08	0,02	0,11	0,08	0,01	0,08	0,08	0,06
CaO [%]	2,59	2,49	5,63	7,52	3,63	2,39	2,62	4,08	2,07	0,02	3,53	2,04	5,28
Cr ₂ O ₃ [%]	0,01	0,04	0,03	0,04	0,01	0,04	0,05	0,04	0,07	0,06	0,04	0,06	0,01
Fe ₂ O ₃ [%]	5,64	5,38	3,76	5,22	6,28	5,16	3,72	4,41	4,23	0,28	6,09	5,1	7,69
K ₂ O [%]	3,61	3,67	2,81	2,27	1,93	3,45	2,39	4,61	3,25	0,01	2,85	4,25	1,81
MgO [%]	2,98	2,48	5,13	6,83	3,71	2,55	5,39	2,9	2,21	0,01	3,35	0,93	3,59
MnO [%]	0,17	0,12	0,07	0,13	0,1	0,06	0,07	0,15	0,06	0,01	0,1	0,07	0,18
Na ₂ O [%]	4,25	3,72	5,3	3,79	4,94	4,11	2,34	4,86	4,29	0,04	3,81	3,96	3,28
P ₂ O ₅ [%]	0,15	0,14	0,13	0,23	0,21	0,16	0,17	0,13	0,16	0,02	0,17	0,26	0,22
SO ₃ [%]	0,005	0,005	0,005	0,07	0,06	0,02	4,39	4,99	0,97	0,01	0,005	0,005	0,2
SiO ₂ [%]	61,92	63,14	59,69	52,5	57,37	64,13	61,08	59,87	65,09	97,88	60,58	66,29	56,5
SrO [%]	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,04	0,03	0,005	0,03	0,02	0,04
TiO ₂ [%]	0,71	0,67	0,63	0,74	0,98	0,7	0,72	0,67	0,69	0,03	0,81	0,65	1,03
Total	100,4	98,98	99,52	100,05	99,54	100,8	104,25	105,85	101,5	98,82	99,97	99,74	100,4
LOI 1000 [%]	2,29	1,96	1,61	5,46	4,04	2,23	5,87	2,71	2,24	0,24	2,56	2,46	3,69
Ba [ppm]	601	568	1330	323	496	544	103	816	549	28,3	595	644	397
Ce [ppm]	65,1	70,8	151,5	59,9	50,1	70,2	24	44,8	48,9	1,5	61,3	82,4	53,8
Cr [ppm]	150	210	160	60	80	150	120	240	160	260	170	180	140
Cs [ppm]	10,3	7,02	4,68	9,94	7,17	8,52	17,9	3,91	4,92	0,14	5,06	6,07	12
Dy [ppm]	3,62	4,2	3,75	5,27	3,68	4,18	3,53	4,64	3,84	0,47	4,27	4,96	4,18
Er [ppm]	2,07	2,15	2,01	2,48	2	2,19	2,17	2,39	2,01	0,38	2,43	2,78	2,45
Eu [ppm]	1,16	1,02	0,99	1,59	1,11	0,98	0,47	1,13	1,04	0,015	1,25	1,52	1,28
Ga [ppm]	17,5	17,6	15,2	15,8	18,1	16,8	19,6	15,9	16,7	1	18,7	19	18,3
Gd [ppm]	4,25	4,58	4,29	5,7	4,06	4,42	3,22	4,47	4,21	0,23	4,54	5,84	4,72
Hf [ppm]	5,1	5,3	5,8	6,7	4,1	4,9	6,8	4,7	4,9	3	6,3	5,8	4,8
Ho [ppm]	0,73	0,84	0,81	1,06	0,73	0,85	0,67	0,97	0,82	0,12	0,84	1	0,83
La [ppm]	31,8	33,5	32	27,8	22,7	35,3	10,4	23	28,5	0,8	28	37,9	25,2
Lu [ppm]	0,33	0,37	0,32	0,38	0,3	0,34	0,33	0,4	0,36	0,09	0,37	0,39	0,38
Nb [ppm]	10,2	10,9	10,3	10,9	7,9	11	11,4	9,8	11	0,8	10	15	8,6
Nd [ppm]	25,5	27,6	26,8	29,7	22,5	28,3	11,1	20,7	23,2	0,7	26,7	36,7	24,7
Pr [ppm]	6,66	7,36	6,89	6,97	5,46	7,25	2,68	4,68	5,89	0,16	6,4	9,14	5,92
Rb [ppm]	161,5	162	136,5	108	61,6	158,5	171	177,5	147,5	0,8	117,5	170	65,8
Sm [ppm]	4,66	5,06	4,81	6,34	4,59	5,06	2,66	4,77	4,79	0,21	5,1	7,08	4,87
Sn [ppm]	6	3	12	24	2	3	11	6	6	2	2	3	2
Sr [ppm]	278	242	330	347	257	209	81,3	313	259	8,5	256	142	323
Ta [ppm]	0,8	1	1,1	0,7	0,5	1,1	1,1	0,8	0,9	0,5	0,6	1	0,5
Tb [ppm]	0,59	0,61	0,61	0,85	0,57	0,63	0,53	0,77	0,63	0,07	0,7	0,83	0,72
Th [ppm]	20,3	24,8	20,6	14,4	10,3	23,3	26,9	19,15	21,3	2,46	12,6	18,9	12
Tm [ppm]	0,32	0,32	0,27	0,37	0,3	0,32	0,29	0,41	0,33	0,07	0,34	0,39	0,35
U [ppm]	5,29	6,88	4,28	6,13	3,19	6,5	7,92	8,17	7,67	2	3,58	6,63	3,95
V [ppm]	133	119	105	79	168	130	129	120	105	7	140	38	179
W [ppm]	2	4	1	2	2	3	3	5	5	1	2	4	2
Y [ppm]	20,2	23,9	22,1	27,4	20,2	23,1	20	28,7	22,4	3,8	23,6	27,7	22,9
Yb [ppm]	2	2,01	2,03	2,55	1,79	2,17	1,98	2,51	2,1	0,54	2,24	2,41	2,35
Zr [ppm]	173	177	203	240	161	166	228	162	171	162	216	190	164

Tabla 3.2. Resultados de los análisis litogeoquímicos sobre las muestras del Distrito Minero Castaño Nuevo.

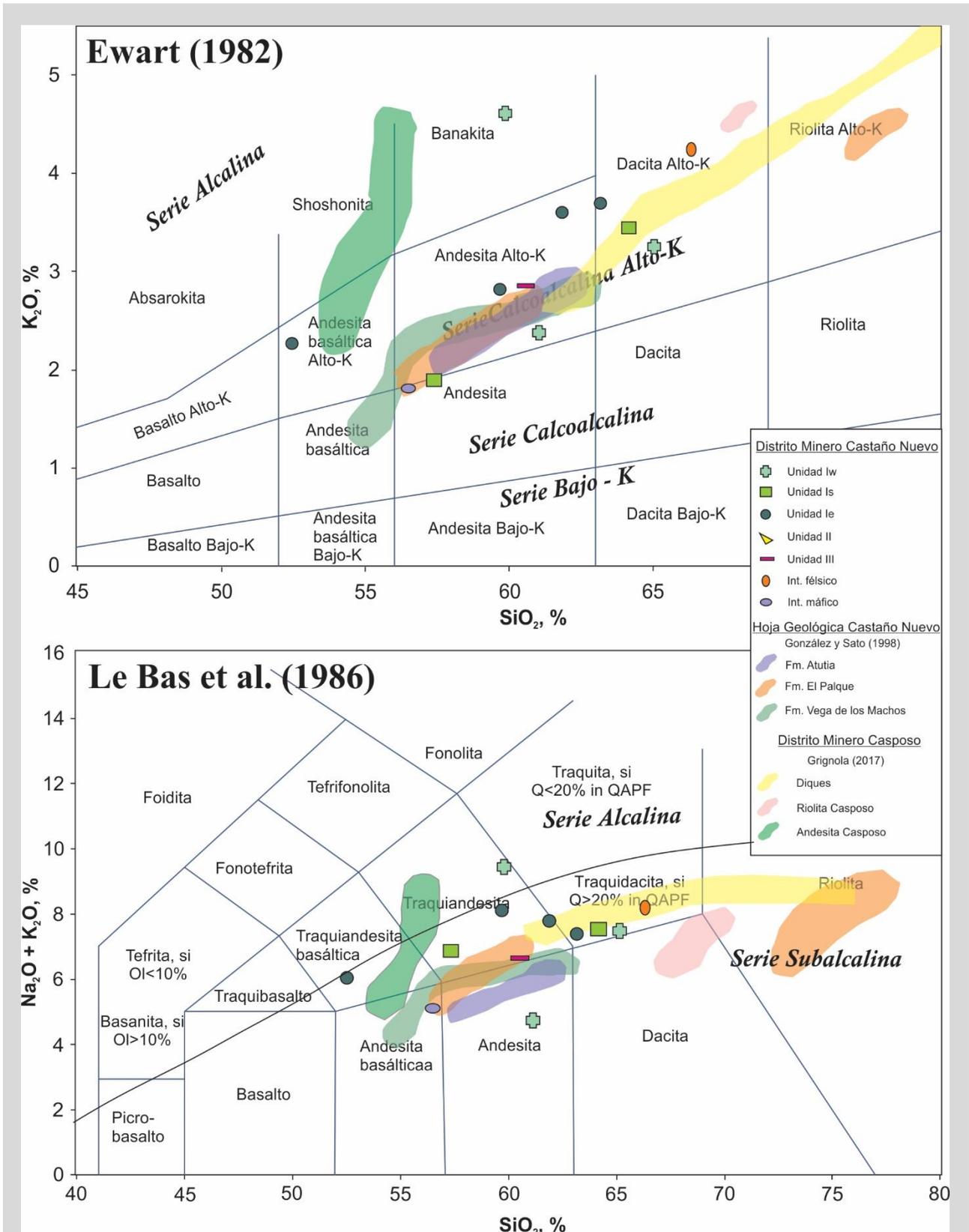


Figura 3.15. Diagramas de clasificación de rocas volcánicas utilizando elementos mayores. a. Diagrama SiO_2 vs. K_2O de Ewart (1982). b. Diagrama de clasificación SiO_2 vs. $K_2O + Na_2O$ (Le Bas et al., 1986). La muestra correspondiente a la Unidad II está fuera del rango de los diagramas, es por esto que no fue posible graficarla. Óxidos mayoritarios en porcentaje en peso.

basálticas, traquiandesitas y traquidacitas.

La Unidad II presenta una alteración pervasiva intensa. Se intentó muestrear un sector con menor proporción aparente de alteración, pero los resultados no fueron buenos. Se trata de una muestra con 97,88% de SiO₂ por lo cual su clasificación química a partir de elementos mayoritarios no pudo establecerse. En cuanto a los diagramas de clasificación de elementos inmóviles, en particular en el diagrama Nb/Y vs. Zr/TiO₂ (Winchester y Floyd, 1977), la muestra plotó dentro del campo de las riolitas. No puede decirse mucho más acerca de esta unidad ya que no pudo compararse con ninguna de las unidades definidas por otros autores citados previamente. Debido al intenso grado de alteración que presenta esta muestra, los resultados obtenidos no pueden considerarse representativos de la Unidad II.

La muestra correspondiente a la Unidad III presenta un contenido de SiO₂ de 62,19% (recalculado en base anhidra). En los diagramas de elementos mayores plotea como andesita de alto K o traquiandesita. De igual modo, en los diagramas de Winchester y Floyd (1977), esta muestra clasifica como andesita.

De acuerdo a los diagramas propuestos por Winchester y Floyd (1977) presentados en las figuras 3.16 a y b, las muestras pertenecientes a la Unidad I clasifican como andesitas a dacitas/riodacitas. Al compararlo con la geoquímica presentada en los antecedentes, se ajustan a la tendencia de las muestras presentadas por González y Sato (1998) para la Formación Vega de Los Machos.

En cuanto a los cuerpos intrusivos identificados en el sector estudiado, se analizaron dos muestras, una proveniente de los diques rojizos que atraviesan toda la secuencia y otra de los cuerpos irregulares máficos identificados en el sector central del área. De este modo, la muestra identificada como Intrusivo Félsico, que corresponde al dique rojizo, en los diagramas de elementos mayoritarios clasifica como traquidacita o dacita con alto K, mientras que en los de elementos inmóviles caen dentro del campo de las riodacitas (Figuras 3.15 y 3.16). La muestra denominada Intrusivo Máfico, que corresponde a los cuerpos básicos del sector central, clasifica como andesita-andesita basáltica en los diagramas de elementos mayoritarios al igual que en los de elementos minoritarios (Figuras 3.15 y 3.16).

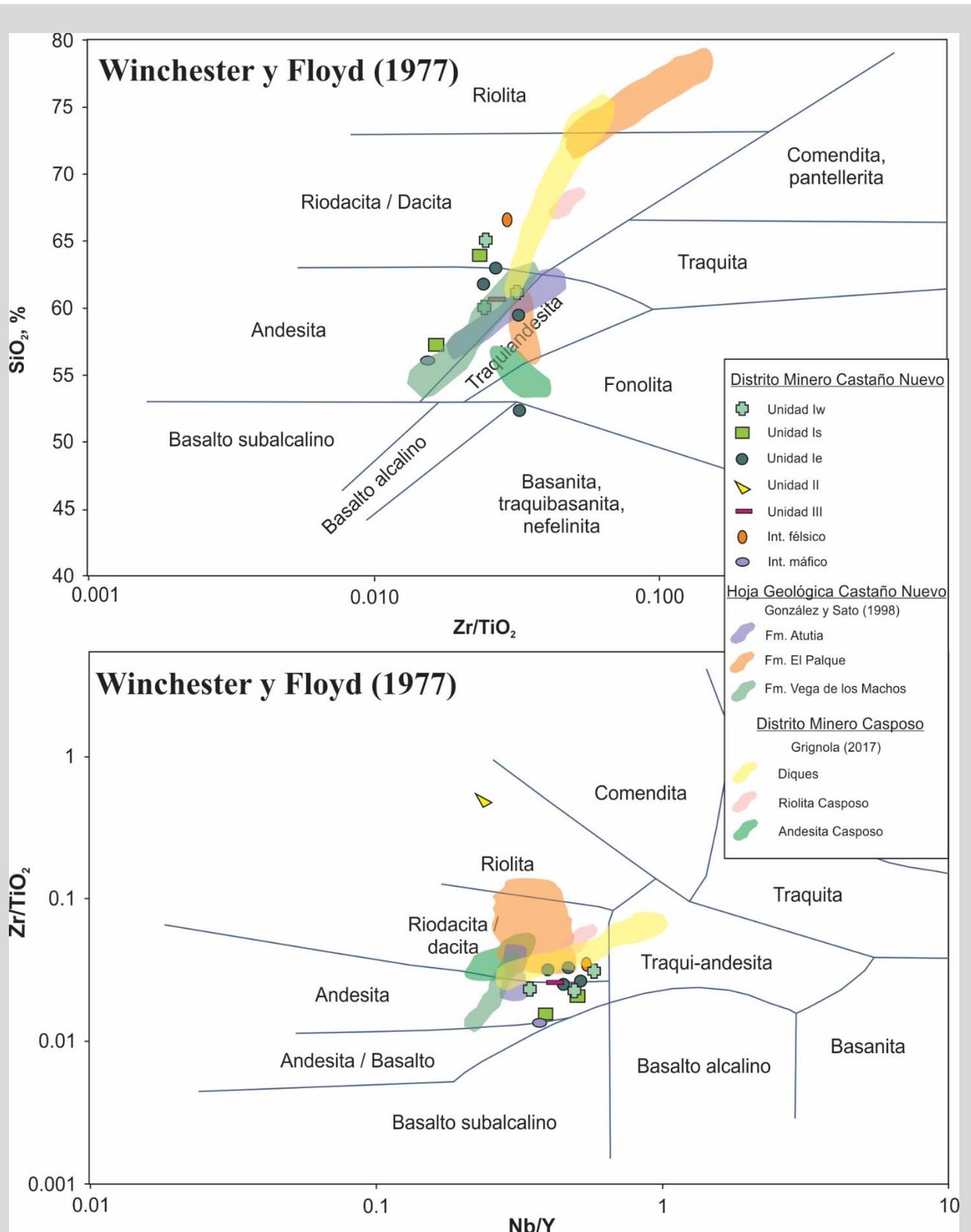


Figura 3.16. Diagramas de clasificación de rocas volcánicas utilizando elementos minoritarios. a. Diagrama SiO₂ vs. Zr/TiO₂. b. Diagrama de clasificación Zr/TiO₂ vs. Nb/Y (Winchester y Floyd, 1977).

3.3.2.2. Diagramas discriminantes de ambientes tectónicos y filiación magmática

Con el objeto de establecer la afinidad magmática de la secuencia identificada en el Distrito Minero Castaño Nuevo, se utilizaron una serie de diagramas. Empleando elementos mayoritarios se graficaron las muestras en el diagrama AFM (Irvine y Baragar, 1971) donde la totalidad de las muestras se proyecta dentro del campo calcoalcalino, a excepción nuevamente de la muestra proveniente de la Unidad II (Figura 3.17.a). En el diagrama Ta/Yb vs. Th/Yb (Pearce, 1983) las muestras analizadas se ubican dentro de la serie shoshonítica en el campo de los márgenes continentales activos, en coincidencia con las muestras analizadas por Grignola para las volcanitas y diques del sector de Mina Casposo (Figura 3.17.b). Finalmente, en el diagrama Zr vs. Y (MacLean y Barrett, 1993) nuevamente las muestras se incluyen dentro de la serie calcoalcalina (algunas cercanas al campo transicional) y, en este caso, la muestra de la Unidad II coincide con la tendencia del resto (Figura 3.16.c).

Para establecer el ambiente tectónico en el que se habría desarrollado esta secuencia se utilizaron los diagramas Th-(Hf/3)-Ta (Figura 3.17.d; Wood, 1980), Rb vs. Nb+Y (Figura 3.17.e; Pearce et al., 1984) y Ta/Hf vs. Th/Hf (Figura 3.17. f; Schandl y Gorton, 2002). En los tres diagramas presentados las muestras se ubican dentro de los campos de arco volcánico sobre margen continental activo.

3.3.2.3. Diagramas multielementos

El diagrama de multielementos normalizado a condrito de Thompson (1982) muestra enriquecimiento en elementos litófilos de gran radio iónico (*Large Ion Lithophile Elements* = LILE), particularmente en Rb y K, mientras que el Ba presenta valores relativamente bajos y el Sr muestra una anomalía negativa en relación al resto. Otros elementos con anomalías negativas y tendencias decrecientes son el P y el Ti, así como también el Nb y el Ta se presentan deprimidos. Los elementos de alto potencial iónico (*High Field Strength Elements* = HFSE), Zr, Hf y Nb, están deprimidos respecto a los LILE y presentan un leve y progresivo enriquecimiento en la muestra denominada Intrusivo Félsico, y que corresponde a los diques riolíticos posteriores a la secuencia volcánica (Figura 3.18.a). En cuanto a los elementos de las tierras raras livianas (*Ligth Rare Earth Elements* = LREE), Ce, Nd, Sm y La se observan enriquecidos.

La sumatoria de elementos de las tierras raras (*Rare Earth Elements* = REE) se mantiene relativamente constante (115–237 ppm) en todas las muestras, a excepción de la correspondiente a la Unidad II que presenta un valor claramente inferior (5,36 ppm). El diagrama de REE normalizado a condrito de Nakamura (1974), muestra pendientes moderadas (LaN/YbN = 6,11–11,11), con LREE ligeramente enriquecidos, presencia de anomalías negativas de Eu de magnitudes en general bajas ($Eu/Eu^* = 0,21-0,82$), y pendientes rectas hacia el extremo de los elementos de las tierras raras pesadas (*Heavy Rare Earth Elements* = HREE) como Lu, Tb, Dy (Figura 3.18.b).

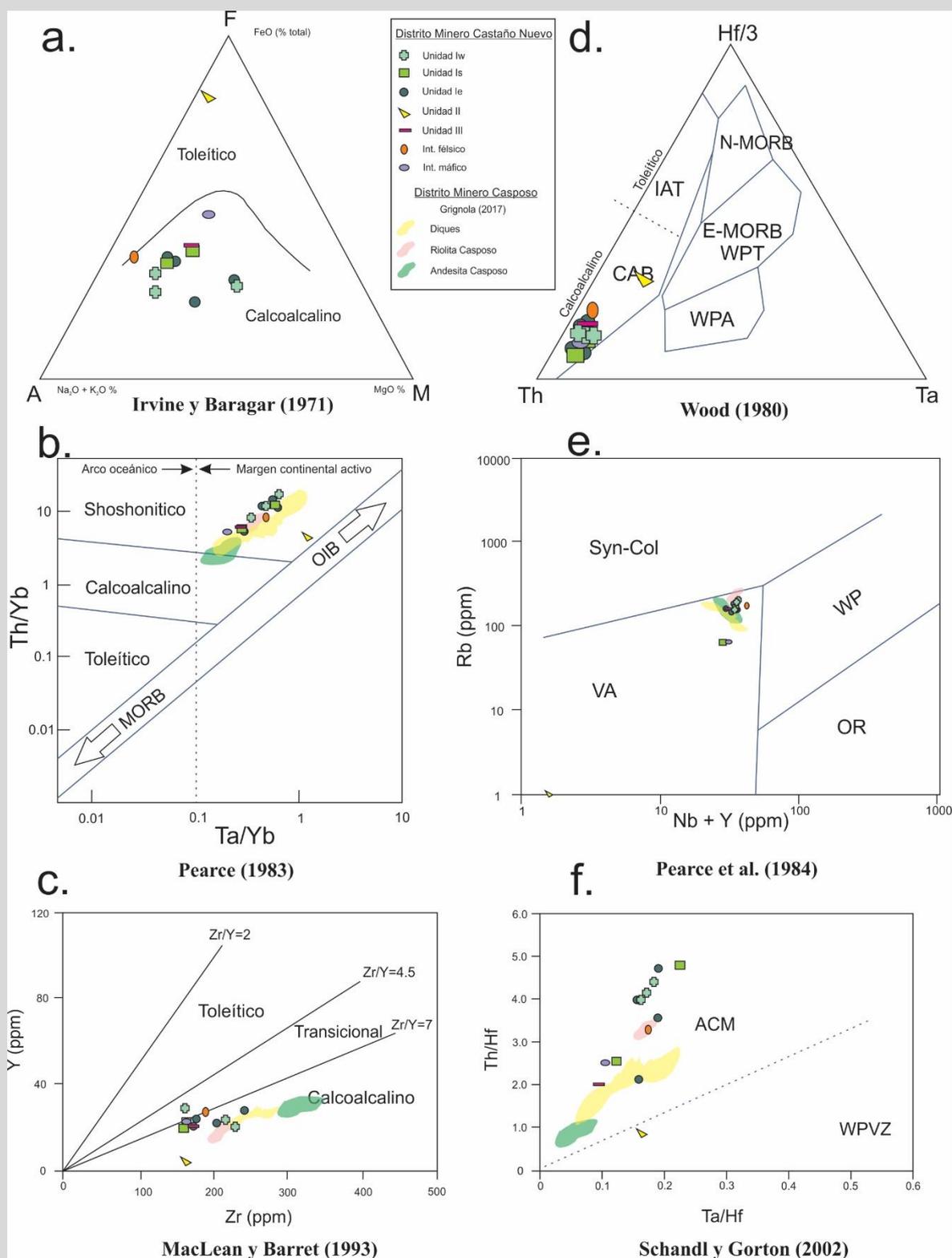
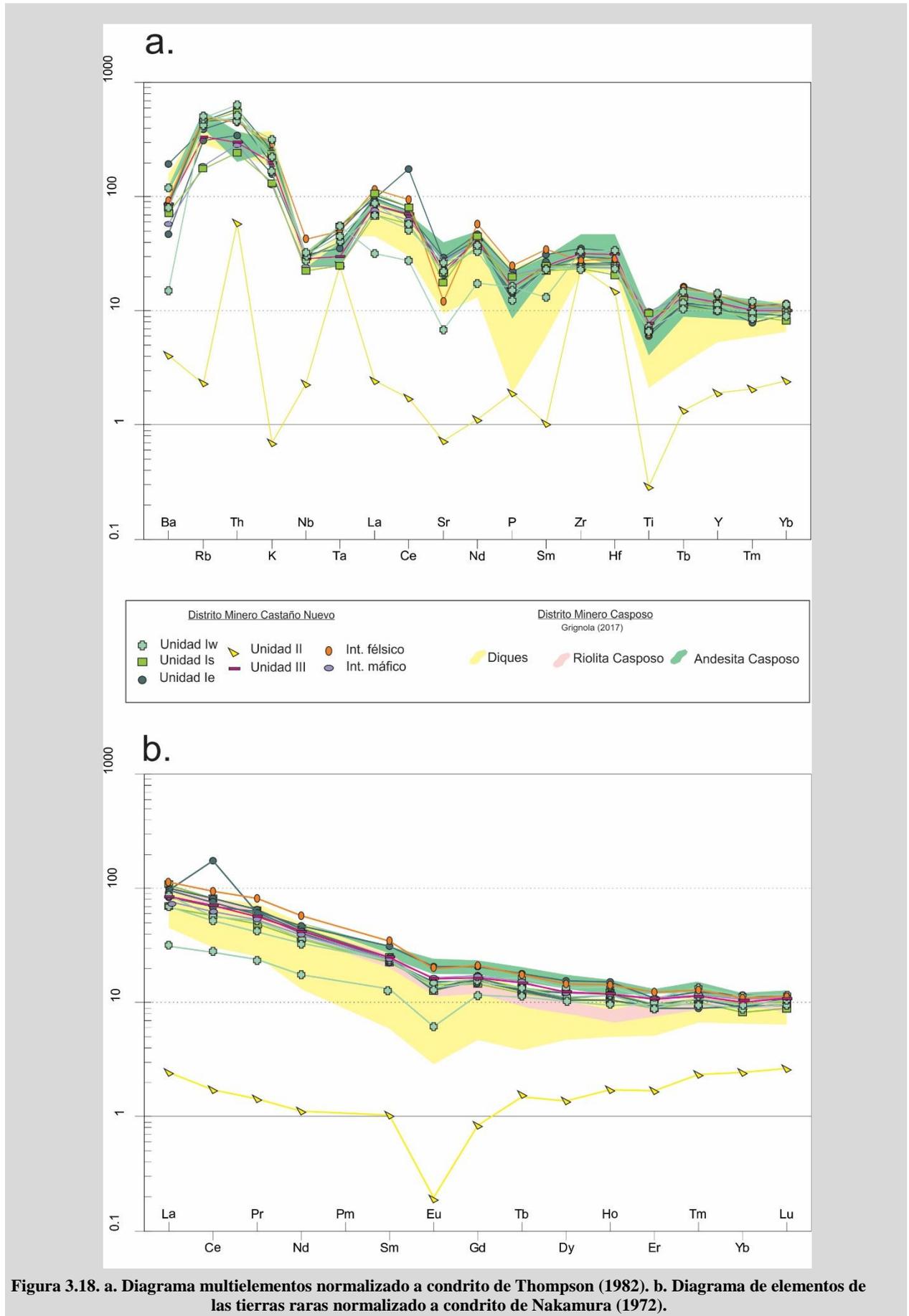


Figura 3.17. a. Diagrama AFM de Irvine y Baragar (1971) mostrando la tendencia calcoalcalina de la secuencia analizada. b. Diagrama Ta/Yb vs. Th/Yb de Pearce (1983) donde la totalidad de las muestras se ubica en el campo de la serie shoshonítica. c. Diagrama Zr vs. Y de MacLean y Barret (1993) mostrando también la tendencia calcoalcalina de las muestras. d. Diagrama Th-(Hf/3)-Ta de Wood (1980); CAB: calc-alkaline basalts; IAT: island-arc tholeiites; NMORB: normal mid-ocean ridge basalts; WTP: within-plate tholeiite; WPA: within-plate alkalic. e. Diagrama Rb vs. Nb+Y de Pearce et al. (1984); VA: volcanic arc granites; Syn-Col: syn-collision granites; WP: within-plate granites; OR: ocean-ridge granites. f. Diagrama Ta/Hf vs. Th/Hf de Schandl y Gorton (2002); ACM: active continental margins; WPVZ: within-plate volcanic zone. Óxidos mayoritarios en porcentaje en peso, elementos trazas en ppm.



3.3.3. Edad de las Unidades del Distrito Minero Castaño Nuevo

En base al mapeo de las unidades en campo se seleccionaron 4 muestras para estudios de geocronología. Los resultados de las mismas se resumen en la tabla 3.3.

spot	U ppm	Th ppm	Th U	²⁰⁶ Pb ppm	4f ²⁰⁶ %	²⁰⁷ Pb / ²⁰⁶ Pb	isotopic ratios			ages		Disc. %	
							²⁰⁷ Pb / ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U	error corr.	²⁰⁸ Pb / ²³² Th	²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U		²⁰⁶ Pb / ²⁰⁷ Pb
A-216													
a.1-1	264	206	0.81	10	0.104	0.05231 ± 2.97	0.3057 ± 3.79	0.04239 ± 2.37	0.624	0.01278 ± 3.06	267.6 ± 6.2	299 ± 68	+11
a.2-1	1167	30	0.03	54	0.102	0.05235 ± 1.20	0.3923 ± 2.03	0.05434 ± 1.64	0.806	0.01226 ± 15.06	341.1 ± 5.4	301 ± 27	-14
a.3-1	364	243	0.69	13	0.093	0.05058 ± 5.93	0.2998 ± 6.17	0.04299 ± 1.73	0.280	0.01275 ± 2.64	271.3 ± 4.6	222 ± 137	-23
a.3-2	174	136	0.81	6	0.429	0.05082 ± 6.12	0.2920 ± 6.42	0.04168 ± 1.92	0.300	0.01268 ± 4.03	263.2 ± 5.0	233 ± 141	-13
a.6-1	865	762	0.91	31	0.000	0.05116 ± 1.51	0.2966 ± 2.65	0.04206 ± 2.18	0.822	0.01306 ± 2.39	265.6 ± 5.7	248 ± 35	-7
a.7-1	175	99	0.58	6	0.167	0.05053 ± 4.17	0.2938 ± 4.56	0.04217 ± 1.84	0.403	0.01242 ± 3.70	266.3 ± 4.8	219 ± 97	-22
a.8-1	309	259	0.87	11	0.268	0.05005 ± 3.43	0.2949 ± 3.85	0.04274 ± 1.73	0.451	0.01283 ± 2.65	269.8 ± 4.6	197 ± 80	-38
a.8-2	392	383	1.01	14	0.239	0.04915 ± 3.19	0.2857 ± 3.88	0.04216 ± 2.20	0.567	0.01261 ± 2.75	266.2 ± 5.7	155 ± 75	-73
a.8-3	309	275	0.92	11	0.217	0.05033 ± 3.61	0.2968 ± 4.01	0.04277 ± 1.75	0.436	0.01341 ± 2.64	270.0 ± 4.6	210 ± 84	-29
B-516													
b.1-1	531	257	0.50	20	0.061	0.05436 ± 3.85	0.3215 ± 4.22	0.04290 ± 1.75	0.413	0.01297 ± 4.57	270.8 ± 4.6	386 ± 86	+30
b.2-1	465	250	0.55	17	0.000	0.05015 ± 4.01	0.2985 ± 4.36	0.04316 ± 1.70	0.391	0.01332 ± 2.45	272.4 ± 4.5	202 ± 93	-35
b.2-2	449	209	0.48	17	0.000	0.05041 ± 2.95	0.2996 ± 3.41	0.04310 ± 1.72	0.503	0.01334 ± 3.05	272.0 ± 4.6	214 ± 68	-28
b.4-1	590	280	0.49	22	0.058	0.05178 ± 1.81	0.3070 ± 2.77	0.04301 ± 2.10	0.758	0.01299 ± 2.63	271.4 ± 5.6	276 ± 41	+2
b.4-2	1981	1343	0.70	75	0.000	0.05211 ± 1.52	0.3187 ± 2.23	0.04435 ± 1.64	0.733	0.01339 ± 2.03	279.8 ± 4.5	290 ± 35	+4
b.4-3	468	239	0.53	17	0.000	0.05140 ± 5.30	0.3068 ± 5.59	0.04330 ± 1.77	0.317	0.01275 ± 4.77	273.2 ± 4.7	259 ± 122	-6
b.5-1	1119	711	0.66	42	0.094	0.05175 ± 1.28	0.3116 ± 2.82	0.04368 ± 2.52	0.891	0.01315 ± 3.08	275.6 ± 6.8	274 ± 29	-0
b.6-1	1642	1133	0.71	61	0.000	0.05169 ± 0.99	0.3062 ± 1.90	0.04297 ± 1.62	0.853	0.01345 ± 2.35	271.2 ± 4.3	272 ± 23	+0
b.6-2	520	218	0.43	19	0.000	0.05120 ± 1.82	0.2987 ± 2.50	0.04232 ± 1.71	0.685	0.01304 ± 2.68	267.2 ± 4.5	250 ± 42	-7
C-416													
c.5-1	708	396	0.58	26	0.090	0.05050 ± 1.93	0.2996 ± 2.56	0.04303 ± 1.68	0.658	0.01323 ± 2.25	271.6 ± 4.5	218 ± 45	-25
c.6-1	859	673	0.81	32	0.066	0.05212 ± 1.58	0.3127 ± 2.30	0.04352 ± 1.67	0.727	0.01335 ± 1.97	274.6 ± 4.5	290 ± 36	+6
c.6-2	893	730	0.84	33	0.112	0.05142 ± 1.59	0.3046 ± 2.28	0.04296 ± 1.64	0.719	0.01316 ± 1.92	271.1 ± 4.4	260 ± 36	-5
c.6-3	583	331	0.59	21	0.000	0.05514 ± 2.20	0.3229 ± 3.14	0.04247 ± 2.25	0.715	0.01328 ± 2.70	268.1 ± 5.9	418 ± 49	+37
c.7-1	528	221	0.43	19	0.274	0.05045 ± 2.46	0.2978 ± 3.33	0.04281 ± 2.23	0.671	0.01293 ± 3.24	270.2 ± 5.9	216 ± 57	-26
c.8-1	413	309	0.77	15	0.135	0.04999 ± 2.57	0.2911 ± 3.37	0.04223 ± 2.18	0.647	0.01304 ± 3.00	266.7 ± 5.7	195 ± 60	-38
c.9-1	472	248	0.54	17	0.000	0.05165 ± 2.11	0.2899 ± 2.71	0.04071 ± 1.71	0.630	0.01238 ± 3.94	257.2 ± 4.3	270 ± 48	+5
c.9-2	342	165	0.50	13	0.000	0.05072 ± 2.34	0.2992 ± 2.90	0.04278 ± 1.71	0.590	0.01346 ± 2.61	270.0 ± 4.5	228 ± 54	-19
c.9-3	379	196	0.53	14	0.000	0.05267 ± 2.16	0.3090 ± 2.99	0.04255 ± 2.07	0.691	0.01322 ± 2.76	268.6 ± 5.4	315 ± 49	+15
D-316													
d.2-1	595	262	0.46	22	0.209	0.05206 ± 2.76	0.3068 ± 3.25	0.04274 ± 1.72	0.529	0.01292 ± 3.10	269.8 ± 4.5	288 ± 63	+7
d.3-1	661	434	0.68	25	0.000	0.05292 ± 1.61	0.3168 ± 2.34	0.04343 ± 1.70	0.725	0.01339 ± 2.83	274.0 ± 4.6	325 ± 37	+16
d.3-2	518	425	0.85	19	0.061	0.05044 ± 2.19	0.2981 ± 2.76	0.04287 ± 1.68	0.610	0.01299 ± 2.86	270.6 ± 4.5	215 ± 51	-26
d.4-1	998	681	0.70	36	0.000	0.05211 ± 1.29	0.3054 ± 2.29	0.04250 ± 1.90	0.828	0.01309 ± 2.15	268.3 ± 5.0	290 ± 29	+8
d.4-2	435	252	0.60	16	0.000	0.05115 ± 1.98	0.3006 ± 2.60	0.04262 ± 1.69	0.650	0.01311 ± 2.28	269.1 ± 4.4	247 ± 45	-9
d.5-1	422	227	0.56	16	0.000	0.04979 ± 1.93	0.2955 ± 2.57	0.04305 ± 1.69	0.658	0.01336 ± 2.28	271.7 ± 4.5	185 ± 45	-48
d.5-2	840	597	0.73	31	0.094	0.05184 ± 1.61	0.3107 ± 2.32	0.04347 ± 1.68	0.722	0.01289 ± 2.02	274.3 ± 4.5	278 ± 37	+1
d.6-1	1006	803	0.82	37	0.058	0.05133 ± 1.46	0.3024 ± 2.80	0.04272 ± 2.39	0.853	0.01315 ± 2.58	269.7 ± 6.3	256 ± 34	-6
d.7-1	547	309	0.58	20	0.000	0.05212 ± 2.13	0.3109 ± 2.98	0.04326 ± 2.09	0.699	0.01313 ± 4.43	273.0 ± 5.6	291 ± 49	+6

Tabla 3.3. Datos U/Th/Pb SHRIMP en circones de las rocas del Distrito Minero Castaño Nuevo.

3.3.3.1. Edad de la Unidad I

Este grupo de rocas constituye la caja de las vetas y es afectada por la intensa alteración localizada en el sector sur y oeste. Debido a que anteriormente estos afloramientos fueran tratados como dos unidades diferentes por otros autores (Delendatti, 2005 a, b; Serafini, 1982), se tomaron dos muestras para comparar. En el sector oriental, donde afloran las volcanitas de la Formación Vega de Los Machos se tomó la muestra D-316, mientras que en el sector occidental donde afloraría el Pórfido Andesítico triásico definido por Espina et al. (1998) se tomó la muestra B-516 (ver en Figura 3.1).

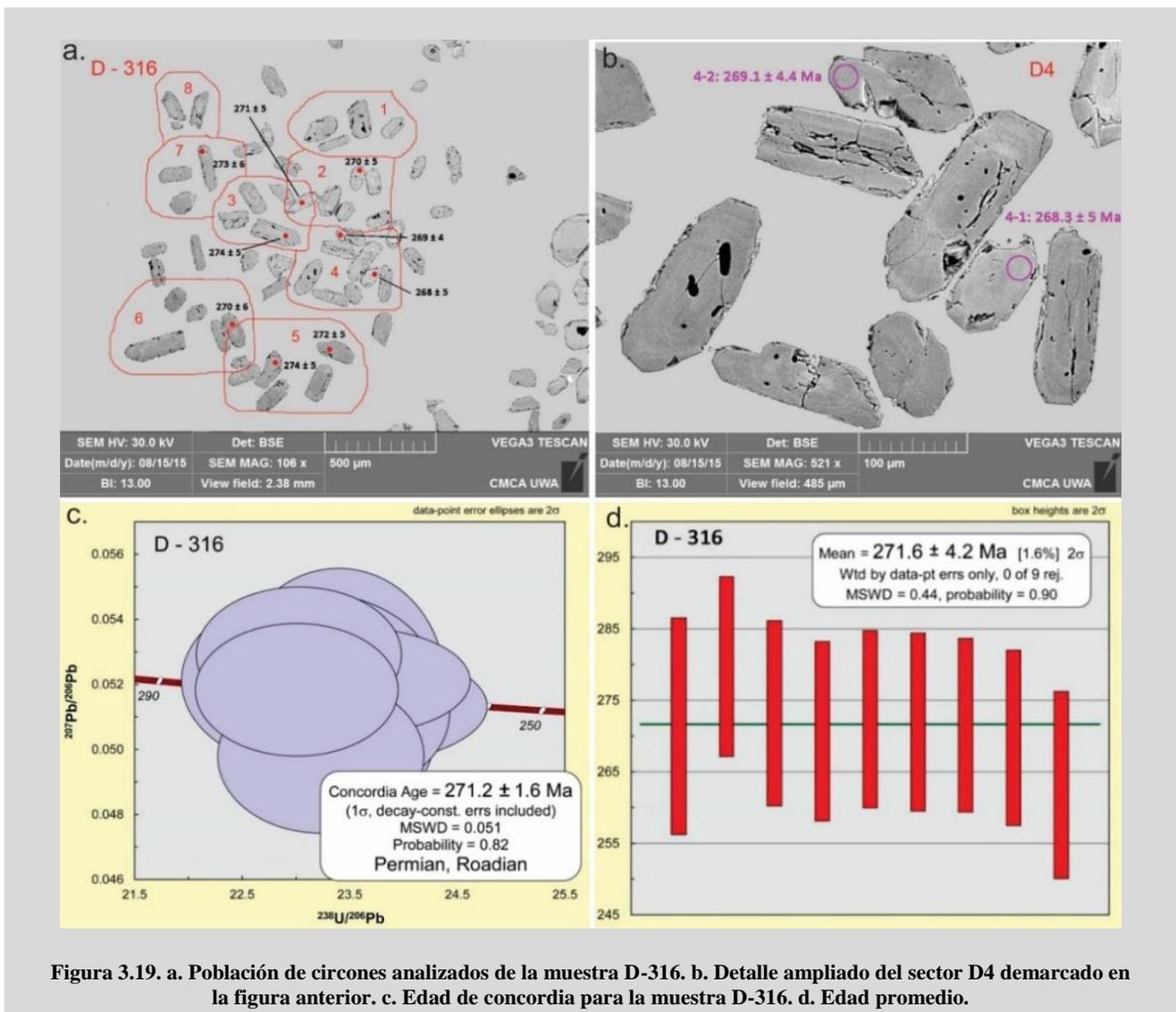


Figura 3.19. a. Población de circones analizados de la muestra D-316. b. Detalle ampliado del sector D4 demarcado en la figura anterior. c. Edad de concordia para la muestra D-316. d. Edad promedio.

La muestra D-316 presenta cristales de circones elongados con bordes angulosos, escasas inclusiones y levemente fracturados. Algunos de ellos se encuentran más fracturados por lo que no es posible analizarlos. Los circones son relativamente ricos en U (en promedio 669 ppm), con relaciones de Th/U (en promedio 0,66) típicas de circones magmáticos. Presentan una curva de edad de concordia inversa de $271,2 \pm 1,6$ Ma (Roadiano, Pérmico). Figura 3.19.

La muestra B-516 contiene circones con escasas inclusiones y fracturas. Se determinaron unas pocas áreas en estado metamórfico. Los circones son ricos en U (en promedio 863 ppm), con relaciones de Th/U (en promedio 0,56) típicas de circones magmáticos. Presentan una curva de edad de concordia inversa de $272,6 \pm 2,3$ Ma (Roadiano-Kunguriano, Pérmico). Figura 3.20.

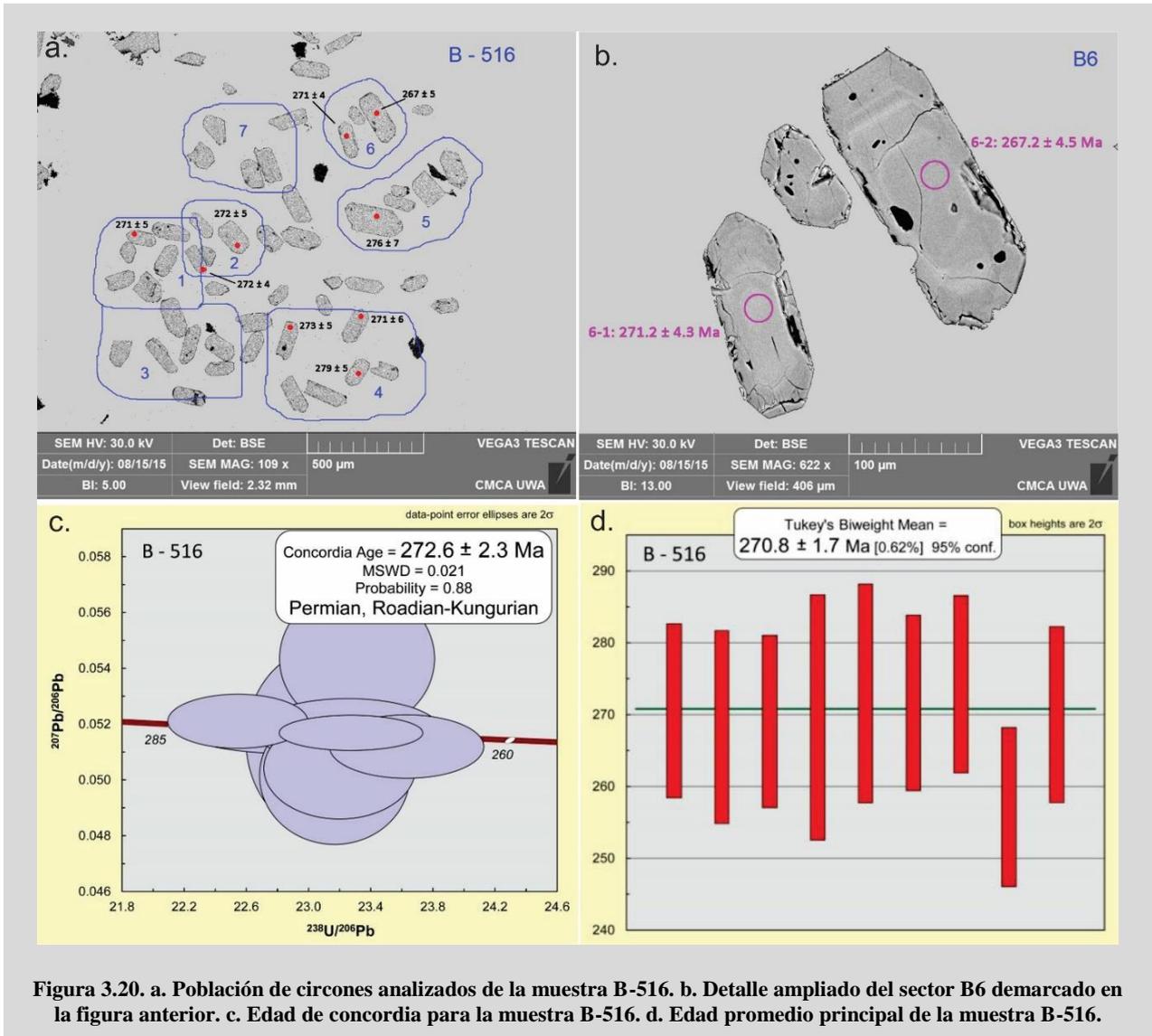


Figura 3.20. a. Población de circones analizados de la muestra B-516. b. Detalle ampliado del sector B6 demarcado en la figura anterior. c. Edad de concordia para la muestra B-516. d. Edad promedio principal de la muestra B-516.

3.3.3.2. Edad de la Unidad III

La Unidad III presenta afloramientos con escasa alteración y fácilmente accesibles en la Quebrada del Alumbre (ver Figura 3.1). Allí se obtuvo la muestra A-216, con circones cortos de entre 50 y 300 μ m, con formas angulosas y no metamórficos.

Los circones son relativamente ricos en U (en promedio 447 ppm), con relaciones de Th/U (en promedio 0,74) consistentes con un origen magmático. La edad calculada a partir de la intercepción de

la curva de concordia es de $267,6 \pm 2,6$ Ma (Guadalupiano, Pérmico). En esta muestra se encontró un cristal heredado que arrojó una edad de 341 ± 5 Ma (Carbonífero) con características de un origen metamórfico. Figura 3.21.

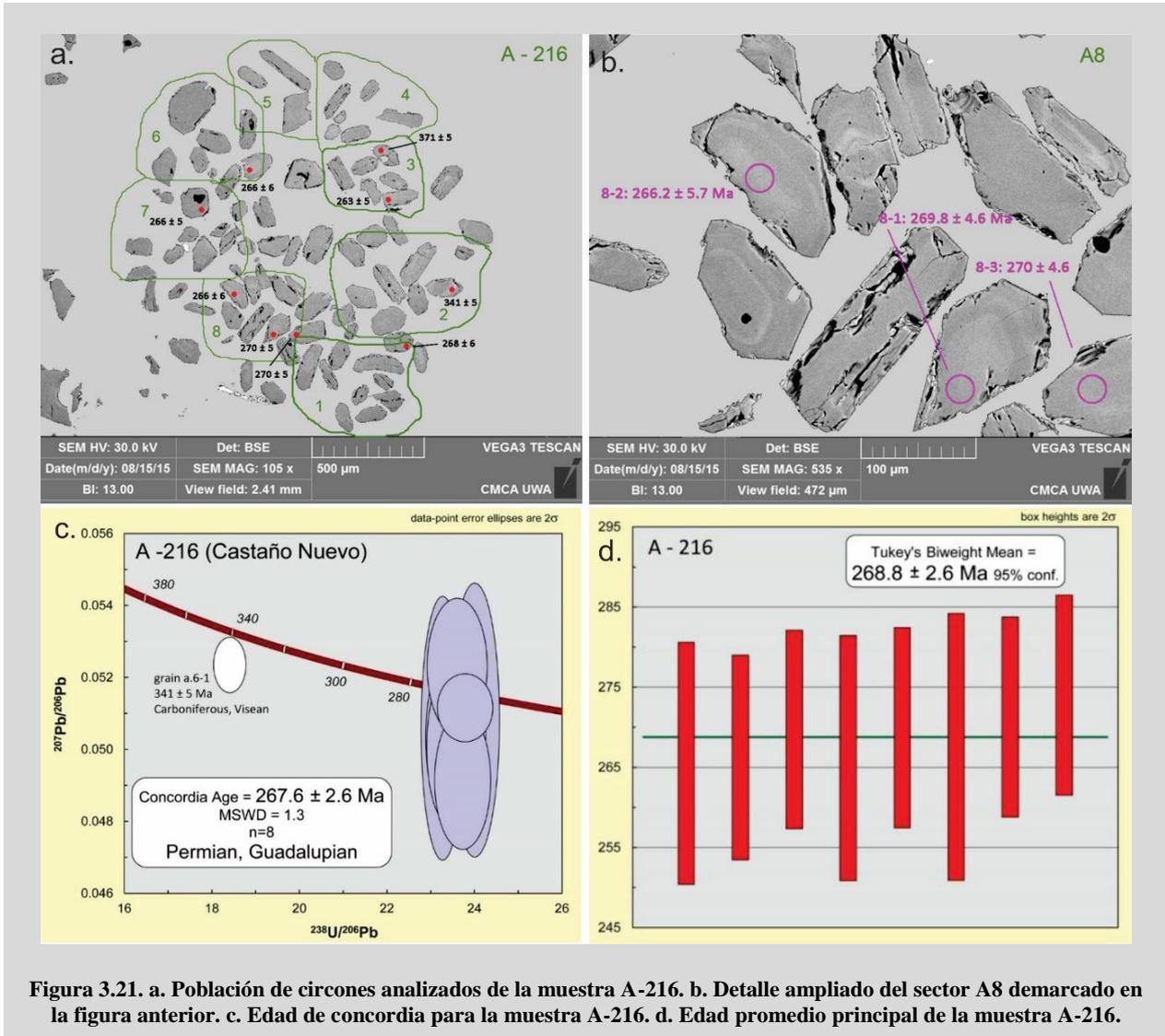


Figura 3.21. a. Población de circones analizados de la muestra A-216. b. Detalle ampliado del sector A8 demarcado en la figura anterior. c. Edad de concordia para la muestra A-216. d. Edad promedio principal de la muestra A-216.

3.3.3.3. Edad de los intrusivos básicos

Los cuerpos intrusivos encontrados en el sector central del área de estudio fueron muestreados con el fin de establecer su edad absoluta y acotar la edad de la alteración hidrotermal, ya que los mismos se observan frescos sin afectación alguna por parte de los fluidos.

Se tomó la muestra C-416 la cual presenta circones con más defectos, en comparación con las anteriores. Gran proporción de fracturas e inclusiones, aunque en el interior de algunos cristales se detectaron áreas libres de defectos donde pudieron realizarse las mediciones. Los circones son

relativamente ricos en U (en promedio 575 ppm), con relaciones Th/U promedio de 0,62, también concordantes con un origen magmático. La edad calculada es de $270,6 \pm 3,0$ Ma (Roadiano, Pérmico). Figura 3.22.

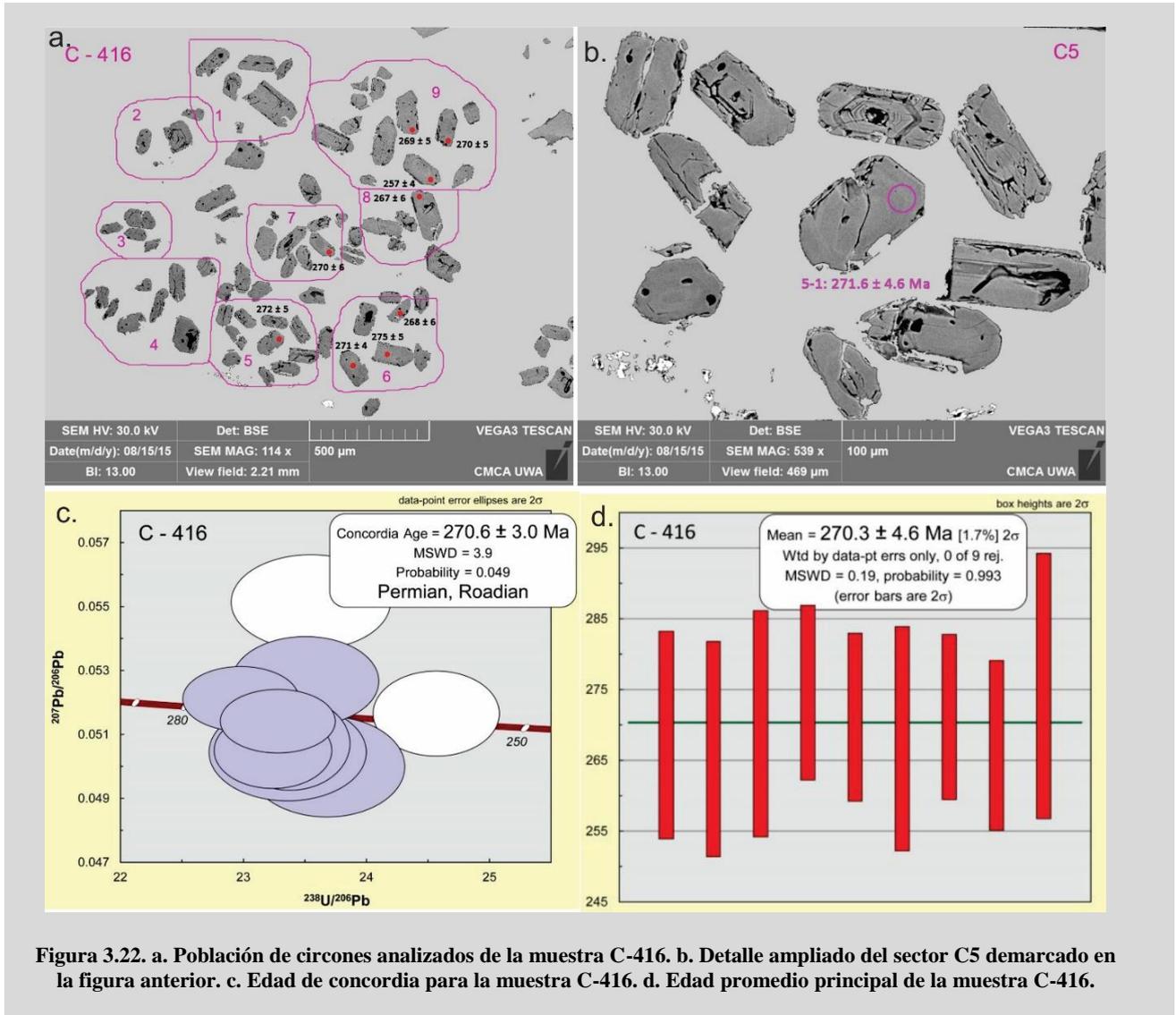


Figura 3.22. a. Población de circones analizados de la muestra C-416. b. Detalle ampliado del sector C5 demarcado en la figura anterior. c. Edad de concordia para la muestra C-416. d. Edad promedio principal de la muestra C-416.

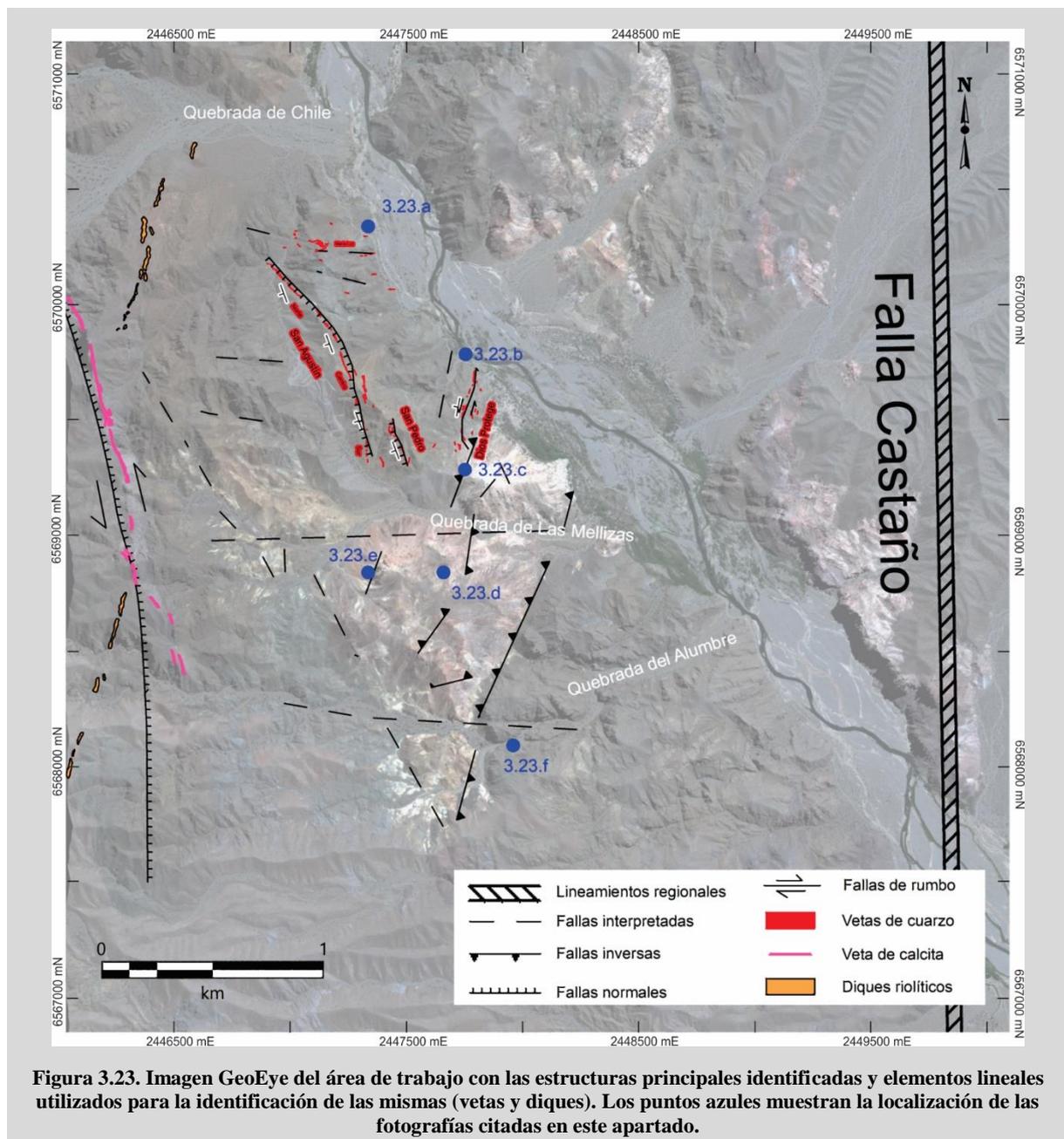
3.3.4. Estructuras locales y su relación con la estructuración regional

La deformación identificada en las unidades aflorantes dentro del Distrito Minero Castaño Nuevo es de comportamiento frágil, y está representada por fallas, diaclasas, brechas. Como se mencionó en el Capítulo 2, la estructuración presente en el ámbito de la Cordillera Frontal sanjuanina puede ser atribuible a dos eventos compresionales separados por un episodio extensional, durante el cual se depositaron las volcanitas permotriásicas asignadas al Grupo Choiyoi.

En particular, el área de estudio del presente trabajo se sitúa dentro del hemi-graben Castaño

definido por Heredia et al. (2002) y asociado a las estructuras extensionales neopaleozoicas a mesozoicas. Este hemi-graben se halla limitado por dos lineamientos regionales con orientación N-S (Figura 2.6, Capítulo 2), denominados Falla Castaño (al este) y Falla Las Leñas (al oeste). La estructuración de este bloque se caracteriza por fallas normales N-S con fuerte componente de rumbo y fallas NO-SE subordinadas.

Localmente, el Distrito Minero Castaño Nuevo se encuentra limitado el este por el Río Castaño y al oeste por una estructura NNO-SSE con relleno de calcita. Esta estructura constituye una falla normal con componente de rumbo siniestral, que genera el desplazamiento de los diques rojizos descritos anteriormente. En la figura 3.23 se muestran las principales estructuras reconocidas y las relaciones entre las mismas.



En el sector norte, donde aflora la Unidad I se observa un fuerte patrón de diaclasamiento cuyas orientaciones predominantes son N50° y N310° (Figura 3.24.a). Algunas de estas diaclasas presentan relleno de magnetita y sílice, y la alteración produce un halo rojizo alrededor de las mismas. En el sector inmediatamente al sur de la quebrada de Chile, se reconoce un predominio de estructuras E-O, la mayoría rellenas con cuarzo, alcanzando espesores de 50 cm. Continuando hacia el sur, dentro de la misma unidad se identificó una falla de rumbo con movimiento siniestral y orientación N-S sobre la que se emplaza la veta Dios Protege. Hacia el oeste se registran fallas normales con leve componente de rumbo, de orientación NO-SE y buzamiento al oeste, sobre las que se emplazan vetas de cuarzo/adularia, entre las que se destacan las de San Agustín y San Pedro. Todas las estructuras de cuarzo cortan a las diaclasas rellenas con magnetita (Figura 3.24.b). Por otra parte, se identificaron fracturas de cizalla con orientaciones entre N70° y N100°, que cortan y desplazan a las estructuras anteriores.

Hacia el sur, interrumpiendo la continuidad en superficie de las estructuras que contienen a las vetas, se encuentran una serie de fallas inversas levemente buzantes hacia el norte, con estrías de fallas y escalones que permiten establecer el sentido del movimiento (Figura 3.24.c). En el sector central del área de estudio se determinaron fallas inversas y también se identificaron estructuras que, debido a la fuerte alteración, no fue posible establecer la naturaleza de las mismas, pero se encuentran asociadas a brechas de falla (Figura 3.24.e). En la quebrada de Las Mellizas se interpreta una importante estructura con orientación E-O, posiblemente de rumbo, ya que en algunos bloques se aprecian estrías horizontales con indicadores que marcan tentativamente una cinemática siniestral (Figura 3.24.d).

En el sector más austral, en la quebrada del Alumbre, la Unidad III se encuentra fuertemente fracturada, sin orientación preferencial (Figura 3.24.f). Se distinguen algunas fracturas mayores con relleno de calcita, con orientaciones entre N280° y N320°.

3.4. Discusión de los Resultados y Conclusiones

El análisis en detalle de las unidades litológicas en las que se encuentra contenido el Distrito Minero Castaño Nuevo ha arrojado nuevos resultados desde el punto de vista estratigráfico y tectónico que difieren de los trabajos realizados anteriormente (Alonso, 1982; Delendatti, 2005a; Serafini, 1982). Los trabajos de detalle previos, plantean un cuerpo subvolcánico como roca encajante de las mineralizaciones de Castaño Nuevo. El análisis de diferentes perfiles y el levantamiento de cortes a lo largo de transectas no mostraron ningún contacto intrusivo, sino que por el contrario toda la secuencia parece apoyarse sucesivamente de manera concordante. Tal vez podría indicarse un cuerpo en el sector central del área de estudio donde la alteración es intensa, pero aun así la estratificación incipiente se mantiene. Es por esto que se define a la Unidad I como una lava andesítica con proporciones variables de fragmentos líticos, y las diferencias morfológicas de los afloramientos se atribuyen a los distintos

grados de alteración hidrotermal que se registran en los diferentes sectores. Por otro lado, la edad tentativa de ese cuerpo había sido atribuida al Triásico (Espina et al., 1998), pero la muestra B-516 tomada en el sector central arrojó una edad U/Pb de $272,6 \pm 2,3$ Ma, similar a la obtenida en el sector oriental del área de estudio (muestra D-316).



Figura 3.24. a. Afloramiento de las volcanitas de la Unidad I donde se observa el fuerte diaclasamiento. b. Fotografía de fractura rellena por magnetita con halo de óxidos de hierro, cortada por venilla de cuarzo, evidenciando las relaciones temporales entre las distintas fracturas. c. Plano NE de falla donde se interrumpe el sistema vetiforme en superficie. Se marcan en amarillo la dirección de las estrías y el escalonamiento, la flecha amarilla indica el sentido de movimiento. d. Plano de falla con estrías horizontales en la quebrada de Las Mellizas. e. Brecha de falla. f. Afloramiento de la Unidad III mostrando la intensa fracturación.

Algunas de las brechas descritas por Delendatti et al. (2002) y Delendatti (2005 a, b) como parte de un sistema de diatrema asociadas a un cuerpo intrusivo, se observan en secuencia con las volcanitas y se intercalan con paquetes piroclásticos más finos. Esta secuencia piroclástica, denominada como Unidad II, se define como una alternancia de brechas monolitológicas megalíticas clasto sostén, con brechas polimícticas mátrix sostén y tobas cristalolíticas finas. Facies similares fueron descritas por Rocher et al. (2015) al sureste de la localidad de Calingasta, en el sector de la Alumbreira, y fueron deefinidas como facies características de la Formación Vega de los Machos. La alteración intensa registrada sobre esta unidad presenta un fuerte control litológico (además de estructural), evidenciado por la variable intensidad registrada en las diferentes facies, en relación a la granulometría de las mismas.

Por encima de esta secuencia, se registra un paquete que hacia la base se compone de brechas polimícticas mátrix soportada rica en cristaloclastos y vitroclastos (\pm *fiammes*) y hacia la parte superior se caracteriza por brechas matrix sostén con predominio de cristales. Estas brechas agrupadas bajo la denominación de Unidad III no muestran alteración hidrotermal. La edad U/Pb obtenida para esta unidad es de $267,6 \pm 2,6$ Ma (muestra A-216), y constituye un límite temporal para el sistema hidrotermal tanto de las vetas como de las brechas hidrotermales, ya que en esta secuencia no se registran expresiones de ninguno de los dos sistemas.

A lo largo de una transecta N-S, estas tres unidades se observan a cotas similares. Esto se debe a una serie de fallas inversas con orientación NE-SO que levantan a las secuencias más antiguas y las colocan en los mismos niveles topográficos que las más jóvenes. Estas fallas inversas son más modernas que las fallas normales y de rumbo sobre las que se emplazan las vetas, ya que estas últimas se interrumpen en superficie al llegar a las primeras.

Los análisis de litogeoquímica sobre las unidades que componen el Distrito Minero Castaño Nuevo muestran una concordancia con los resultados obtenidos por González y Sato (1998) para las muestras del Grupo Choiyoi en el sector de la Cordillera Frontal que abarca la Hoja Geológica Castaño Nuevo, y los resultados obtenidos por Grignola (2017) en el área de Mina Casposo. En general se trata de andesitas a riocacitas con alto contenido de potasio, asociadas a una serie calcoalcalina/shoshonítica vinculada a un arco volcánico sobre margen continental. De acuerdo a la comparación con los mencionados autores se estableció que la totalidad de la secuencia descrita en el Distrito Minero Castaño Nuevo corresponde a la Formación Vega de los Machos.

En términos generales, el diagrama de elementos de las tierras raras (REE) normalizado a condrito según los valores de Nakamura (1974), muestra para las rocas hospedantes de la mineralización del Distrito Minero Castaño Nuevo, un enriquecimiento en tierras raras livianas (LREE). Se observan pendientes moderadas, con un empobrecimiento paulatino hacia las tierras raras pesadas (HREE) y una pendiente subhorizontal entre Dy y Lu. Esta distribución, junto con la anomalía negativa de Eu registrada en todas las muestras, es concordante con rocas generadas en ambientes de subducción (Wilson, 1989). Dicha anomalía de Eu, si bien está presente, no es muy pronunciada, lo que se condice

con rocas de arco muy poco evolucionadas.

De igual modo, en el diagrama de multielementos de Thompson (1982), se registra una anomalía negativa de Sr y de los elementos inmóviles Nb, Ta, Ti y P. El enriquecimiento en LILE respecto de HFSE y RREE y las anomalías negativas de Ta, Nb, Ti y P son las características típicas de los magmas de arco calcoalcalinos. El empobrecimiento progresivo hacia los elementos pesados constituye una signatura geoquímica típica de magmas originados en ambientes tectónicos relacionados a arcos (Pearce, 1983).

Con respecto a los cuerpos discordantes identificados en la región, tanto los diques riódacíticos rojizos (Intrusivos Félsicos) como los cuerpos irregulares básicos (Intrusivos Máficos) muestran firmas similares a la de la secuencia volcánico-piroclástica. Por otro lado, se estableció una edad U/Pb para los Int. Máficos de $270,6 \pm 3$ Ma (muestra C-416), es decir se habrían emplazado previo a la depositación de la Unidad III, lo cual es coincidente con la distribución de estos cuerpos en el área ya que sólo se observan intruyendo a las unidades I y II. En cuanto a los diques riódacíticos rojizos, los mismos pueden seguirse a escala regional desde el norte a la altura de Castaño Viejo, hasta el sur en la quebrada de Manrique, donde son cubiertos por abanicos terciarios y aparecen nuevamente a la altura de la Mina Casoso. Los diques en Casoso fueron definidos por Grignola (2017) como diques post-mineralización y presentan características geoquímicas similares a las del Distrito Minero Castaño Nuevo. La edad obtenida por dicho autor para los diques es de $261,1 \pm 3,5$ Ma.

A partir de la integración de todos estos resultados se confeccionó un mapa geológico para el Distrito Minero Castaño Nuevo (Figura 3.25). De este análisis se desprende que las unidades identificadas conforman, en conjunto, una secuencia volcánico-piroclástica pseudoncordante, que se depositó en el lapso de 5 Ma como parte de un arco volcánico desarrollado en corteza continental, durante el Pérmico inferior a medio. Asociados a este magmatismo, se desarrollaron sistemas hidrotermales de interés económico que, en el Distrito Minero Castaño Nuevo están controlados litológica y estructuralmente, y es posible acotarlos temporalmente en base a las relaciones estratigráficas establecidas.

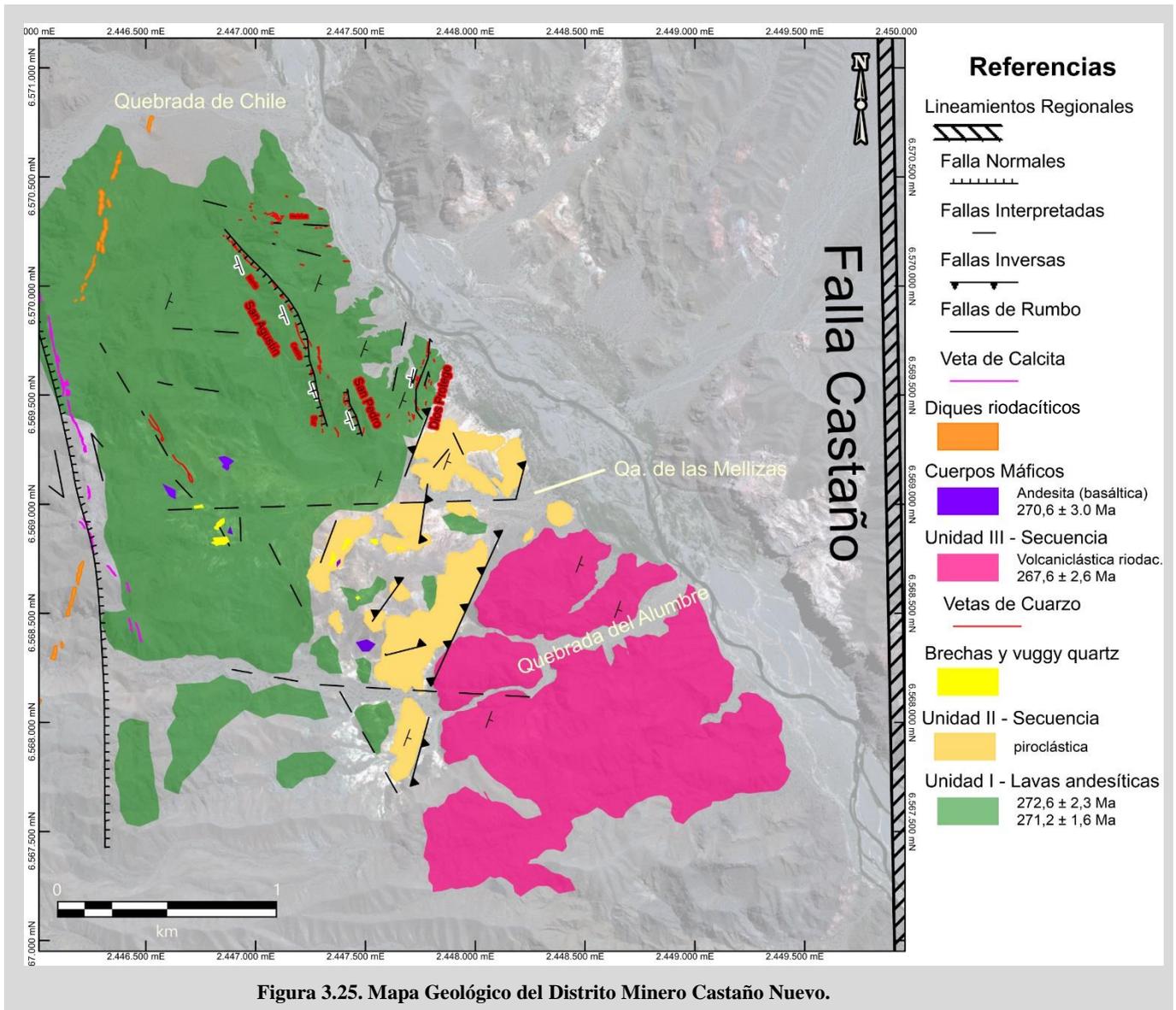


Figura 3.25. Mapa Geológico del Distrito Minero Castaño Nuevo.

3.5. Trabajos citados en el Capítulo 3

- Alonso, J. 1982. Prospección geológica y exploración primaria del sector de alteración Castaño Nuevo. Dpto. Calingasta, San Juan. Trabajo Final de Licenciatura (inédito). Universidad Nacional de San Juan. San Juan. 126 p.
- Angelelli, V. 1950. Los recursos minerales de la República Argentina. I. Yacimientos metalíferos. Revista del Instituto Nacional de Investigación de las Ciencias Naturales anexo al Museo Argentino de Ciencias Naturales “Bernardino Rivadavia”. Ciencias Geológicas. Tomo II, 542 p. La Plata.
- Angelelli, V., Etcheverry, R., Tomasi, C. y González, A. 1984. Yacimientos Metalíferos de la República Argentina, 1ra ed., tomo 2: 444-445, Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata.
- Cegarra, M.I., Ragona, D.E., García Espina, R., González, P.D., Lo Forte, G.L. y Sato, A.M. 1998. Estratigrafía de la Región de Castaño Nuevo, Cordillera Frontal de San Juan. X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica. Actas I: 85-90. Buenos Aires. Argentina.
- Compston, W., Williams, I.S., Kirschvink, J.L., Zichao, Z. y Guogan, M. 1992. Zircon ages for the Early Cambrian timescale. Journal of the Geological Society of London 149: 171-184.
- De Laeter, J.R. y Kennedy, A.K. 1998. A double focusing mass spectrometer for geochronology. International Journal of Mass Spectrometry 178: 43-50.
- Delendatti, G.L., Zangrandi, M. y Bastías, H. 2001. Discusión sobre la génesis del distrito auro-argentífero Castaño Nuevo, Cordillera Frontal, San Juan. VII Congreso Argentino de Geología Económica. Actas 1: 77-80. Salta, Argentina.
- Delendatti, G.L., Zangrandi, M. y Bastías, H. 2002. Relaciones entre alteración hidrotermal y estructuras: el caso de las brechas silicificadas del distrito Castaño Nuevo, Cordillera Frontal sanjuanina. XV Congreso Geológico Argentino. El Calafate. Actas: 6 p.
- Delendatti, G.L. 2003. Caracterización de zonas de alteración hidrotermal en las márgenes del río Castaño, provincia de San Juan, mediante procesamiento digital de imágenes TM. Revista de la Asociación Geológica Argentina 58: 97-108.
- Delendatti, G.L., Gargantini, H. y Ceballos, J. 2003. Las vetas epitermales del Complejo Mineralizado Castaño Nuevo, Cordillera Frontal sanjuanina. 10º Congreso Geológico Chileno. Actas: 1-8. Concepción, Chile.
- Delendatti, G.L. 2005a. La Diatrema del Complejo Mineralizado Castaño Nuevo, Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. VIII Congreso de Geología Económica. Actas: 175-182. Buenos Aires.
- Delendatti, G.L. 2005b. Caracterización genética del complejo mineralizado Castaño Nuevo y su relación con el magmatismo Gondwánico en Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. Tesis Doctoral (inédita). Universidad Nacional de San Juan. 213 p.
- Espina, R.G., Cegarra, M.I., Ragona, D., González, P. y Lo Forte, G.L. 1998. Hoja 3169-20 Castaño Nuevo, provincia de San Juan, Argentina, escala 1:250.000. SEGEMAR. Buenos Aires.
- Ewart, A. 1982. The Mineralogy and Petrology of Tertiary-Recent Orogenic Volcanic Rocks: With a Special Reference to the Andesitic-Basaltic Compositional Range. En Thorpe (eds.), Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks: 25-95 p. Wiley.
- González, P.D. y Sato, A.M. 1998. Petrología, geoquímica y geocronología del magmatismo de la Hoja 3169-20, “Castaño Nuevo”. Provincia de San Juan, Argentina. SEGEMAR. Buenos Aires.

- Grignola, S. 2017. El Deposito de Casposo epitermal de baja sulfuración de oro – plata: Alteración hidrotermal e implicancias geocronológicas en la mineralización de oro – plata, rocas volcánicas, diques y granitoides asociados espacialmente, San Juan – Argentina. Tesis Doctoral (inérita). Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo. 206 p.
- Heredia, N., Rodríguez Fernández, L.R., Gallastegui, G., Busquets, P. y Colombo, F. 2002. Geological setting of the Argentine Frontal Cordillera in the flat-slab segment (30°00' - 31°30' S latitude). *Journal of South American Earth Science* 15: 79–99.
- Irvine, T.N. y Baragar, W.R.A. 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8(5): 523-548.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. y Zanettin, B. 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks based on the Total Alkali-Silica diagram. *Journal of Petrology* 27: 745–750.
- Ludwig, K.R. 1999. Using ISOPLOT/Ex, version 2: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication 1. 47 p. California.
- Ludwig, K.R. 2002. Squid 1.02, a user’s manual, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication 2. 21p. California.
- MacLean, W.H. y Barrett, T.J. 1993. Lithochemical techniques using immobile elements. *Journal of Geochemical Exploration* 48: 109-133.
- Nakamura, N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in Carbonaceous and Ordinary Chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38: 757-775.
- Pearce, J. A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. En Hawkesworth, C.J. y Norry, M.J. (eds.). *Continental basalts and mantle xenoliths*. Cheshire: Shiva Publications. 230-249 p. Nantwich.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. y Tindle, A.G. 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology* 25 (4): 956-983.
- Rocher, S., Vallecillo, G., Castro de Machuca, B. y Alasino, P. 2015. El Grupo Choyoi (Pérmico temprano-medio) en la Cordillera Frontal de Calingasta, San Juan, Argentina: volcanismo de arco asociado a extensión. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 32: 415–432.
- Rodríguez Fernández, L.R., Heredia, N., Gallastegui, G., Quesada, C., Robador, A., Marín, G., Cardó, R., 1996. Hoja 3169-14: Paraje Castaño Viejo. Escala 1:250.000. SEGEMAR. Buenos Aires.
- Schandl, E.S. y Gorton M.P. 2002. Application of High Field Strength Elements to Discriminate Tectonic Settings in VMS Environments. *Economic Geology* 97: 629-642.
- Serafini, R. 1982. Posibilidades de los yacimientos de plata y oro del sector oeste del distrito Castaño Nuevo. Trabajo Final de Licenciatura (inérito). Universidad Nacional de San Juan. 104 p.
- Sotarello, G., Belvideri, I., Machuca, E. y Castro de Machuca, B. 2002. Low sulfidation epithermal system in the Casposo-Villa Corral area, Calingasta, San Juan, Argentina. En: *Argentina Mining Conference*. Mendoza, p. 16.
- Stern, R.A. 2001. A new isotopic and trace element standard for the ion microprobe: preliminary thermal ionization mass spectrometry (TIMS) U-Pb and electron microprobe data. Geological Survey of Canada, Catalogue M44-2001/F1E-IN.
- Thompson, R.N. 1982. Magmatism of the British Tertiary Volcanic Province. *Scottish Journal of Geology* 18: 49-107.
- Wilson, M. 1989. *Igneous petrogenesis. A global tectonic approach*. Springer, 9th edition. 466p. Londres.

Winchester, J.A. y Floyd, P.A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325-343.

Wood, D. A. 1980. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters* 50: 11-30.

Capítulo 4: Geofísica

- 4.1. Introducción
- 4.2. Antecedentes
- 4.3. Metodología
- 4.4. Resultados
 - 4.4.1. Procesamiento de Datos Magnéticos
 - 4.4.1.1. Campo Magnético Total
 - 4.4.1.2. Campo Magnético Reducido al Polo
 - 4.4.1.3. Señal Analítica del Campo Magnético Total
 - 4.4.1.4. Primera y Segunda Derivada Vertical del Campo Magnético Total
 - 4.4.1.5. Mapa de Complejidad Estructural
 - 4.4.2. Procesamiento de Datos Radiométricos
- 4.5. Discusión y Conclusiones
- 4.6. Trabajos citados en el Capítulo 4

Capítulo 4: Geofísica

4.1. Introducción

La geofísica aplicada constituye un método indirecto para la localización de depósitos de interés económico. Los métodos geofísicos implican la medición de las propiedades físicas de las rocas y de los campos físicos de la Tierra como un medio para graficar y mapear la geología subsuperficial y prospeccionar depósitos minerales. Las propiedades físicas comúnmente medidas incluyen el magnetismo, densidad, radioactividad, velocidad acústica y propiedades eléctricas como conductividad, resistividad, cargabilidad y constante dieléctrica. Estos parámetros están directamente relacionados con las asociaciones minerales que conforman los diferentes tipos de rocas, la naturaleza de su origen, y los subsecuentes cambios que afectan a las mismas y al ambiente a lo largo del tiempo debido a procesos geológicos normales (Ryan y Fraser, 2010).

La elección de un método geofísico, con el fin de establecer la localización de un determinado mineral, depende de la naturaleza del depósito y de las rocas que lo contienen, así como también de las estructuras en las que se emplazan. En algunos casos el método seleccionado puede indicar de manera directa la presencia de un mineral, como por ejemplo la aplicación de un método magnético para encontrar menas de hierro o níquel; en otros casos el método puede indicar solamente si el sector relevado cuenta con las condiciones favorables para la ocurrencia del mineral de interés (Telford et al., 1990).

En el Distrito Minero Castaño Nuevo se aplicaron diversos métodos geofísicos a fin de establecer posibles blancos que estuvieran cubiertos y nuevas guías de exploración para los mismos. La primera etapa de relevamiento geofísico fue llevada a cabo durante las labores de la empresa *Tenke Mining Corp.* en el año 2004. Esta campaña incluyó Polarización Inducida (IP), Resistividad y Magnetometría terrestre. Los resultados obtenidos por la empresa fueron reportados por Delendatti (2005) en su trabajo de Tesis Doctoral y no fue posible conseguir los datos crudos para realizar un nuevo análisis, es por esto que esos datos se tratarán como antecedentes en el presente capítulo.

Una segunda etapa de levantamiento geofísico se realizó en el mes de febrero de 2012 durante los trabajos de exploración de la empresa *Troy Resources Ltd.* A petición de la misma, la compañía Geodatos S.A.I.C. realizó un levantamiento aeromagnético y radiométrico en inmediaciones de la mina Casposo y el Distrito Minero Castaño Nuevo. El propósito del levantamiento aerogeofísico fue definir patrones estructurales y contactos litológicos predominantes en el área de estudio, delimitando zonas de diferente magnetización asociadas a distintas litologías y grados de alteración de las rocas.

El análisis de las variaciones locales en la intensidad del Campo Magnético Total brinda información sobre los cambios laterales de las propiedades magnéticas de las rocas, lo cual puede ser

utilizado como una herramienta para la delimitación de unidades litológicas. De igual modo, el registro de dichos cambios permite identificar estructuras, como así también localizar cuerpos no aflorantes. La alteración hidrotermal también genera variaciones laterales en la intensidad del campo magnético, fundamentalmente debido a la destrucción de minerales magnéticos originales.

El campo magnético es definido en términos de la corriente eléctrica (nanoTeslas, nT) necesaria en una bobina para generar ese campo. El campo geomagnético tiene un valor aproximado de 50000 nT. Anomalías de hasta 0,1 nT pueden ser medidas en relevamientos aeromagnéticos convencionales y pueden tener significancia geológica. Las anomalías magnéticas comúnmente registradas poseen amplitudes desde decenas, cientos y hasta miles nT (Reeves, 2005).

La utilización de espectrómetros de radiación gamma como herramienta para el mapeo geológico y de alteración, ha sido incorporada en los vuelos de relevamiento geofísico, registrando las variaciones en el contenido de K, U y Th de acuerdo a los cambios litológicos o de grado y tipo de alteración. A diferencia de la magnetometría, la respuesta obtenida por el espectrómetro proviene exclusivamente de los primeros centímetros de la superficie.

Los datos crudos del levantamiento aerogeofísico fueron proporcionados por la empresa *Troy Resources Ltd.* y reinterpretados en el presente trabajo.

4.2. Antecedentes

Los primeros trabajos de geofísica realizados en el área de estudio fueron llevados a cabo por la empresa *Tenke Mining Corp.* en el año 2004. Se realizaron 11 líneas de IP, resistividad y magnetometría terrestre, totalizando 12.700 m (Figura 4.1).

Se comenzó con el método IP, el cual es utilizado para medir la respuesta del subsuelo a corrientes introducidas desde la superficie. Esta corriente genera campos eléctricos que dependen de la distribución de la resistividad y polarización del suelo. A partir de los resultados obtenidos mediante esta metodología se interpretó la presencia de un cuerpo conductor polarizado sub-superficial en la zona central del área, coincidente con los sectores de intensa alteración y piritización (Figura 4.1). La resistividad de las rocas en que estaría emplazado el cuerpo polarizado es menor a 100 ohm/m, lo que correspondería a los sectores de alteración. De acuerdo a Delendatti (2005) el cuerpo polarizado presentaría una orientación NO-SE, coincidente con la estructuración dominante del Distrito Minero Castaño Nuevo. Debido a que el estudio de IP detectó dicha zona con alto efecto de polarización inducida y baja resistividad, la empresa *Tenke Mining Corp.* procedió a la realización de una campaña de magnetometría terrestre, abarcando 6 km² (Figura 4.2). Dicha anomalía fue asociada a un halo pirítico con concentraciones de hasta 15% de S₂Fe, en conjunto con fuertes anomalías de Zn y moderadas de

Mo y Au (Delendatti, 2005). El objetivo del estudio magnético fue la delimitación y diferenciación de unidades y estructuras en subsuelo, que permitieran la discriminación de sectores de interés geológico-económico. La medición del campo magnético total se realizó en 11 perfiles separados cada 200 m, con lecturas cada 10 m. Los valores de susceptibilidad magnéticas estimados fluctúan entre 0,004 y 0,011 cgs, lo que equivale a un contenido de magnetita de 1 a 5%. Además, en dicho trabajo se establecieron profundidades entre 50 y 150 m para el techo de los cuerpos magnéticos.

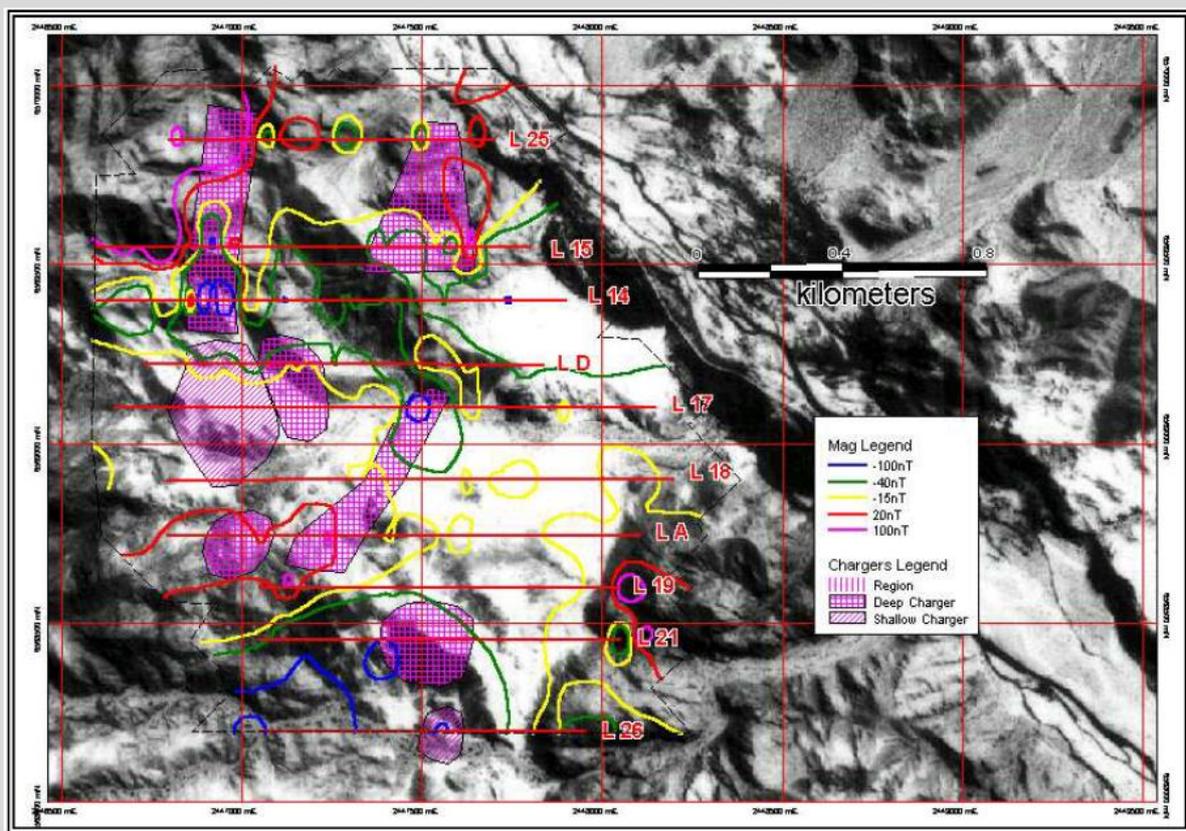


Figura 4.1. Magnetometría con IP/RES (cargadores). Tomada de informe interno de la empresa Tenke Mining Corp (2005).

La magnetometría terrestre permitió comprobar que en el Distrito Minero Castaño Nuevo subyacen zonas con mayor magnetización que el entorno, con un número apreciable de discontinuidades y lineamientos magnéticos de direcciones NO, NNE y N-S que pueden estar relacionados con distintos tipos de estructuras o contactos entre unidades litológicas. Los altos magnéticos reflejan la presencia de un cuerpo intrusivo mayor, de alta susceptibilidad debido a las concentraciones anómalas de minerales magnéticos, mientras que las zonas de menor magnetización fueron interpretadas como sectores hidrotermalmente alterados en los que se produjo la destrucción de estos minerales y que mostraron una buena correspondencia con los afloramientos de mayor grado de silicificación (Delendatti, 2005).

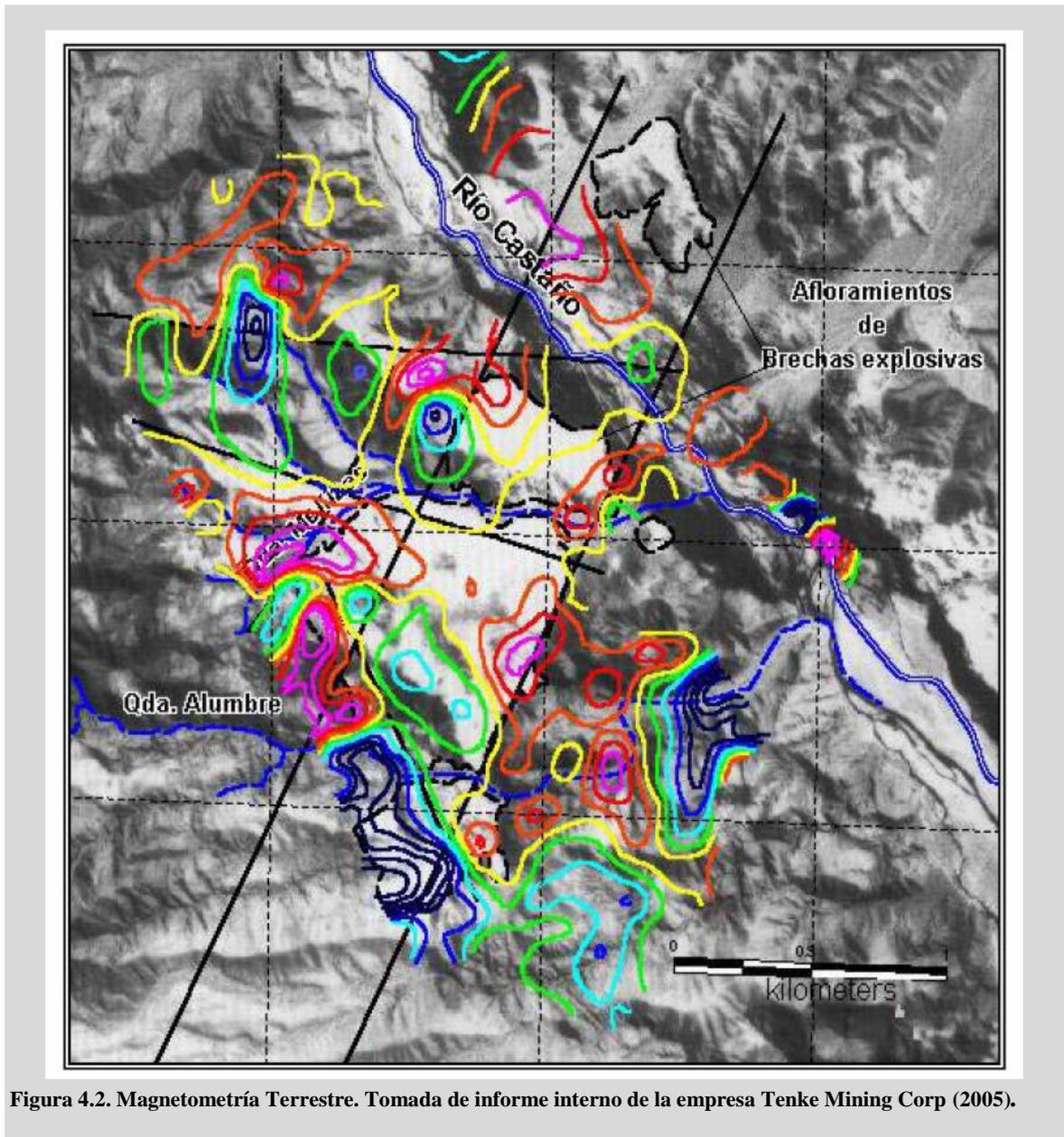
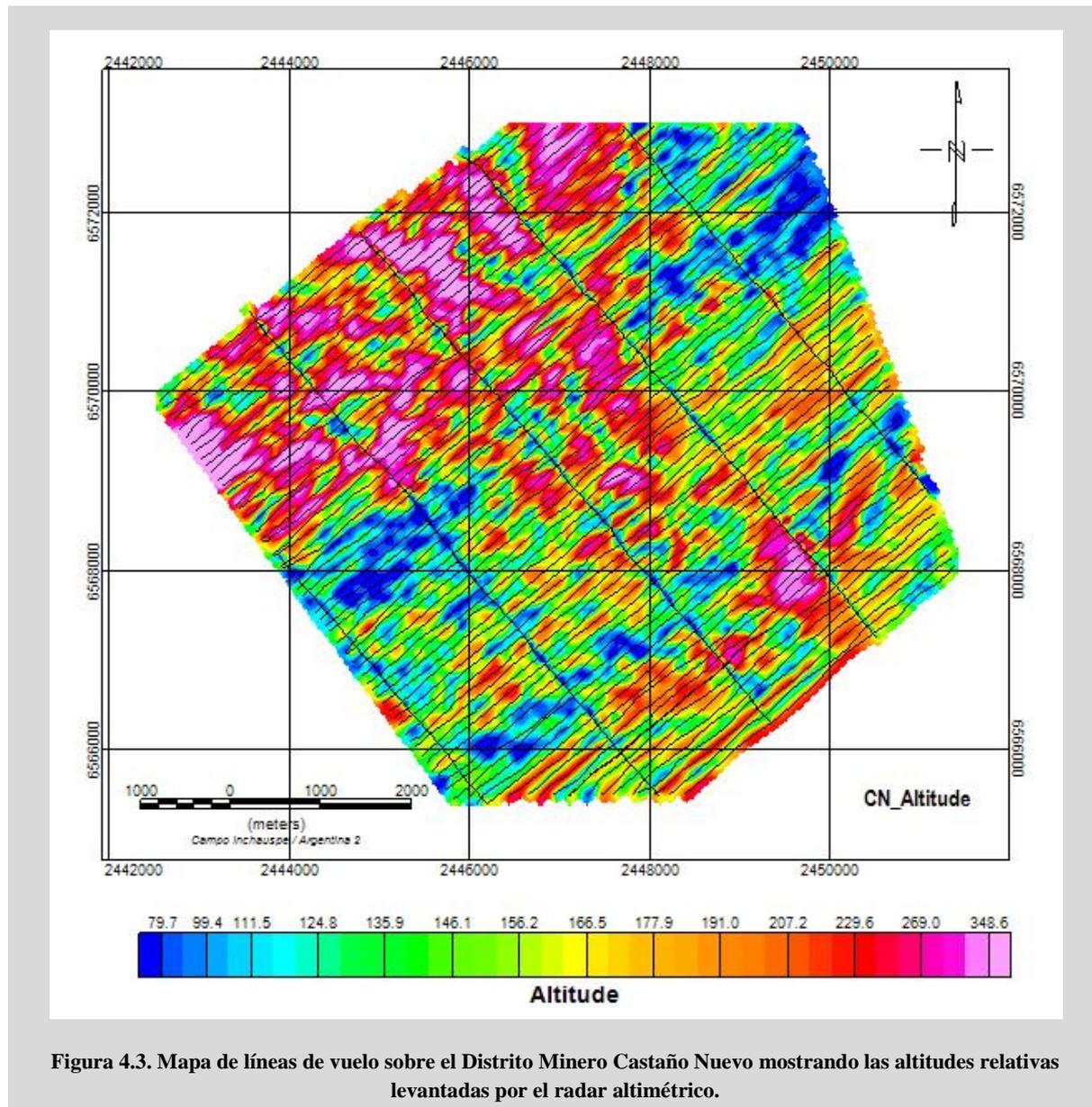


Figura 4.2. Magnetometría Terrestre. Tomada de informe interno de la empresa Tenke Mining Corp (2005).

4.3. Metodología

Los resultados mostrados en el presente capítulo provienen del reprocesamiento e interpretación de los datos obtenidos a partir del levantamiento aéromagnético y radiométrico en el sector que abarca el Distrito Minero Castaño Nuevo por la empresa Geodatos S.A.I.C. Se relevó una distancia total de 504 km, con líneas de producción de dirección N35°E separadas nominalmente 200 m entre sí y líneas de control cada 2000 m de dirección N55°O. Se cubrió una superficie de 8 km por 7 km aproximadamente (Figura 4.3). La siguiente información técnica acerca de los vuelos y el equipo fue tomada del informe proporcionado por la empresa Geodatos S.A.I.C. a la compañía *Troy Resources Limited*.



El equipo se instaló en un helicóptero Alluette Eurocopter AS350 B3, matrícula LVALC operado por Helicópteros Marinos (Figura 4.4), además se contó con equipamiento de base para efectuar correcciones. El equipo consistió en los siguientes elementos:

- Magnetómetro de campo de vapores de Cesio marca Scintrex modelo CS-3 de precisión 0,001 nT y razón de muestreo de 0,1 s.
- Magnetómetro estación base de vapores de Cesio marca Scintrex modelo CS-3, incorporado con un sistema de control de vuelo New-Sense, el cual controla, monitorea y registra toda la operación geofísica. Este sistema está compuesto básicamente por:
 - Registro digital. Puertos de entrada análogo y digital son monitoreados 200 veces por segundo.
 - Display de navegación. Una pantalla gráfica proporciona al piloto la línea de vuelo en tiempo real e información de altitud y estado de los satélites GPS.

- Display de los datos geofísicos manejado por el operador. Además del gráfico de línea de vuelo, en la pantalla se puede ver el gráfico del Campo Magnético Total.
- Sistema GPS diferencial NOVATEL modelo 951R, 12 tarjetas de tiempo real (RTCM 104 de 12 canales), compuesto de una estación base y una estación móvil.
- Radar altímetro TERRA modelo TRI 3500/TRI 40, con una razón de muestreo de 0,1 s y precisión de 2% (2 metros por cada 100 metros de lectura).
- Un espectrómetro Radiations Solutions Inc, modelo RS-500, que permite efectuar un muestreo de una lectura por segundo.



Figura 4.4. Aeronave utilizada para el relevamiento en el Distrito Minero Castaño Nuevo.

Los sensores usados en el vuelo se instalaron en un “aguijón” (*stinger*) montado en la base del helicóptero. Los datos de terreno se registraron en formato digital en la estación base y en el sistema de adquisición (helicóptero). En la estación base se registró la variación del campo magnético y los parámetros GPS necesarios para efectuar una corrección de GPS diferencial sobre los datos de vuelo, a una tasa de muestreo de 1 segundo.

El trabajo se inició con vuelos de compensación del sistema magnético y vuelos de calibración de alturas. Los vuelos de compensación del sistema de adquisición de datos magnéticos consisten en la

determinación de la influencia del avión en la medición de la intensidad del campo magnético total. Con este propósito se efectúan maniobras de exageración de los movimientos del avión en las direcciones de vuelo, con lo que se obtiene la información de corrección para compensar dicho efecto de la aeronave en las mediciones magnéticas de Campo Total. Los vuelos de calibración para los datos radiométricos se realizaron sobre una línea predeterminada a diferentes alturas: 100, 200, 300, 400, 500, 700 y 1000 pies, obteniendo así los parámetros necesarios para la corrección de altura de los datos radiométricos. Además, se efectuaron vuelos a las alturas de 8000, 7000, 6000 y 5000 pies utilizados para la corrección de radiación cósmica. Al iniciar y finalizar cada vuelo se midió con el espectrómetro en tierra durante 3 minutos, seguido de mediciones por 2 minutos con un equipo de barras de Tungsteno y 2% de Torio y 3 minutos sin el equipo de barras mencionado, como prueba de control del espectrómetro.

Los datos obtenidos en el sistema de adquisición montado en el helicóptero corresponden al Campo Magnético Total, coordenadas GPS, lectura del radar altímetro (precisión ± 3 pies) y datos de radiación gamma obtenidos con el espectrómetro. La tasa de muestreo del magnetómetro fue de 13 datos por segundo, mientras que la del GPS y espectrómetro fue de una medida cada 1 segundo. El programa de adquisición de datos interpola internamente las coordenadas para entregar la ubicación de cada lectura del Campo Magnético. La estación base se localizó en un helipuerto en inmediaciones de la Mina Casoso.

La información generada en terreno se ordenó en una base de datos digital. El pre-procesamiento de la información incluyó los siguientes pasos:

1. Proceso de GPS diferencial para corregir la posición GPS del helicóptero, reduciendo la envolvente de error en la posición a valores inferiores a 10 m.

2. Edición de los datos magnéticos de campo y estación base para eliminar datos defectuosos producto de ruidos ambientales y señales eléctricas (*spikes*). Para ello se utilizaron las rutinas de edición, interpolación y filtrado no lineal.

3. Corrección de la variación diurna del campo magnético terrestre, descontando el valor de la estación base a la observación de campo sobre las líneas de producción, en tiempos sincrónicos.

4. Por otra parte, se aplicaron las reducciones del IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) que provee los promedios de la variación esperada en el Campo Magnético de modo tal de establecer anomalías. El IGRF es publicado cada 5 años por la IAGA (*International Association of Geomagnetism and Aeronomy*). Los coeficientes del IGRF se encuentran en la siguiente dirección: <http://www.iaga-aiga.org/products-services/>.

5. Corrección de los datos de la radiación gamma proveniente de los minerales radiactivos K, U y Th. El procesamiento de los datos consistió en corregir el efecto Compton, la atenuación por altura de vuelo y el efecto de radiación cósmica. Para corregir dichos efectos se hicieron vuelos a varias alturas sobre el mar (para corregir el efecto de radiación cósmica) y vuelos a varias alturas sobre una misma línea en tierra para corregir el efecto de variación de altura. Asimismo, al final de cada vuelo se realizó

la corrección de Radón.

El tratamiento de la base de datos generada y corregida, se efectuó mediante el empleo del *software* OASIS-MONTAJ, versión 8.4, Geosoft®. Tanto para los datos magnéticos como los radiométricos, se utilizó el método de interpolación de mínima curvatura (Briggs, 1974).

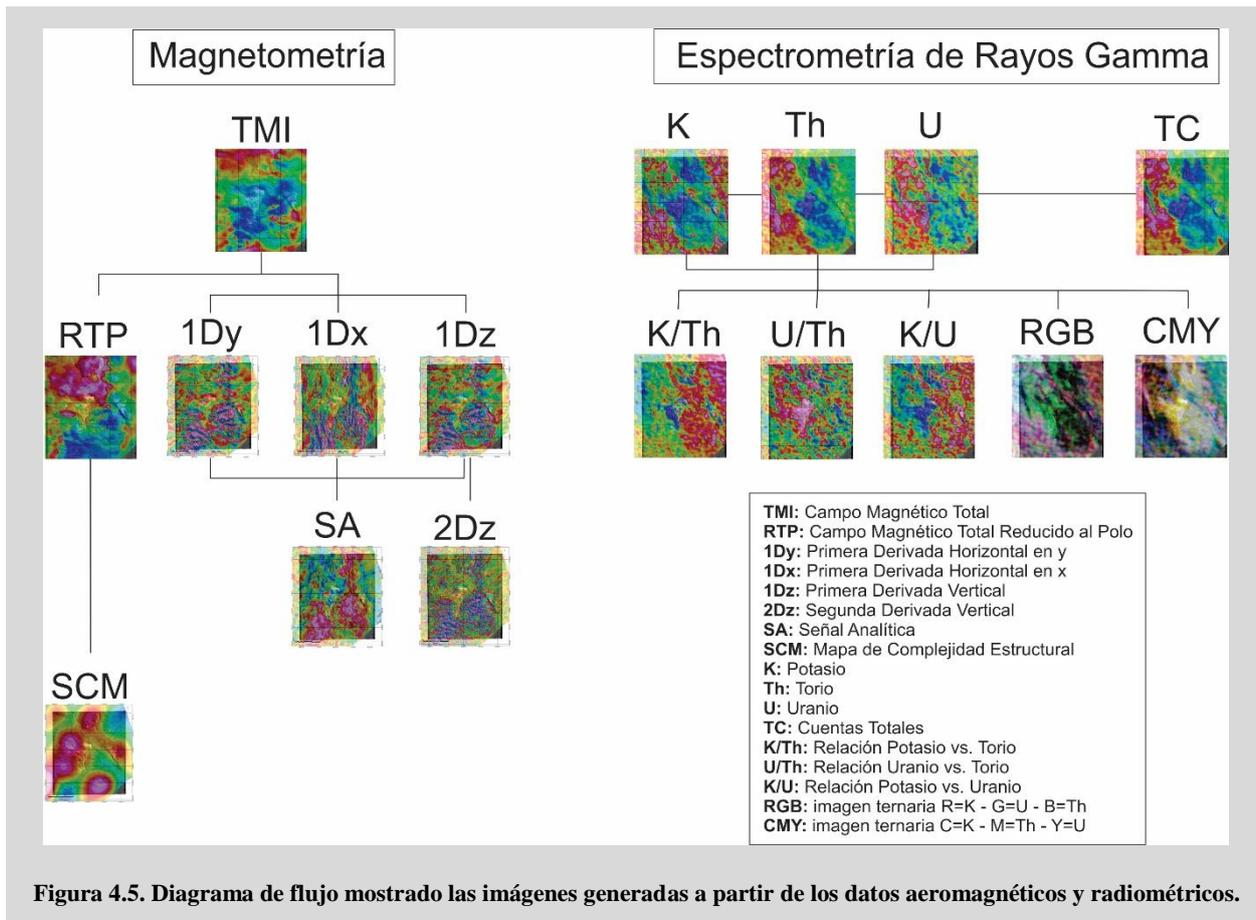
4.4. Resultados

La información obtenida y corregida fue procesada aplicando diferentes algoritmos y herramientas. En la figura 4.5 se muestra, mediante un diagrama de flujo, los procesamientos efectuados y la secuencia de imágenes generadas y re-procesadas.

4.4.1. Procesamiento de datos magnéticos

El procesamiento de los datos aeromagnéticos se ajustó por medio de una técnica de interpolación generando plantillas XYZ (*grids*). La aplicación del algoritmo de mínima curvatura (Briggs, 1974) se efectuó utilizando un valor de celda unidad de 30 m, que representa 1/6 del espaciado entre las líneas de vuelo, y se encuentra dentro del rango establecido por Vasconcelos et al. (1994) y Gunn (1998), quienes sugieren celdas cuyos valores representen entre 1/4 y 1/8 del espaciado entre líneas de vuelo.

La información magnética se volcó en mapas de Campo Magnético Total, Campo Magnético Reducido al Polo, Primera y Segunda Derivada Vertical (z) del Campo Magnético, Derivadas Horizontales (en x e y) y Señal Analítica. Asimismo, se procedió a tratamientos específicos para resaltar lineamientos y rasgos estructurales importantes. A partir del análisis de las imágenes generadas se establecieron dominios litomagnéticos, definidos como zonas con señal magnética uniforme dada por la intensidad y el gradiente del campo magnético (Peñalva et al., 2008), y se delimitaron estructuras a partir de la identificación de discontinuidades en la respuesta magnética, estableciendo orientaciones predominantes y sectores con mayor densidad de fracturas.



4.4.1.1. Campo Magnético Total

El mapa de Campo Magnético Total se obtiene mediante un grillado regular de los datos magnéticos obtenidos a lo largo de cada una de las líneas de vuelo. El algoritmo de grillado usado corresponde a método de mínima curvatura (Briggs, 1974) y ponderaciones proporcionales al inverso de las distancias (Reeves, 2005). Se utilizó una escala de colores donde los rojos intensos a rosas denotan máximos en la intensidad del campo, con una transición gradual a los azules que indican bajos magnéticos (Figura 4.6.a).

Al superponer el mapa de Campo Magnético Total con la imagen GeoEye (Figura 4.6.b) se observa, en el sector central y hacia el sur (donde afloran las rocas piroclásticas con intensa alteración hidrotermal de la Unidad I y Unidad II y parte de los afloramientos de la Unidad III) un bajo del Campo Magnético Total. Por otro lado, se identifica un alto magnético en el sector norte de la imagen, coincidente con afloramientos de la Unidad I donde se identificó la presencia de magnetita rellenando las fracturas y en cúmulos. Este hecho podría explicar el alto magnético identificado y el alto contraste con las zonas más alteradas.

En cuanto a las estructuras, si bien se identifican lineamientos con orientaciones similares a las mapeadas en terreno, la disposición de los mismos se observa desplazada (Figura 4.6.b).

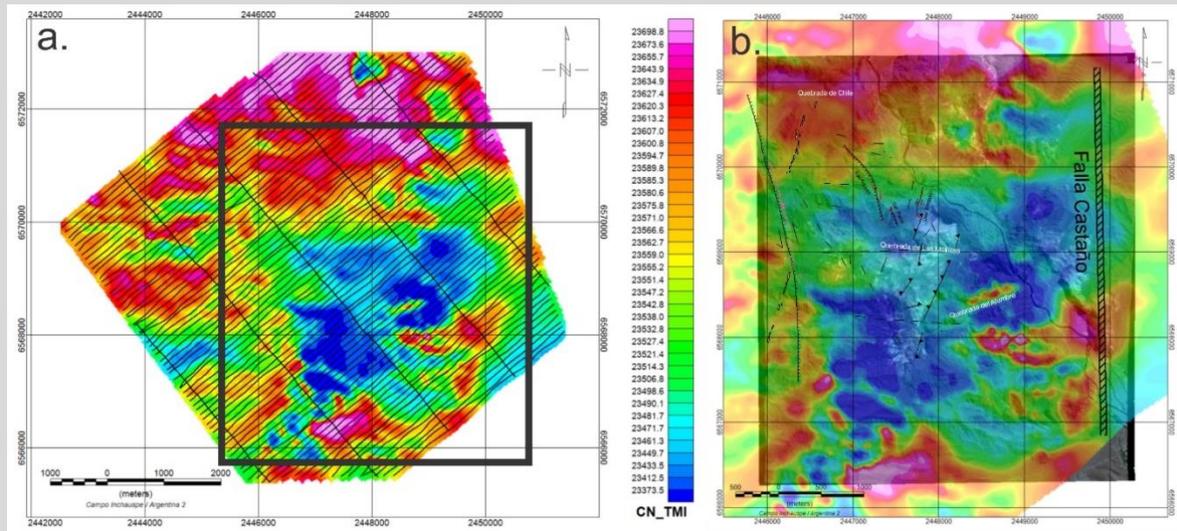


Figura 4.6.a. Mapa de Campo Magnético Total obtenido durante el relevamiento aeromagnético, el recuadro negro marca la localización de la imagen 4.6.b. **b.** Detalle del sector del Distrito Minero Castaño Nuevo, superponiendo la imagen de Campo Magnético Total sobre imagen satelital Geoeye. Se superponen además las estructuras mapeadas presentadas en el Capítulo 3 a modo de referencia.

4.4.1.2. Campo Magnético Total Reducido al Polo

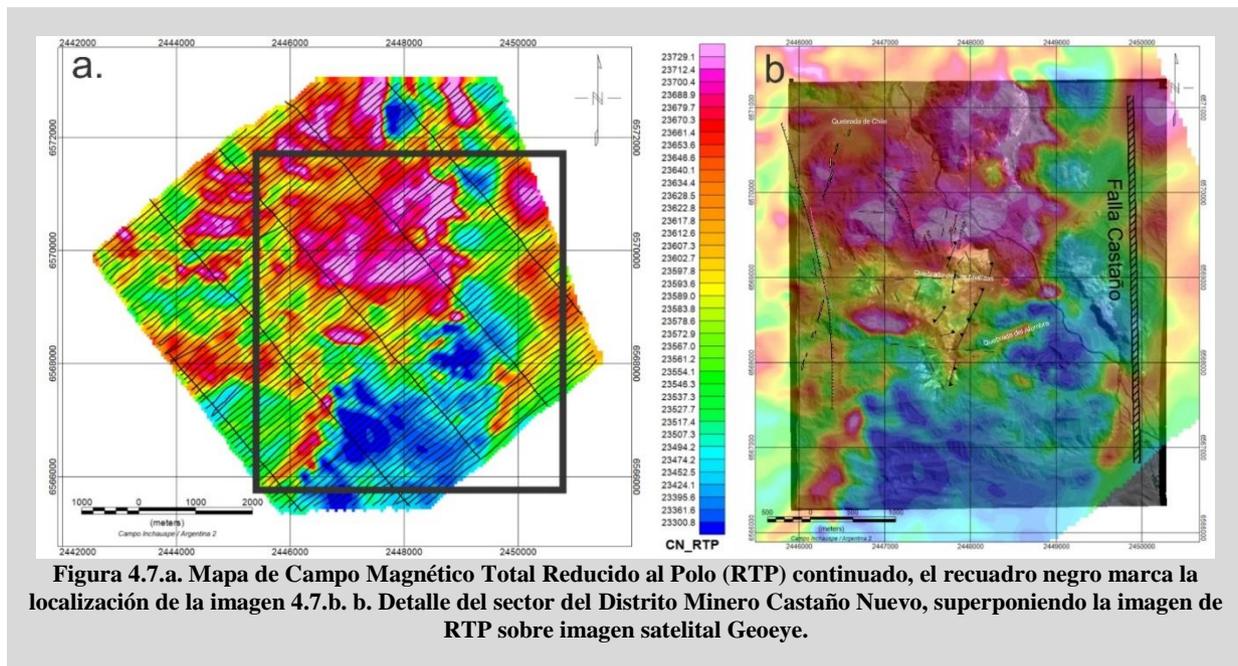
La operación numérica de reducción al polo transforma las anomalías a sus equivalentes como si hubieran sido observadas en el polo magnético norte. Esta transformación simula un cambio de la inclinación magnética a la vertical (Baranov, 1964). Este tipo de filtro simplifica la interpretación y visualización de las anomalías (Milligan y Gunn, 1997).

La reducción al polo se aplica para compensar el desplazamiento de la anomalía verdadera a la posición original sobre el causante de dicha anomalía, la inclinación y la declinación de los datos magnéticos se vuelven a calcular, de manera que las anomalías magnéticas aparecerán como lo harían si se encontraran en el polo norte magnético. La inclinación magnética en el sector de Castaño Nuevo es de $-31,10^\circ$, con una declinación de $-0,36^\circ$. Dicha inclinación genera un desplazamiento en la localización de las anomalías con respecto a las fuentes magnéticas, dando una errónea disposición de los cuerpos y estructuras.

La aplicación del algoritmo para el cálculo del Campo Magnético Reducido al Polo (RTP) sobre la imagen original del Campo Magnético Total, generó un nuevo mapa que se muestra en la Figura 4.7.a. Al contrastar dicho mapa con la imagen satelital (Figura 4.7.b) se puede apreciar una correspondencia más clara entre la distribución de las diferentes unidades litológicas y las estructuras principales mapeadas, enfatizándose algunas anomalías que no se apreciaban en el mapa original (Figura 4.6.b). El desplazamiento de la anomalía negativa hacia el sur, donde aflora una sucesión de rocas piroclásticas riodacíticas estratificadas (Unidad III), coincide de manera exacta con los límites entre unidades mapeadas (ver Figura 3.25, en el Capítulo 3). Por otro lado, la anomalía positiva se restringe a las

andesitas de la Unidad I, y se extiende levemente a los sectores alterados de esta unidad con una paulatina disminución de la intensidad hacia la porción central del área de trabajo donde aflora la secuencia piroclástica de la Unidad II.

Con respecto a las estructuras, la nueva distribución de las anomalías mostradas con el filtro de RTP, permite identificar claramente las fallas mapeadas en superficie, particularmente las fallas inversas y de rumbo de escala distrital (Figura 4.7.b), que desplazan las unidades litológicas descritas. No obstante, las estructuras que contienen las vetas de cuarzo/adularia, así como los diques riódacíticos, no muestran ninguna expresión en la imagen de RTP.



4.4.1.1. Señal Analítica del Campo Magnético Total

El concepto de señal analítica (SA) o energía envolvente de las anomalías magnéticas fue introducido por Nabighian (1972). Esta técnica, permite resaltar las anomalías magnéticas producidas por discontinuidades geológicas de mediana a corta longitud de onda, es decir que es útil para la localización de los bordes de un cuerpo o contactos entre unidades de diferentes características magnéticas. Esta representación actúa como filtro paso alto, produciendo máximos sobre los contactos magnéticos, independiente de la dirección de magnetización (inducida o remanente) de la fuente, siendo de utilidad también para identificar estructuras (Nabighian 1972, 1974; Salem y Smith, 2005).

En el mapa generado para el Distrito Minero Castaño Nuevo (Figura 4.8.a), pueden observarse contrastes claros en el sector central. En la figura 4.8.b se aprecia el contacto entre los sectores de alteración intensa y las unidades carentes de alteración hidrotermal. En este mapa se observa la distribución de las anomalías con una aparente disposición NNE-SSO, coincidente con el rumbo

definido para la secuencia volcánico-piroclástica. Se destacan también orientaciones NE-SO, coincidentes con las fallas inversas que levantan a las unidades más antiguas y rasgos E-O (Figura 4.8.b).

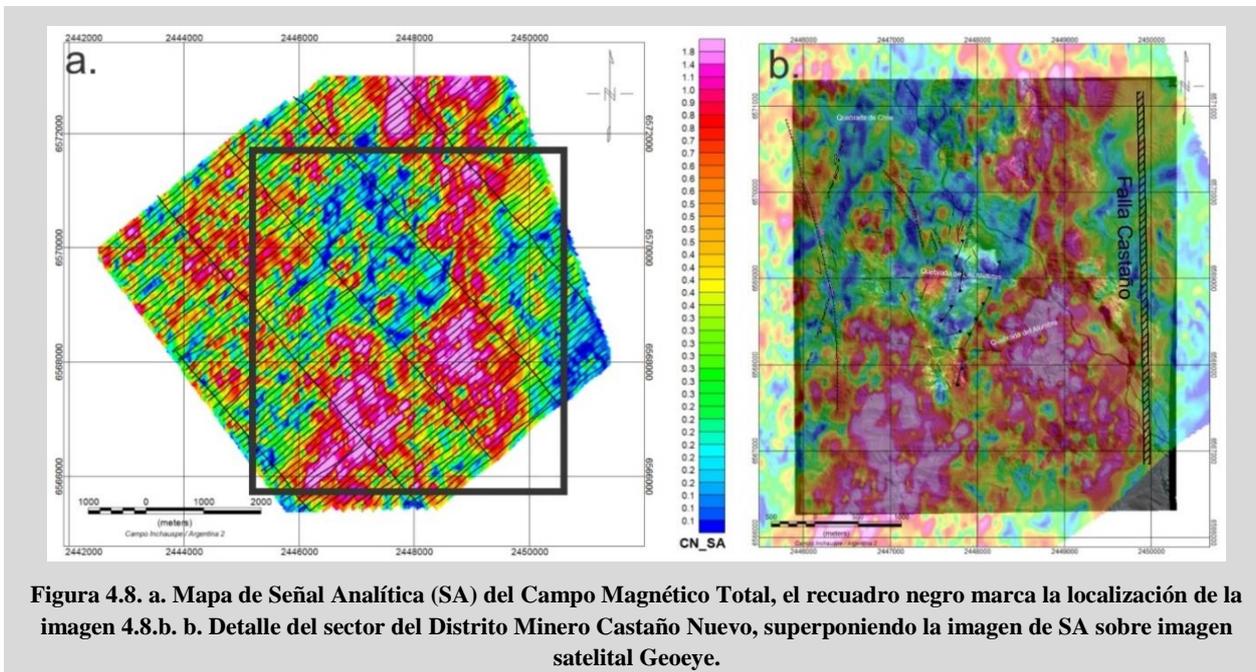


Figura 4.8. a. Mapa de Señal Analítica (SA) del Campo Magnético Total, el recuadro negro marca la localización de la imagen 4.8.b. b. Detalle del sector del Distrito Minero Castaño Nuevo, superponiendo la imagen de SA sobre imagen satelital Geoeye.

4.4.1.2. Derivada vertical del Campo Magnético Total

Esta representación tiene el propósito de acentuar las fuentes magnéticas más superficiales en los datos, incrementando su respuesta (Milligan y Gunn, 1997). Diversas derivadas verticales del campo magnético pueden ser calculadas multiplicando el espectro de amplitud del campo por un factor de forma:

$$VD = \frac{1}{n} \left[(\mu^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} \right]^n$$

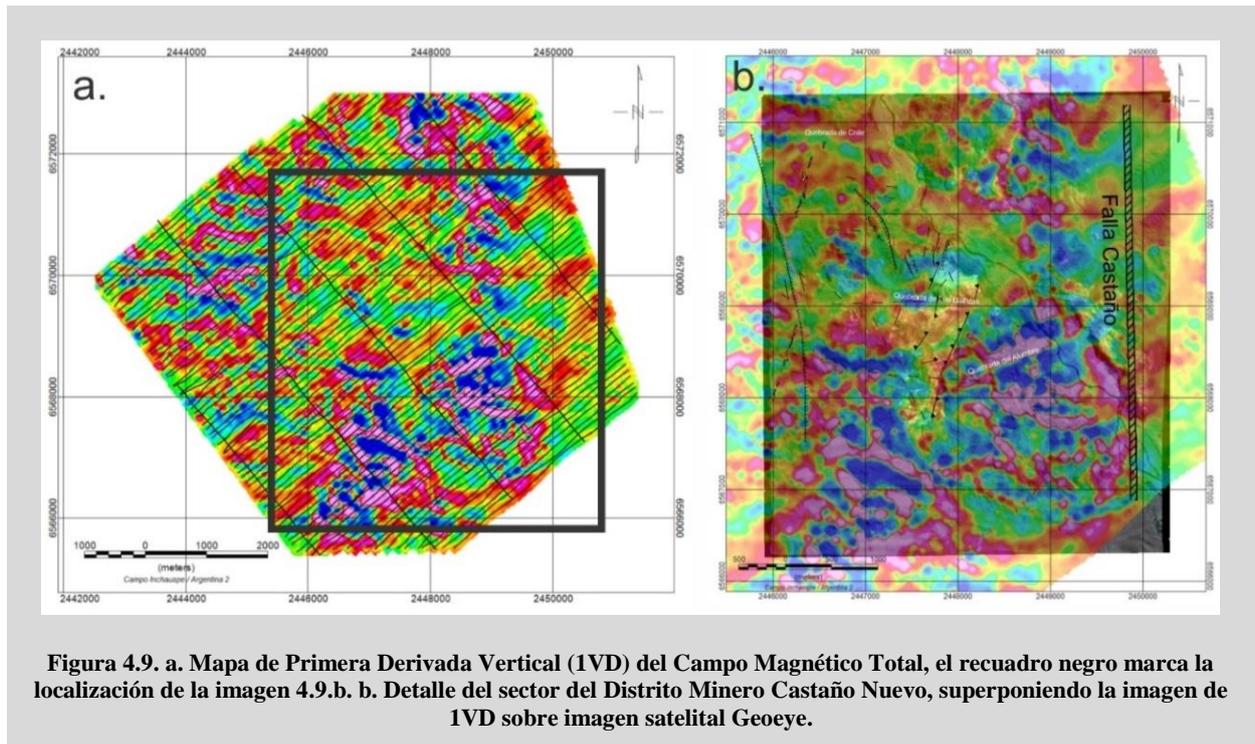
Dónde: VD: es la derivada vertical, n es el orden de la derivada vertical. μ y v : son los números de onda según la dirección x e y.

La primera derivada vertical (gradiente vertical), es físicamente equivalente a medir el campo magnético simultáneamente en dos puntos verticales, uno por arriba del otro, restando los respectivos valores y dividiendo el resultado por la separación vertical entre ambos puntos de medición. Tiene el efecto de mejorar la nitidez de las anomalías, y permite una ubicación más exacta del origen de ejes y límites de estas. La segunda derivada vertical, es el gradiente vertical de la primera derivada y así sucesivamente (Milligan y Gunn, 1977). Para mejorar las anomalías locales y delinear los bordes de los cuerpos anómalos en los datos, se calcula una segunda derivada vertical. Es una herramienta de interpretación de gran alcance que se utiliza para ayudar en la delimitación de las fuentes causales, definición de discontinuidades y su relación con la geología (Nabighian, 1984).

La aplicación del proceso de derivada elimina los efectos regionales de gran longitud de onda y resuelve los efectos de anomalías someras. La segunda derivada vertical tiene mayor poder de resolución

que la primera derivada vertical, pero requiere para su aplicación de datos de mayor calidad, ya que su mayor realce de altas frecuencias resulta en mayor realce de ruido (Gunn et al., 1997).

Este procesamiento aplicado sobre el Campo Magnético Total del sector del Distrito Minero Castaño Nuevo permite ajustar aún más los contactos entre las diferentes unidades. Para el caso de la primera derivada (Figura 4.9.a) se definen al sur, lineamientos NE y N-S que ponen en contacto dos unidades con características magnéticas bien diferenciadas (Figura 4.9.b).



Al aplicar la segunda derivada sobre esta imagen, el contraste queda aún más evidenciado, pudiendo establecerse contactos claros con cambios en el rumbo de NE a E-O. Por otro lado, se aprecia una estructuración E-O clara, así como también una incipiente tendencia NO de algunos lineamientos (Figura 4.10. a y b).

4.4.1.1. Mapa de Complejidad Estructural

La información aeromagnética contiene valores que varían en diferentes órdenes de magnitud para cada rasgo geológico, permitiendo, entre otras cosas, efectuar un análisis de Complejidad Estructural (Holden et al., 2010). Esta metodología consiste en dos grandes pasos: identificación de rasgos lineales asociando discontinuidades dentro de la población de datos y el posterior análisis de la asociación espacial entre dichos rasgos (Holden et al., 2008). Para llevar adelante dicho proceso Holden et al. (2012) proponen las siguientes acciones a desarrollar en el orden enumerado:

1. Realce de zonas de discontinuidad magnética mediante el análisis textural de las variaciones magnéticas locales. Para esto se aplica un filtro de desvío estándar (STD), ya que las regiones con discontinuidades exhiben grandes valores de este parámetro.
2. Identificación de rasgos lineales con continuidad lateral que marquen discontinuidades magnéticas, utilizando la técnica de simetría de fase (Kovesi, 1997). Esta metodología facilita la identificación de crestas y valles.
3. Vectorización de cada segmento que compone a las líneas generadas en el paso anterior. Esto se logra a partir de una imagen binaria, en la que se identifican los rasgos lineales en blanco y el fondo en negro. Esta imagen es procesada y se generan líneas coincidentes con los ejes de los rasgos identificados mediante la operación de “esqueletización” propuesta por Lam et al. (1992).

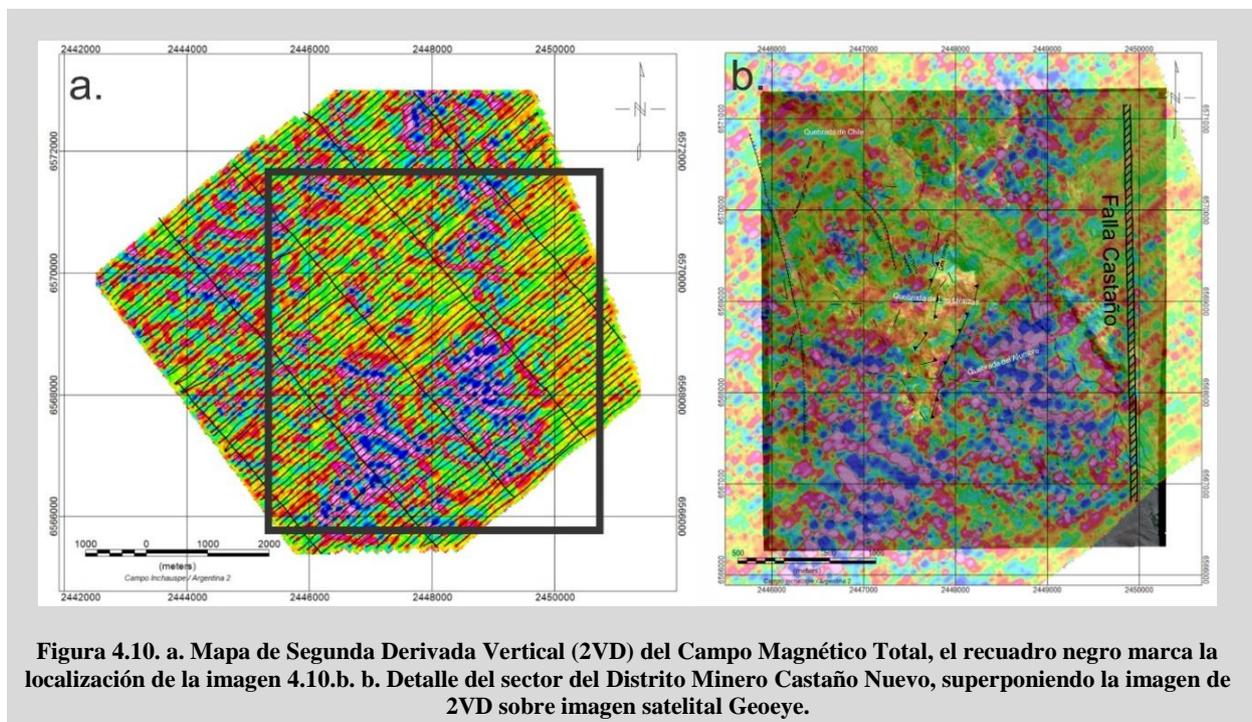


Figura 4.10. a. Mapa de Segunda Derivada Vertical (2VD) del Campo Magnético Total, el recuadro negro marca la localización de la imagen 4.10.b. b. Detalle del sector del Distrito Minero Castaño Nuevo, superponiendo la imagen de 2VD sobre imagen satelital Geoeye.

El sistema CET *Grid Analysis* (Holden et al., 2012) es un algoritmo desarrollado por la Universidad de Western Australia que simplifica el proceso antes detallado. Esta función analiza la textura de una imagen y detecta áreas de complejidad estructural, permitiendo la localización de sectores favorables para la ocurrencia de depósitos de interés económico. Constituye un módulo adicionado al *software* Oasis Montaj que se aplica sobre la imagen generada de Campo Magnético Total Reducido al Polo (Geosoft®, 2012). Mediante su empleo se cumple con los tres lineamientos necesarios, anteriormente expuestos, y se construye un mapa de Complejidad Estructural.

En la figura 4.11.a se observan las imágenes generadas durante cada paso realizado para la

implementación del algoritmo sobre el Distrito Minero Castaño Nuevo. El primer paso de cálculo del desvío estándar para el análisis textural sobre la imagen de RTP se desarrolló con un tamaño de celda de 192 m, similar al espaciado de las líneas de vuelo, de acuerdo a lo sugerido por Holden et al. (2012). Para el segundo paso, se realizó el procesamiento de simetría de fase con un valor de longitud de onda mínimo de 120 m y un valor de “robustez de simetría” igual a 3, se consideraron todos los ángulos y rasgos tanto positivos como negativos. Luego se procedió a la vectorización de las líneas generadas y finalmente se identificaron los posibles puntos de intersección entre estructuras (considerando un radio de 50 m y un ángulo de desvío de 10°).

Como puede observarse en la imagen finalmente obtenida (4.11.b y c), los sectores con mayor complejidad estructural se localizan siguiendo una tendencia NNE, y se asocian fundamentalmente a los afloramientos de la Unidad I y en menor medida a la Unidad II. Hacia el sur en la imagen se identifica otro sector de complejidad estructural, pero en este caso se trata de una quebrada amplia con relleno de abanicos cuaternarios.

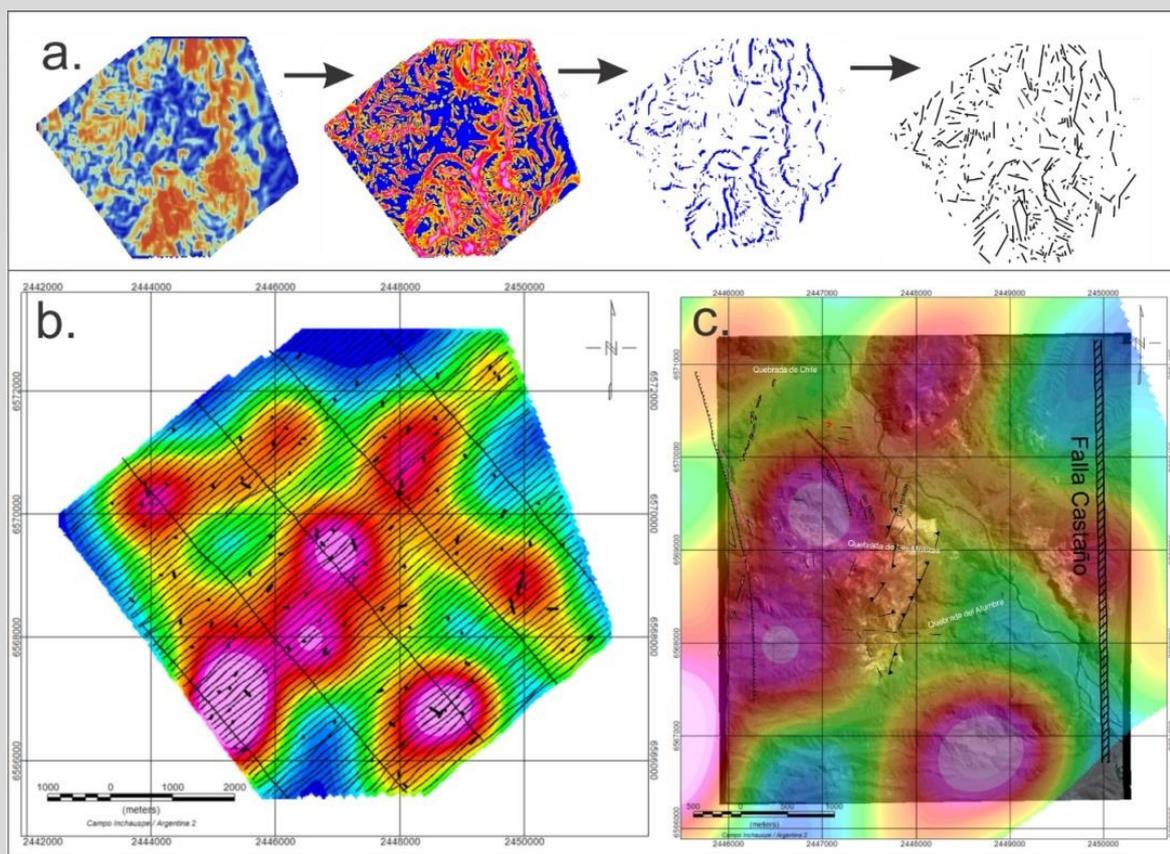


Figura 4.11. a. Imágenes generadas durante el procesamiento del mapa de RTP del sector estudiado. **b.** Mapa de Complejidad Estructural generado a partir del Mapa de Campo Magnético Total Reducido al Polo, aplicando el algoritmo del CET Grid Analysis. **c.** Mapa de Complejidad Estructural sobre imagen Geoeye del Distrito Minero Castaño Nuevo. Se identifican las estructuras mapeadas y presentadas en el Capítulo 3 a modo de referencia.

4.4.2. Procesamiento de Datos Radiométricos

Este método espectrométrico está basado en la detección de la radiación gamma emitida debido a los procesos de estabilización del núcleo de elementos radiactivos (Minty, 1997). La información radiométrica se muestra en mapas de Radiaciones K, U y Th, Cuentas Totales, y Razones K/U, K/Th y U/Th. También se generaron imágenes ternarias pseudocolor RGB (*Red, Green, Blue*) y CMY (*Cyan, Magenta, Yellow*).

En general, los mapas muestran dominios con altos, moderados y bajos contenidos de cada elemento. Como puede observarse, hay una clara diferenciación entre las rocas aflorantes al norte (lavas andesíticas, Unidad I) y las localizadas en el sector centro-sur, donde se disponen secuencias piroclásticas alteradas (Unidad II) y rocas volcánicas frescas (Unidad III).

Este hecho se muestra claramente en las imágenes de K y Th (Figuras 4.12 a y b), mientras que en la de U la diferenciación es menos evidente (Figura 4.12c). En cuanto a la estructura, en los tres mapas de elementos se identifica la falla NNO localizada en el sector oeste del área de estudio, con relleno de calcita. En particular, en el mapa de contenido de Th los contrastes son más notorios, permitiendo correlacionarlos con la mayoría de las estructuras mapeadas e identificadas en el Capítulo 3. En el mapa de cuentas totales (Figura 4.13) todos los rasgos identificados en los mapas de cada elemento se intensifican, siendo más evidente la traza de la estructura NNO con relleno de calcita.

En los mapas de cocientes entre elementos (Figuras 4.12. d, e y f) se discriminan mejor los sectores que presentan alteración hidrotermal, en la porción central del área de estudio, donde predominan los afloramientos de la Unidad II. Allí, la destrucción casi completa de la mayoría de los minerales originales genera una anomalía negativa de K y, por consiguiente, los mapas de K/Th y K/U reflejan una tendencia similar (Figuras 4.12. d y e). Por el contrario, en el sector SE, donde afloran las rocas piroclásticas de la Unidad III, las cuales no presentan alteración hidrotermal, la respuesta arrojada en los mapas de cada elemento son similares a las registradas en los sectores más alterados, mientras que los mapas de cocientes muestran comportamientos opuestos. Las estructuras se delinear con claridad habiendo una correspondencia casi exacta entre las estructuras NE mapeadas en campo y las que se distinguen en los mapas de cocientes.

Finalmente, los mapas ternarios superpuestos sobre la imagen Geoeye del Distrito Minero Castaño Nuevo, evidencian sectores donde los 3 radioelementos se encuentran presentes en niveles altos. Dichos sectores se localizan en el norte-centro de la imagen y tienen una correspondencia con los afloramientos de la Unidad I. Tanto en la imagen RGB (Figura 4.14.a) como en la imagen CMY (Figura 4.14.b) se pueden delimitar los sectores con fuerte alteración coincidentes con los afloramientos de la Unidad II (y parcialmente de la Unidad I). En ambas imágenes el único elemento que se registra en estos sectores es el U, estando prácticamente ausentes el K y el Th. En cuanto al sector más austral del área de estudio, se puede observar la escasa presencia de los 3 radioelementos por igual. Este sector

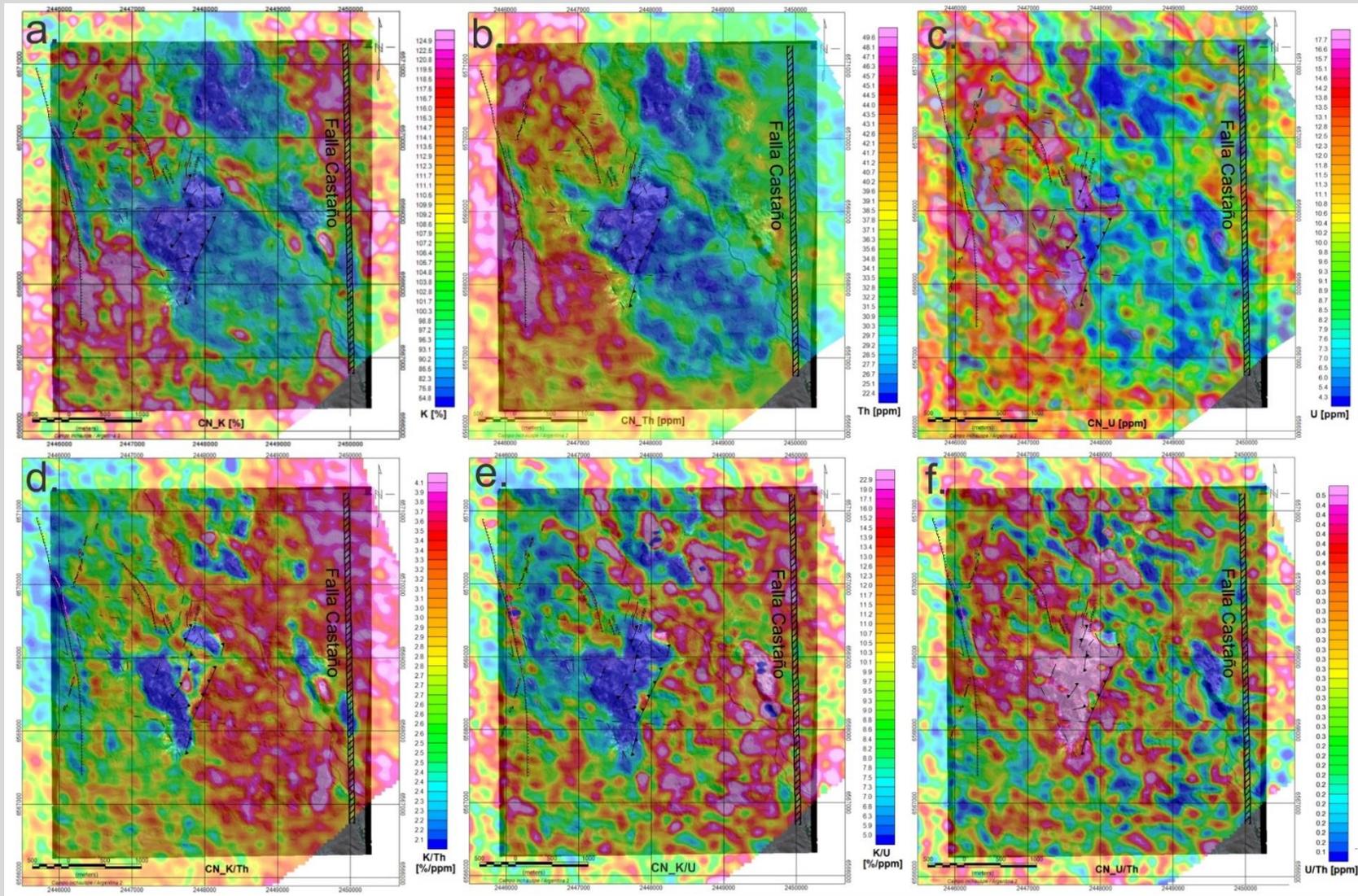
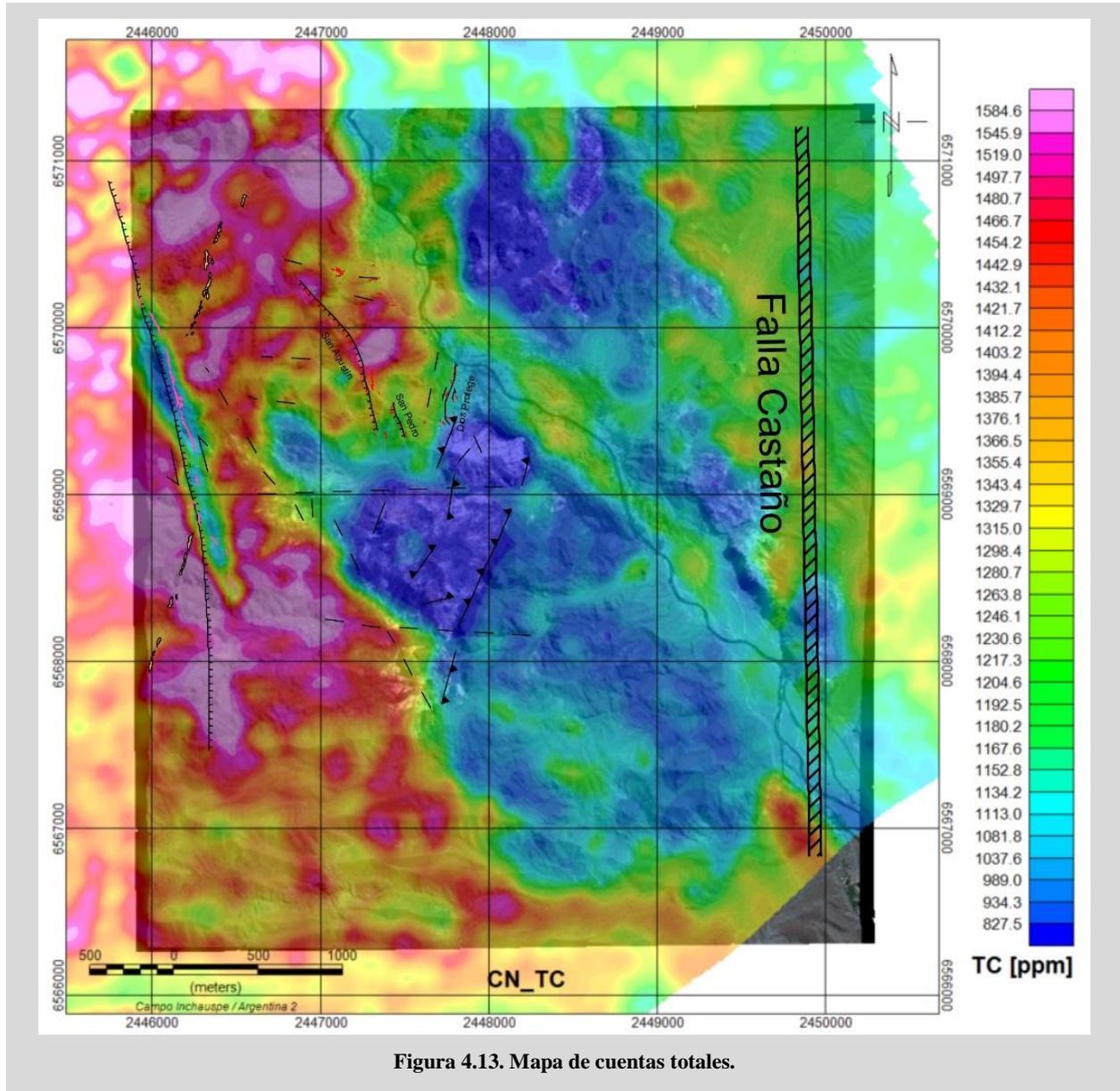


Figura 4.12. Mapas radiométricos de concentraciones de: a. Potasio. b. Torio. c. Uranio. Mapas de cocientes entre elementos: d. K/Th. e. K/U. f. U/Th

corresponde a los afloramientos de la Unidad III, donde la alteración es escasa a nula. Posiblemente el efecto que se observa está relacionado con las proporciones relativas de los radioelementos con respecto a los sectores ubicados más al norte.



4.5. Discusión y Conclusiones

Los métodos geofísicos constituyen una herramienta muy útil en los comienzos de las etapas de prospección de un área con potencial económico. La aplicación de las diferentes metodologías es en función del tipo de depósito y de las rocas hospedantes del mismo, ya que el contraste entre ambos es el que incrementa las respuestas.

Los primeros trabajos llevados a cabo en el Distrito Minero Castaño Nuevo no pudieron ser correctamente evaluados ya que no se pudo acceder a los datos originales medidos en el campo, y las imágenes procesadas no mostraban una resolución adecuada como para arribar a una conclusión acertada. Sin embargo, en base a las conclusiones establecidas por Delendatti (2005) en su tesis doctoral y a los nuevos resultados aportados por los vuelos aeromagnéticos, no es posible aseverar la presencia de un cuerpo en profundidad. Los resultados obtenidos a partir de los diversos procesamientos de los datos magnéticos podrían ser producto del contraste entre las zonas de intensa alteración hidrotermal y aquellas no afectadas por dicho proceso. De todas maneras, no se descarta en forma concluyente la presencia de dicho cuerpo.

A partir del procesamiento de la información y la generación de las diferentes imágenes se determinaron tres dominios litomagnéticos representados en la Figura 4.15.a, sobre el mapa de Campo Magnético Total Reducido al Polo. En el sector norte, se delimitó el dominio litomagnético A, que está caracterizado por altos valores de intensidad del campo magnético y gradientes moderados a bajos. El dominio A se corresponde enteramente con la Unidad I definida en el Capítulo 3, conformada por rocas volcánicas de composición andesítica, que presenta contenidos homogéneos de magnetita en cúmulos dentro de la pasta de la roca y rellenando fracturas.

El dominio litomagnético B se localiza en el sector central del área de estudio, caracterizado por una intensidad y gradiente del campo magnético moderada. Este sector engloba a las rocas con mayor grado de alteración hidrotermal, que corresponden a una porción de andesitas (Unidad I) y a la totalidad de las rocas piroclásticas de la Unidad II, con diferentes grados de argilización y silicificación. Las propiedades originales de estas rocas se encuentran modificadas es por esto que, al analizar la distribución de los afloramientos de la Unidad I, las partes más frescas se corresponden con el dominio A, mientras que las más alteradas se incluyen en el dominio B.

Finalmente, el dominio litomagnético C está caracterizado por una intensidad del campo magnético baja asociada a un gradiente moderado a alto. Se asocia directamente con los afloramientos de la Unidad III, correspondientes a rocas piroclásticas de composición riódacítica, con escasa a nula alteración. Por otro lado, a diferencia de las volcanitas de la Unidad I, no se observa magnetita en cúmulos, así como tampoco se identifican fracturas rellenas con dicho mineral.

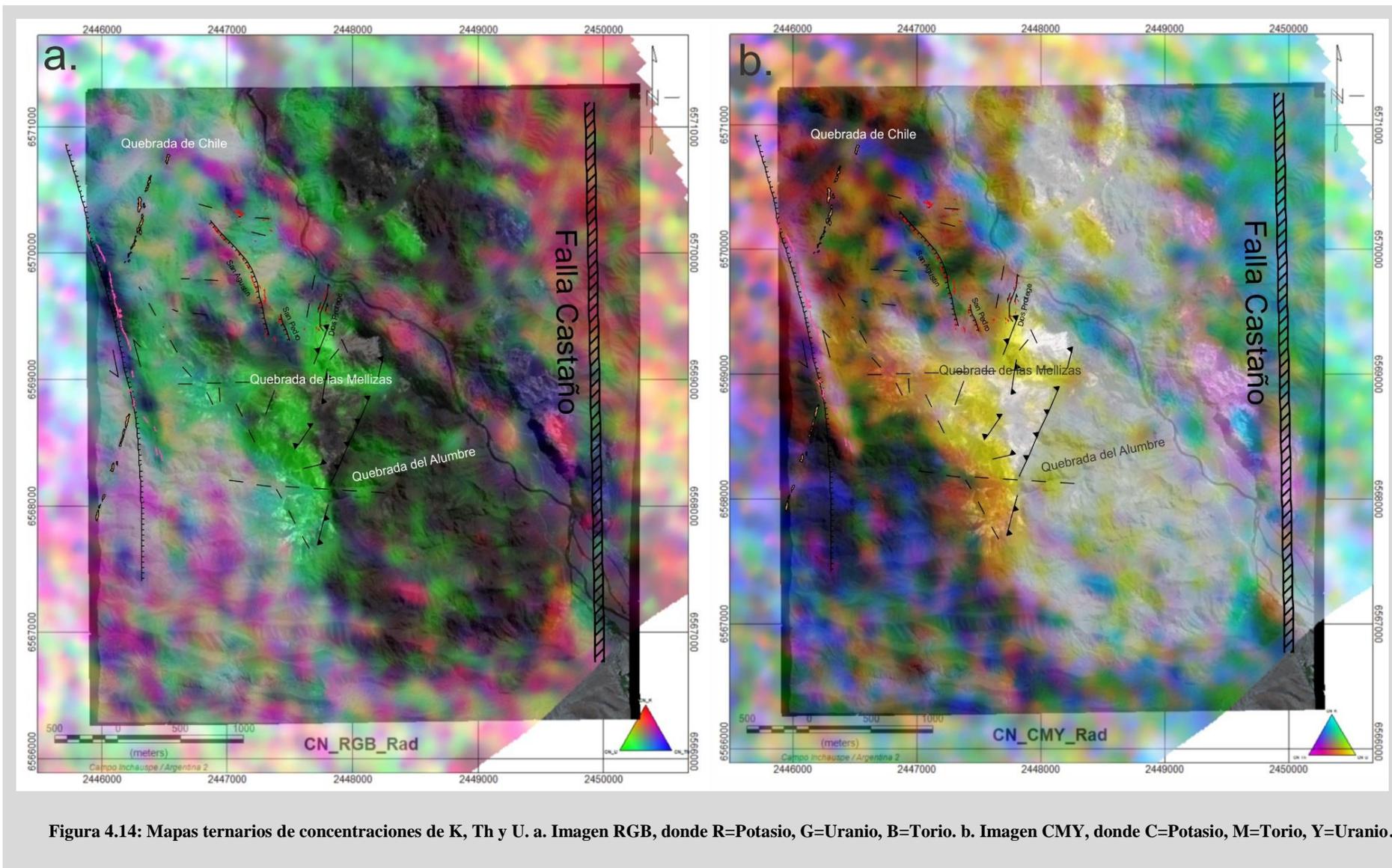


Figura 4.14: Mapas ternarios de concentraciones de K, Th y U. a. Imagen RGB, donde R=Potasio, G=Uranio, B=Torio. b. Imagen CMY, donde C=Potasio, M=Torio, Y=Uranio.

Los dominios litomagnéticos definidos muestran, además, una clara correspondencia en los mapas radiométricos. El dominio A presenta altos contenidos de K, Th y U, y cocientes moderados K/Th y K/U (Figura 4.12). El dominio B presenta bajos contenidos de K y Th, y altos de U, que se traduce en cocientes bajos K/Th y K/U, y alto U/Th. En cuanto al dominio C, los tres elementos radiométricos presentan concentraciones bajas respecto de los otros dominios, y cocientes moderados a altos (Figura 4.12). En los mapas ternarios RGB y CMY el dominio B es el que mejor queda evidenciado, debido a que sólo presenta contenidos de U (Figura 4.14).

En cuanto a las estructuras, se realizó una interpretación de lineamientos y fracturas menores que se presenta en la figura 4.15.b, donde se delinear los elementos interpretados superponiéndolos sobre una imagen de Señal Analítica del Distrito Minero Castaño Nuevo. En el diagrama de rosas se representan estas estructuras, y a partir del mismo puede establecerse que la dirección predominante de estos rasgos es NNE, coincidente con las fallas que ponen en contacto a las diferentes unidades, así como también con la fractura que contiene a la veta Dios Protege. En menor medida se destacan lineamientos ENE y ONO, que se corresponden con el resto de las estructuras mapeadas y presentadas en el Capítulo 3. En particular, se distingue una estructura ENE-OSO coincidente con la quebrada de las Mellizas, y la falla NO localizada en el borde occidental del área de estudio, que corresponde a la veta rellena con calcita, y que está delimitada como un sector anómalo en todas las imágenes generadas tanto magnéticas como radiométricas.

En cuanto al mapa de complejidad estructural generado, se puede establecer que la Unidad I contiene la mayoría de los sectores identificados como favorables para la circulación de fluidos, ya que se disponen los grandes cruces de estructuras del sector centro-norte del área. Este hecho es congruente con la distribución de los sistemas hidrotermales los cuales, en el caso de los vetiformes se restringen a la Unidad I, y los disseminados asociados a la fuerte alteración se limitan a las Unidades I y II con fuertes controles estructurales NO que se interceptan con otros NNE, y que sólo se identifican dentro de dichas unidades (ver Figura 3.25 del Capítulo 3).

La integración de los datos obtenidos durante los vuelos geofísicos permitió discriminar y clasificar las unidades litológicas en términos de características magnéticas y radiométricas, así como también permitió establecer sus contactos y estructuras que las afectan. El Distrito Minero Castaño Nuevo, si bien presenta una columna estratigráfica acotada, se compone de unidades con características específicas fácilmente detectables mediante metodologías indirectas como las detalladas en el presente capítulo. No obstante, la identificación de las estructuras mineralizadas correspondientes a las vetas de cuarzo-adularia no pudo ser efectuada a partir de los procesamientos realizados. Por otro lado, los sectores que presentan una fuerte alteración hidrotermal se distinguen de su entorno y es posible delimitarlos en todas las imágenes generadas.

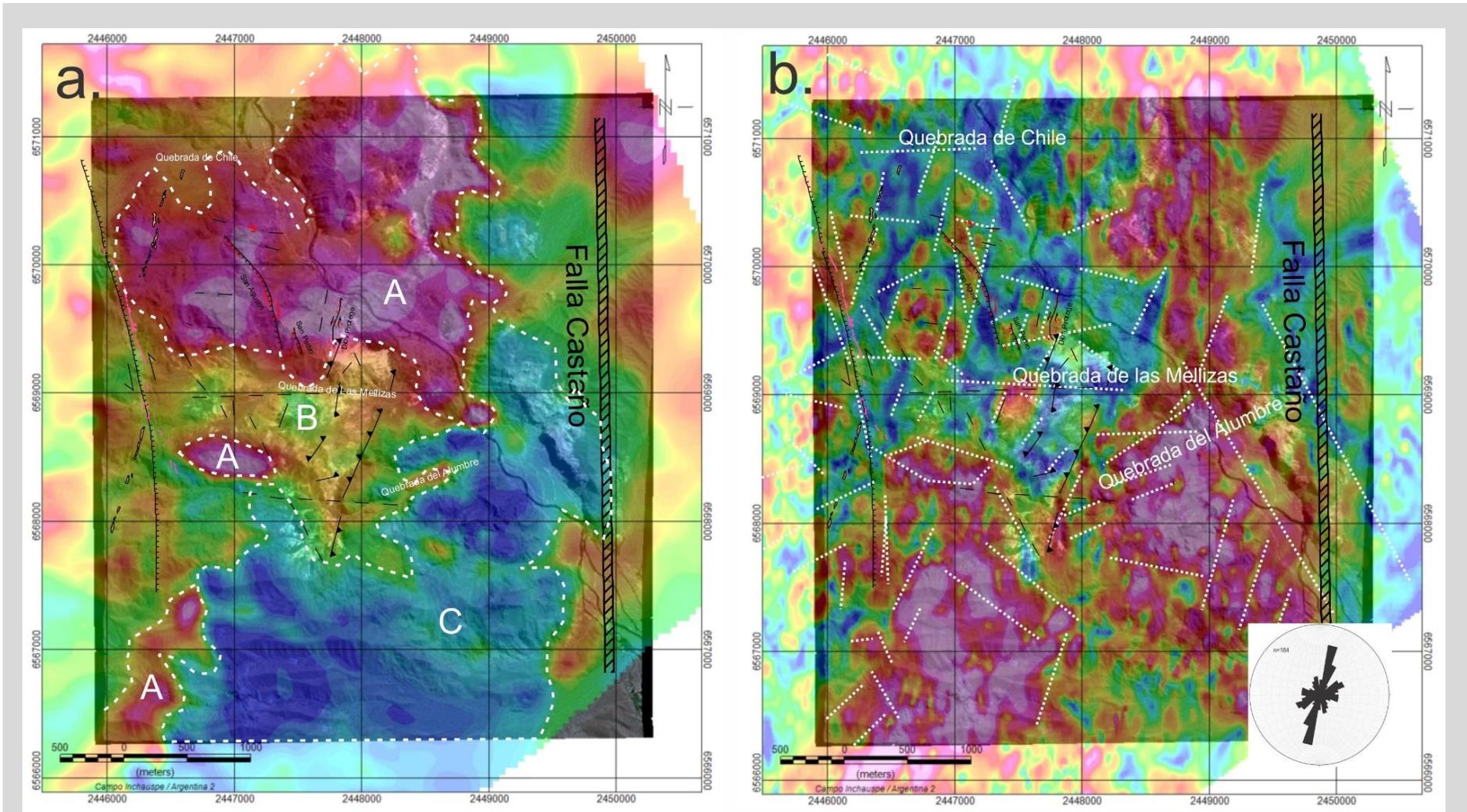


Figura 4.15. a. Imagen de Campo Magnético Total Reducido al Polo, donde se identifican 3 Dominios Litomagnéticos, delimitados por líneas punteadas blancas. b. Mapa de señal analítica donde se marcan con líneas punteadas blancas las estructuras interpretadas. En el diagrama de rosas se vuelcan los datos de las orientaciones de las estructuras interpretadas.

4.6.Trabajos citados en el Capítulo 4

- Baranov, V. y Naudy, H. 1964, Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics* 29: 67-79.
- Briggs, I.C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics* 39: 39-48.
- Delendatti, G.L. 2005. Caracterización genética del complejo mineralizado Castaño Nuevo y su relación con el magmatismo Gondwánico en Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. Tesis Doctoral (inérita). Universidad Nacional de San Juan. 213p.
- Geosoft®. 2012. Oasis montaj How-To Guide: CET Grid Analysis - Create a Structural Complexity Map. Geosoft Inc. Ontario, Canada.
- Gunn, P.J., FitzGerald, D., Yassi, N. y Dart, P. 1997. New algorithms for visually enhancing airborne geophysical data. *Exploration Geophysics* 28: 220-224.
- Gunn, P.J. 1998. Interpretation of Airborne Magnetic and Radiometric Surveys. Australian Geological Survey Organization (AGSO). 150 pp.
- Holden, E., Dentith, M.C., y Kovesi, P. 2008. Towards the automated analysis of regional aeromagnetic data to identify regions prospective for gold deposits. *Computers & Geosciences* 34(11): 1505–1513.
- Holden E., Kovesi, P., Dentith, M.C., Wedge, D., Wong, J.C. y Shih Ching Fu. 2010. Detection of regions of structural complexity within aeromagnetic data using image analysis. 25th International Conference of Image and Vision Computing New Zealand, Queenstown, pp. 1-8.
- Holden, E., Dentith, M. y Kovesi, P. 2012. CET Grid Analysis - Create a Structural Complexity Map. Center of Exploration and Targeting. Perth.
- Kovesi, P. 1997. Symmetry and asymmetry from local phase. Proceedings The 10th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence. Springer-Verlag, pp. 185-190.
- Lam, L., Lee, S.W. y Suen, C.Y. 1992. Thinning methodologies - a comprehensive survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14 (9): 869-885.
- Milligan, P.R. y Gunn, P.J. 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *Journal of Australian Geology and Geophysics* 17: 63-75.
- Minty, B.R.S. 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. Australian Geological Survey Organization (AGSO). *Journal of Australian Geology and Geophysics* 17(2): 39-50.
- Nabighian, M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics* 37: 507-517.
- Nabighian, M.N. 1974. Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics* 39 (1): 85-92.
- Nabighian M.N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms - Fundamental relations. *Geophysics* 49: 780-786.
- Peñalva, G.A., Jovic, S.M., Chernicoff, C.J., Guido, D.M. y Schalamuk, L. 2008. Cuerpos Intrusivos asociados a las mineralizaciones polimetálicas del Depósito Cerro León, área del Anticlinal El Tranquilo, Santa Cruz: Evidencias Geofísicas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63(1): 14-23.

“Caracterización geológica-estructural de las manifestaciones hidrotermales del Distrito Minero Castaño Nuevo, y su relación con el Magmatismo Gondwánico. Cordillera Frontal de San Juan, Argentina.” Lic. María Agustina Cócola

Reeves, C., 2005. Aeromagnetic Surveys. Principles, Practice & Interpretation. Earthworks.155p. Whashington DC.

Ryan, R. y Fraser, B. 2010. Field Guide for Geoscientists and Technicians. Spectrum Series N°12, 3rd edition, AusIMM The mineral institute. Australia.

Salem, A. y Smith, R. 2005. Depth and structural index from normalized local wavenumber of 2D magnetic anomalies. Geophysical Prospecting 53: 83-89.

Telford, W.M., Geldart, L.P. y Sheriff, R.E. 1990. Applied Geophysics. Cambridge University Press, 2nd edition. Cambridge, Nueva York.

Vasconcelos, R.M., Metelo, J.M., Mota, C.A. y Gomez D.R. 1994. Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil. Rio de Janeiro. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). 172 pp.

Capítulo 5: Imágenes Satelitales

5.1. Introducción

5.2. Antecedentes

5.3. Metodología

5.4. Resultados

5.4.1. Combinaciones de bandas (RGB)

5.4.2. Cocientes y operaciones entre bandas

5.4.3. Aplicación de índices de Ninomiya

5.4.4. Clasificación Supervisada SAM

5.5. Discusión y Conclusiones

5.6. Trabajos citados en el Capítulo 5

Capítulo 5: Imágenes Satelitales

5.1. Introducción

Los datos multiespectrales de sensores remotos de moderada resolución, como los provenientes de imágenes Landsat TM (*Thematic Mapper*), Landsat ETM⁺ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), Landsat 8-OLI (*Operational Land Image*) y ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) han sido extensamente utilizados para la extracción de información de alteraciones, interpretación de estructuras e identificación litológica, entre otras cosas, jugando un papel significativo en el relevamiento geológico regional y en la exploración minera (Ye et al., 2017).

Las imágenes ASTER en particular, han sido ampliamente utilizadas debido a la cobertura de sus bandas en el rango del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo de onda corta (SWIR) y al infrarrojo térmico (TIR), dentro de los cuales se pueden identificar rasgos de absorción característicos de determinados minerales (Fujisada, 1995; Mars y Rowan, 2010; Guha y Kumar, 2016). Por otro lado, las imágenes Landsat TM, ETM⁺ y OLI también fueron utilizadas frecuentemente ya que poseen buena cobertura en el rango del espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR) y parte del infrarrojo de onda corta (SWIR), son de fácil obtención, pero presentan limitaciones en cuanto a la resolución espacial (Amri et al., 2010; He et al., 2015).

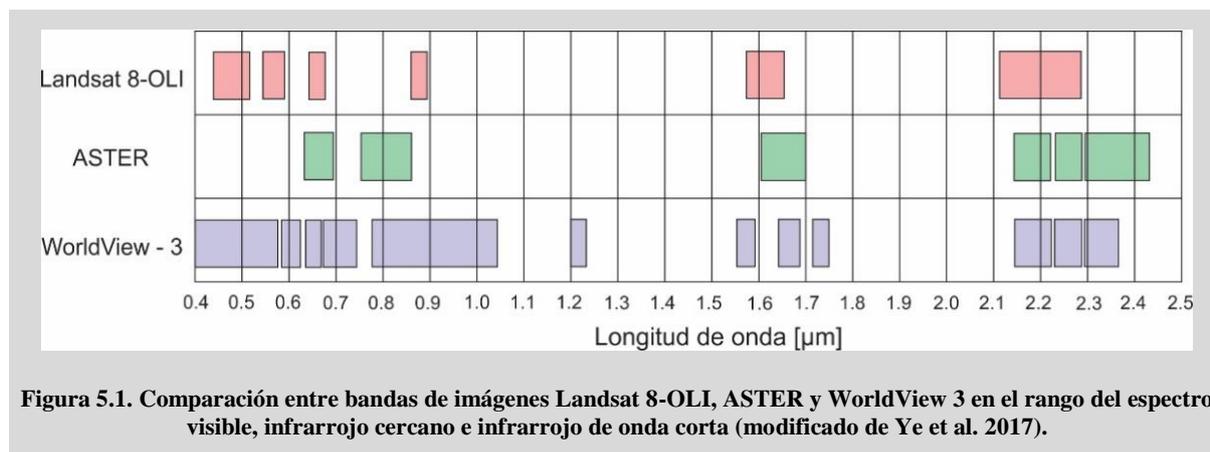
Recientemente, las imágenes WorldView 3 (WV3) desarrolladas por DigitalGlobe INC. fueron lanzadas al mercado y constituyen un gran avance en cuanto a resolución espacial incrementando también la resolución espectral respecto de las imágenes previas (Ye et al., 2017; Mars, 2018).

Landsat 8 (OLI/TIRS)			ASTER			WorldView 3		
Bandas	Longitud de onda [µm]	Resolución [m]	Bandas	Longitud de onda [µm]	Resolución [m]	Bandas	Longitud de onda [µm]	Resolución [m]
1 - VNIR (ultra blue)	0.435-0.451	30				1 - VNIR (coastal)	0.397-0.454	0.31
2 - VNIR (visible blue)	0.452-0.512	30				2 - VNIR (blue)	0.445-0.517	0.31
3 - VNIR (green)	0.533-0.590	30	1 - VNIR (green/yellow)	0.520-0.600	15	3 - VNIR (green)	0.507-0.586	0.31
			2 - VNIR (red)	0.630-0.690	15	4 - VNIR (yellow)	0.580-0.629	0.31
4 - VNIR (red)	0.636-0.673	30	3N - VNIR	0.760-0.860	15	5 - VNIR (red)	0.626-0.696	0.31
			3B - VNIR	0.760-0.860	15	6 - VNIR (red edge)	0.698-0.749	0.31
5 - VNIR (NIR)	0.851-0.879	30				7 - VNIR (near IR 1)	0.765-0.899	1.24
						8 - VNIR (near IR 2)	0.857-1.039	1.24
8 - Panchromatic	0.503-0.676	15						
9 - Cirrus	1.363-1.384	30						
						1 - SWIR	1.184-1.235	3.7
6 - SWIR	1.566-1.651	30				2 - SWIR	1.546-1.598	3.7
						3 - SWIR	1.636-1.686	3.7
			4 - SWIR	1.600-1.700	30	4 - SWIR	1.702-1.759	3.7
			5 - SWIR	2.145-2.185	30	5 - SWIR	2.137-2.191	3.7
			6 - SWIR	2.185-2.225	30	6 - SWIR	2.174-2.232	3.7
7 - SWIR	2.107-2.294	30	7 - SWIR	2.235-2.285	30	7 - SWIR	2.228-2.292	3.7
			8 - SWIR	2.295-2.365	30	8 - SWIR	2.285-2.373	3.7
			9 - SWIR	2.360-2.460	30			

Tabla 5.1. Tabla comparativa detallando las bandas de cada tipo de imagen (VNIR/SWIR) y sus respectivos rangos de longitudes de onda y resolución, para Landsat 8-OLI, ASTER y WorldView 3.

En la tabla 5.1 se muestra una comparación entre las imágenes Landsat 8-OLI, ASTER y WV3 (datos obtenidos desde la web de DigitalGlobe), definiendo las longitudes de onda que abarcan las

bandas que componen las imágenes y su respectiva resolución espacial. En comparación, en la región del visible y el infrarrojo cercano puede apreciarse claramente como las imágenes WV3 cubren prácticamente todo el espectro, a diferencia de las ASTER y Landsat 8-OLI las cuales solo abarcan tramos restringidos. En la región del SWIR en cambio, las imágenes ASTER cubren rangos de longitudes de onda mayores a los que abarcan las Landsat 8-OLI y WV3 (Figura 5.1).



Como se determinó anteriormente, las imágenes ASTER presentan una resolución espacial y espectral superior en el dominio del infrarrojo cercano y medio. En dicha porción del espectro electromagnético, los principales minerales que conforman las asociaciones de alteración hidrotermal más comunes, tienen sus rasgos de absorción característicos, y sumado a la incorporación de varias bandas espectrales en la región del térmico (Fujisada, 1995), las imágenes ASTER constituyen la herramienta más difundida para la exploración de depósitos hidrotermales.

El sensor ASTER, transportado por el satélite Terra, fue puesto en órbita el 18 de diciembre de 1999. Este sensor adquiere imágenes multispectrales a través de la región del espectro electromagnético visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de ondas cortas y térmico. El rango espectral de este sensor está separado en tres subsistemas con un total de 14 bandas. Este sensor cuenta con un telescopio adicional que tiene una resolución espectral igual a la banda 3 y está orientado 27,7° hacia atrás, obteniéndose de este modo las bandas 3N (nadir) y 3B (hacia atrás), con las que se construye un par estereoscópico a partir del cual se genera el modelo digital de elevación (DEM).

Los datos obtenidos a partir de este sensor se presentan en dos niveles de procesamiento. El primer nivel (L1A) constituye la totalidad de la información cruda, sin aplicar coeficientes de corrección geométricos o radiométricos, ni tablas de corrección de paralaje del SWIR. El segundo nivel (L1B) incorpora los coeficientes de calibración geométrica y radiométrica en la imagen, el error de paralaje que afecta al SWIR es corregido y los datos se hallan orientados al norte de la trayectoria del satélite.

En el presente capítulo se presenta el análisis del área de estudio a partir de la utilización de imágenes ASTER y se lo compara con trabajos previos efectuados con imágenes Landsat TM 7. Dicho

análisis se aborda partiendo de combinaciones simples de bandas (RGB), operaciones y cocientes entre bandas, aplicación de los Índices de Ninomiya (Ninomiya y Fu, 2001, 2016; Ninomiya, 2003, 2004) y finalmente clasificaciones supervisadas a partir de librerías espectrales. Estas librerías se componen de curvas patrón de distintas fases mineralógicas a fin de comparar dichas curvas con las obtenidas en cada pixel de la imagen.

5.2. Antecedentes

Los trabajos previos llevados a cabo en el Distrito Minero Castaño Nuevo corresponden a los realizados por Delendatti (2003, 2005) quien trabajó con la metodología de análisis de componentes principales (PCA) sobre una imagen Landsat TM 7, definiendo asociaciones de alteración en el área de estudio y comparando con otros depósitos localizados al norte de Castaño Nuevo.

El PCA es una combinación lineal por la cual un conjunto de variables correlacionadas se transforma en un sistema de variables no correlacionadas llamadas componentes principales (CP), las cuales pueden describir, en un espacio menos complejo, la variabilidad total de los datos originales. Como resultado de la transformación el conjunto inicial de datos estará referido a un nuevo sistema de ejes ortogonales (Merodio, 1985) en el cual la varianza en la dirección del primer eje está maximizada (Swan y Sandilands, 1995). La varianza total de los componentes es igual a la varianza de las variables originales y los CP se ordenan según varianza decreciente.

Las bandas TM son variables correlacionables porque comparten información espectral debido a que los distintos tipos de superficies tienden a presentar comportamientos similares en regiones próximas del espectro electromagnético (Chuvieco, 1990).

En el trabajo de Delendatti (2003) se efectuaron transformaciones de componentes principales con las bandas TM 1-4-5-7, 4-5-7 y 5-7, de modo tal de delimitar las zonas con abundancias relativas de minerales de alteración (fundamentalmente alteración argílica y fílica).

Delendatti (2003, 2005) realizó una comparación entre Castaño Nuevo y otros sistemas hidrotermales localizados al norte, como el pórfido el Retamal, el depósito Timbirimbas y las vetas polimetálicas del Distrito Minero Castaño Viejo. Se confeccionaron 3 imágenes de CP, una resaltando los minerales arcillosos (AR), otra destacando los compuestos oxidados (FE) y una imagen compuesta RGB desarrollada a partir del análisis de CP orientadas (*Técnica Crosta*, Crosta y McMoore, 1989).

Según Delendatti (2003), en la imagen RGB Crosta ($R=AR$, $G=AR+FE$, $B=FE$), se distinguieron 3 zonaciones principales en función de la respuesta de las diferentes asociaciones minerales (Figura 5.2): Clase A sectores con concentraciones anómalas de minerales arcillosos (en blanco), Clase B sectores periféricos con mezcla de minerales arcillosos y óxidos de hierro (en tonos grises medios), y Clase C zonas silicificadas (en negro).

Particularmente, el sector del Distrito Minero Castaño Nuevo se destaca con píxeles negros (Clase C, Figura 5.2). Las curvas espectrales muestran, en coincidencia con las observaciones de campo y los estudios petrográficos efectuados por Delendatti (2005), que la alteración predominante es la silicificación que se presenta como: a) cuarzo *vuggy*; b) cuarzo calcedónico en fragmentos de brecha, vetillas y diques fluidales; c) cuarzo blanco pulverulento, altamente reflectivo en el rango de la TM7 y responsable principal de la respuesta espectral del sector.

Delendatti (2003) interpretó que el cuarzo blanco pulverulento forma parte de un pulso final de alteración relacionado a un evento de vapores calientes (Sillitoe, 1985; Corbett y Leach, 1998), con volúmenes minoritarios de caolinita que indicarían una progresiva neutralización del ambiente (Sillitoe, 1999) y sin la presencia de alunita y azufre nativo. Asimismo, alrededor de los píxeles negros se identifican levemente zonas de alteración de Clase A y B pero con escasa distribución areal.

En Delendatti (2003, 2005), se argumenta que las imágenes AR, AR + FE y FE resultantes de la transformación de dos, tres y cuatro bandas en sus componentes principales resultaron efectivas en la delineación de zonas hidrotermalmente alteradas, ricas en asociaciones de alteración arcillosa, sílicea y en óxidos de hierro.

Las clases establecidas distinguen la presencia de dos asociaciones hidrotermales diferentes. La primera, corresponde al núcleo central del área de Castaño Nuevo y está dominada por una alteración sílicea generada en un ambiente donde circularon fluidos hidrotermales de alta acidez, con una fase final rica en cuarzo pulverulento y caolinita subordinada, que afectó a un sistema formado por rocas porfíricas andesíticas a dacíticas y brechas hidrotermales (Delendatti, 2003). El otro subtipo de asociación de alteración posee gran desarrollo regional y está relacionado a una fase final de alteración generada por fluidos ácidos a neutros (Delendatti, 2005).

5.3. Metodología

Para el estudio del área de trabajo se utilizó una imagen del sensor ASTER de nivel L1B, adquirida el 12 de noviembre de 2003 y procesada el 25 de noviembre de 2003. Esta imagen fue ortorectificada mediante el empleo del *software* SILCAST (*Sensor Information Laboratory Corp*), el cual genera un DEM relativo por estero-correlación de las bandas 3N y 3B, sin usar puntos de control a una resolución de 30 metros y luego rectifica la imagen utilizando dicho DEM. Cada una de las bandas del VNIR y del SWIR fueron calibradas para convertir los niveles digitales (ND) a valores de radiancia, y luego los valores de radiancia se transformaron a valores de reflectancia. Este paso es fundamental para poder comparar las firmas espectrales de la imagen con las obtenidas con equipos portátiles en campo. Las firmas espectrales captadas por los espectrómetros tienen que ser adaptadas a la resolución espectral del sensor ASTER, para su comparación y análisis con las extraídas de la imagen ASTER. En

la figura 5.3 se muestran las firmas espectrales de los minerales que conforman las alteraciones más comunes de los sistemas hidrotermales como el del Distrito Minero Castaño Nuevo tomadas de la librería espectral de la USGS (Kokaly et al., 2017) de minerales adaptados a la resolución espectral de ASTER (VNIR+SWIR).

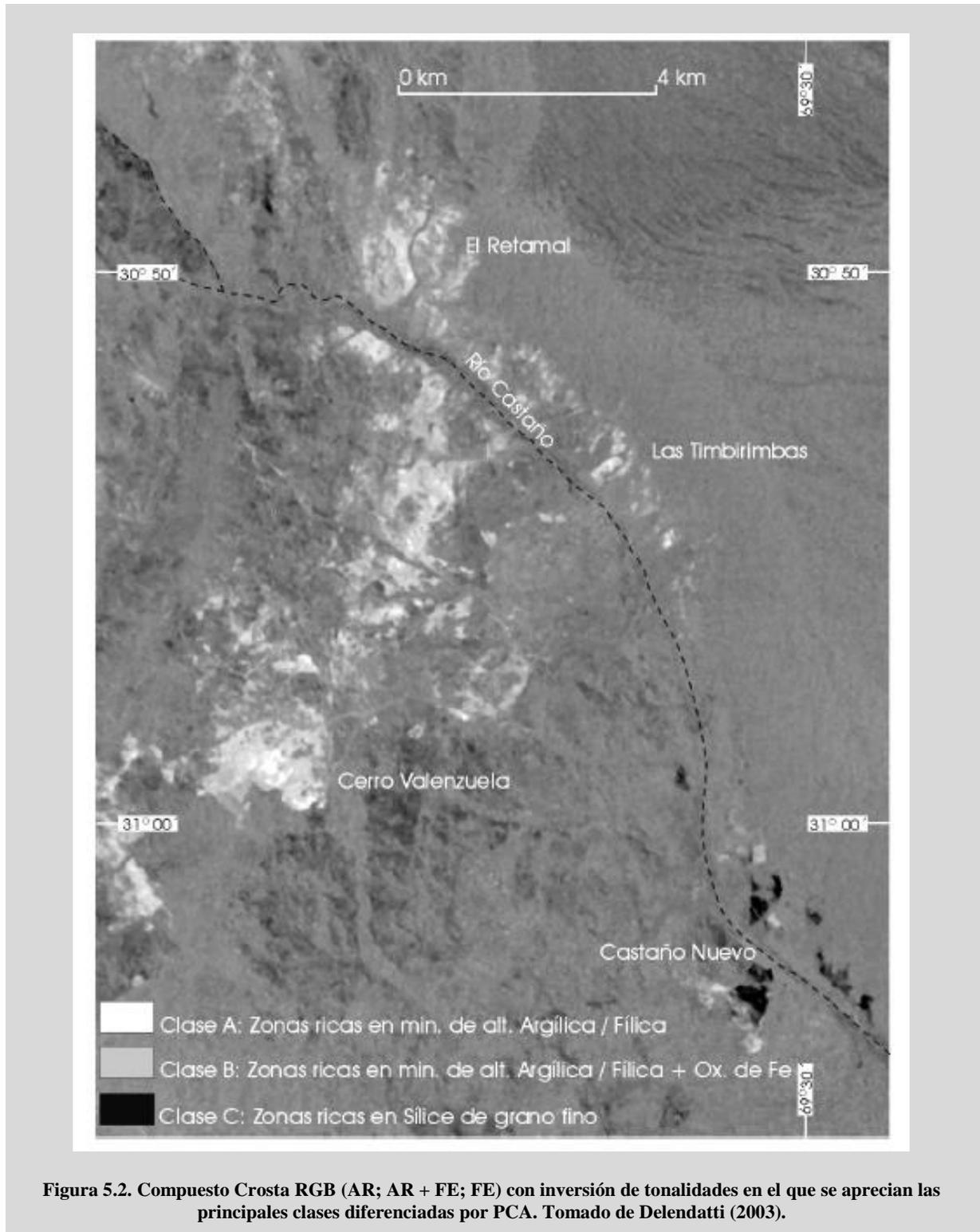
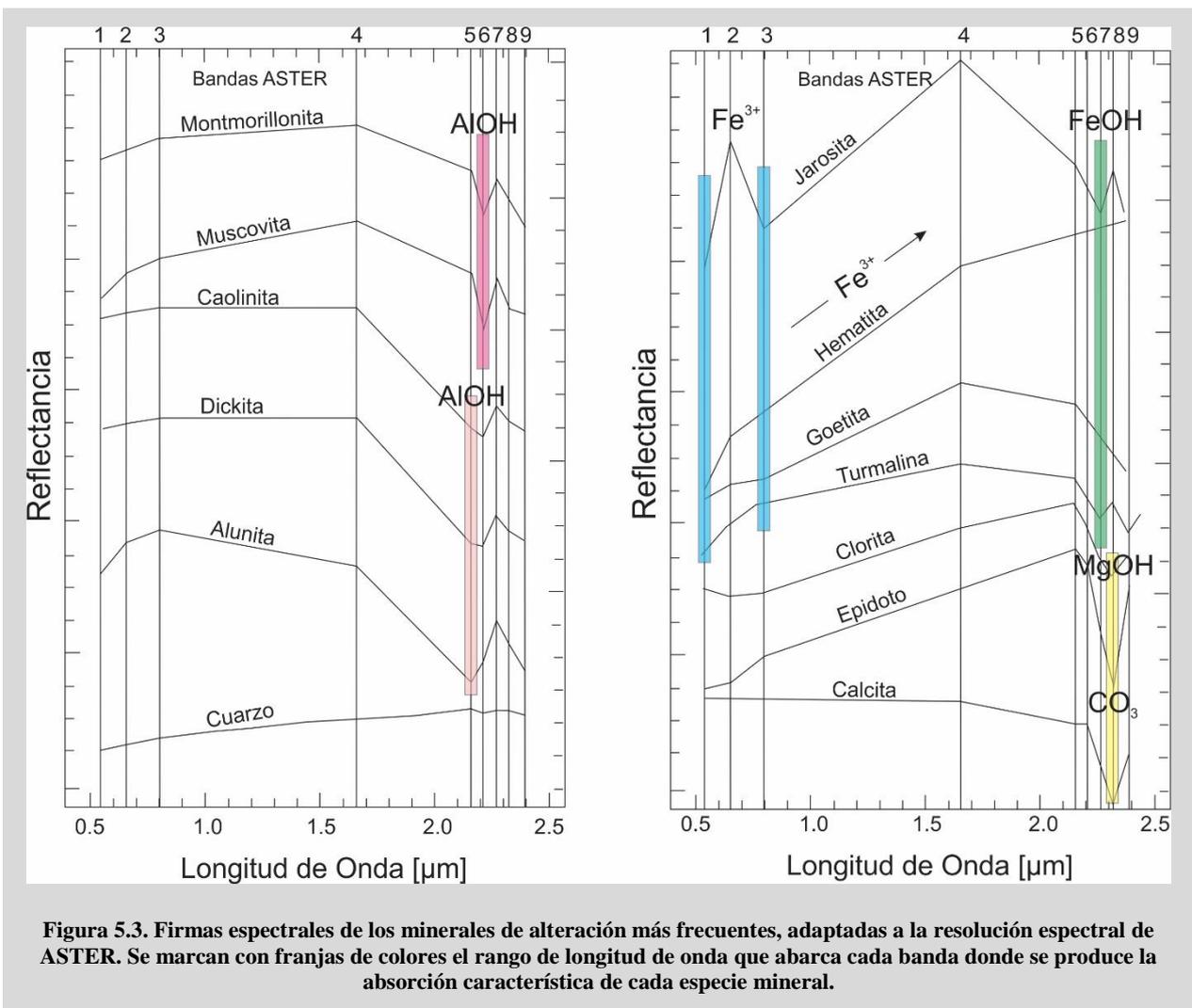


Figura 5.2. Compuesto Crosta RGB (AR; AR + FE; FE) con inversión de tonalidades en el que se aprecian las principales clases diferenciadas por PCA. Tomado de Delendatti (2003).

Durante las tareas iniciales de mapeo, se tomaron muestras para ser analizadas con un equipo Terraspec® 4Hi-Res (*AusSpec International – ASD Inc.*) facilitado por la empresa *Troy Resources Ltd.* Sobre dichas muestras se tomaron varias lecturas y fueron interpretadas a partir del empleo de diferentes *softwares* como SpecMin, ViewSpec Pro, TSG (*The Spectral Geologist*), entre otros. Los resultados de este muestro preliminar permitieron delinear de una manera más acertada el trabajo espectrométrico de detalle, ajustando orientaciones y espaciado de líneas para un muestreo sistemático posterior (presentado en el Capítulo 6).

El procesamiento de las imágenes ASTER se realizó aplicando las siguientes técnicas: (1) Combinaciones de bandas (RGB); (2) Cocientes y operaciones entre bandas; (3) Aplicación de los Índices de Ninomiya (Ninomiya y Fu, 2001, 2002, 2016; Ninomiya, 2003, 2004); y (4) Clasificación Supervisada SAM a partir de una librería espectral generada con curvas de minerales obtenidas en un relevamiento preliminar. Siguiendo este orden se presentan los resultados obtenidos para el sector del Distrito Minero Castaño Nuevo.



5.4. Resultados

Los datos crudos de las imágenes ASTER fueron corregidos de acuerdo a los requerimientos específicos para cada uno de los cuatro tipos de procesamiento llevados a cabo. Cada una de las imágenes se centra en el Distrito Minero Castaño Nuevo y se incluye una extensión hacia el oeste abarcando un cuerpo de morfología circular atravesado por un enjambre de diques similar al que fue mapeado y descrito en el Capítulo 3 para el sector de Castaño Nuevo. Dicho cuerpo corresponde al Plutón Manrique (mencionado en el Capítulo 2) el cual, de acuerdo a Espina et al. (1998), sería equiparable a las rocas que hospedan al sistema vetiforme del sector estudiado y está emplazado en sedimentitas y rocas volcánicas de la Formación Castaño (base del Grupo Choiyoi, de acuerdo a Rodríguez Fernández et al. 1996).

Las bandas empleadas en cada uno de los procesos realizados fueron elegidas en base a la localización de las respuestas espectrales de los minerales de alteración más comunes (Figura 5.3). Como regla general, los óxidos de Fe son detectados con las bandas 1 y 3. Los minerales que contienen Al-OH como la caolinita, dickita, alunita, muscovita e illita exhiben rasgos de absorción en las bandas 5 y 6. Minerales con Fe-OH como jarosita, clorita o Fe-muscovita son detectados con la banda 7, mientras que aquellos que contienen Mg-OH y CO₃, como clorita, epidoto y carbonatos son detectados con la banda 8 (Hunt y Salisbury, 1971; Hunt, 1977, 1979; Hunt y Ashley, 1979).

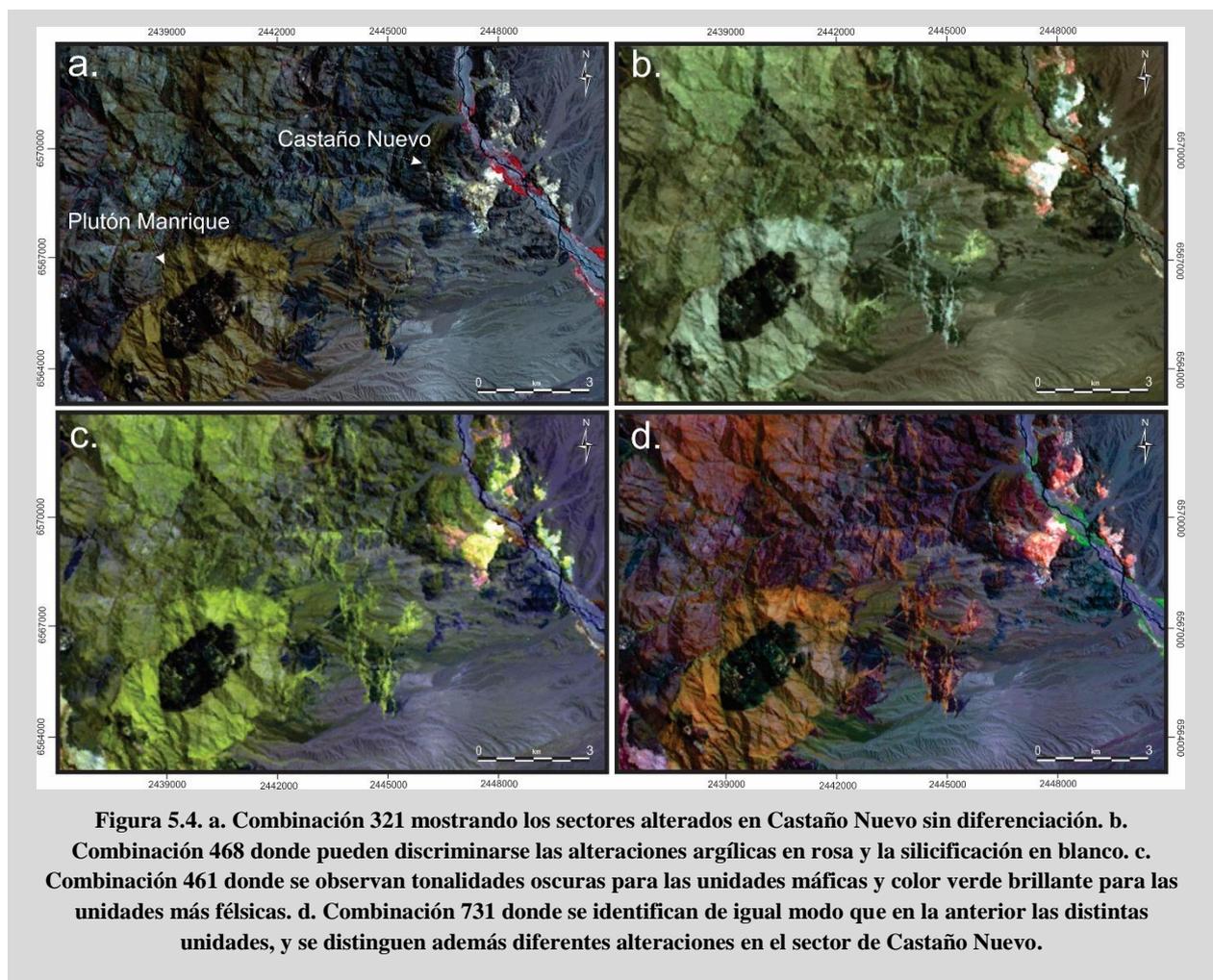
5.4.1. Combinaciones de Bandas (RGB)

En una etapa preliminar, se realizaron varias composiciones color, que resultan un método sencillo y rápido para discriminar patrones diferenciales. Se efectuó una combinación para el subsistema VNIR (RGB: 321), una composición color con las bandas del subsistema SWIR (RGB: 468) y dos composiciones color que involucran bandas de ambos subsistemas (RGB 461 y 731), las cuales se presentan en la figura 5.4.

La combinación 321 permite diferenciar las distintas unidades litológicas (Figura 5.4.a). Las andesitas que hospedan el sistema vetiforme de Castaño Nuevo se observan con tonalidades azuladas a verdosas. Asimismo, se distinguen claramente los sectores alterados de los frescos dentro del área, mostrando en blanco las áreas con mayor alteración hidrotermal, coincidentes con los paquetes piroclásticos más finos y en parte con las andesitas. Por otro lado, el Plutón Manrique, también se demarca con claridad en contraste con las rocas hospedantes, al igual que el enjambre de diques riolíticos/riodacíticos que se identifica sin dificultades.

La combinación 468, además de diferenciar a las litologías como la combinación anterior, permite ahondar un poco más en el tipo de las alteraciones identificadas en el distrito. En el sector oeste, se observan con una coloración rosada a los sectores que parecen orientarse en dirección NO-SE y serían

sectores con máxima absorción de la banda 6 (AlOH) y por tanto serían áreas con alteración argílica. Los sectores blancos corresponden a afloramientos de la unidad piroclástica fina, identificada en el Capítulo 3 como Unidad II, que presentan una fuerte silicificación en esos sectores (Figura 5.4.b).



De igual modo, la combinación 461 muestra una coloración rosa para los sectores argilizados y amarilla para aquellos silicificados (Figura 5.4.c). En esta imagen se logra hacer una diferenciación litológica un poco más evidente, ya que las andesitas mapeadas en el sector norte del Distrito Minero Castaño Nuevo (denominadas Unidad I en el Capítulo 3) se observan en color verde oscuro, contrastando con las unidades más félsicas como los diques riolíticos/riodacíticos o el Plutón Manrique, los cuales se aprecian en tonalidades más claras.

Finalmente, la combinación 731 (Figura 5.4.d) muestra una diferenciación entre las unidades litológicas identificadas similar a la establecida con la combinación anterior, sólo que en este caso la banda 7 permite resaltar las longitudes de onda donde se producen las absorciones características de minerales que contienen tanto FeOH como MgOH. Las bandas 1 y 3 reflejan el contenido y predominio de fases con Fe³⁺. Es por esto que las rocas andesíticas que hospedan al sistema vetiforme de Castaño Nuevo se observan en tonalidades rojizas oscuras a violáceas demostrando una mayor reflectancia de la

banda 7 que la de las bandas 3 y 1. Las rocas piroclásticas finas con fuerte alteración se distinguen por los colores anaranjados/rosa claro a ambas márgenes del río Castaño y las rocas volcanoclásticas que culminan la columna litoestratigráfica de Castaño Nuevo se observan con tonalidades verdosas a azules. El intrusivo Manrique, así como el enjambre de diques que atraviesan las unidades a nivel regional, se observan en colores pardo claro a medio (Figura 5.4.d).

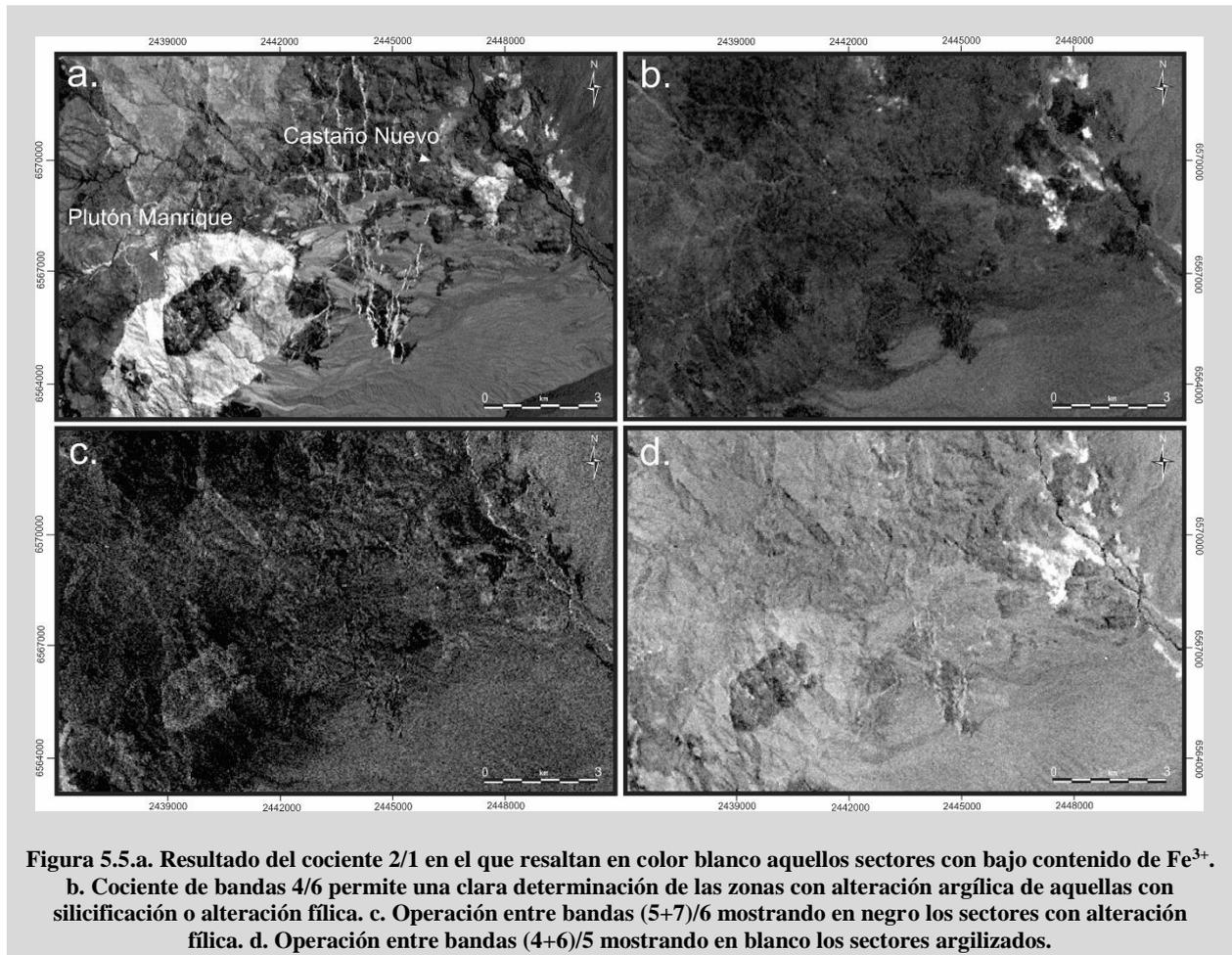
5.4.2. Cocientes y operaciones entre bandas

A partir de cocientes y otras operaciones matemáticas entre bandas, determinados rasgos geológicos pueden ser resaltados. Por ejemplo, el cociente $2/1$ permite discriminar la distribución de píxeles con contenidos elevados de Fe^{3+} (Figura 5.5.a). Este cociente expresa el descenso de la reflectancia en la banda 1 relativo a la banda 2, asociado a la absorción del ion férrico debido a la presencia de hematita/goetita en las unidades litológicas (Rowan et al., 2005). Al aplicarlo en el área de estudio pueden discriminarse las unidades de composición andesítica en color gris medio, de aquellas más félicas como los diques riolíticos/riodacíticos y el Plutón Manrique, que se aprecian en color blanco.

Otro cociente, pero en este caso entre bandas de la región del SWIR, es el $4/6$ el cual arroja un buen indicador de alteración hidrotermal, resaltando sectores con predominio de minerales arcillosos y micas (Figura 5.5.b), ya que dichos minerales presentan una reflectancia máxima en longitudes de onda abarcadas por la banda 4, y absorciones características en torno a los $2200 \mu m$ (banda 6). En este caso la imagen muestra el sector de alteración de Castaño Nuevo en color blanco.

Algunas operaciones más complejas permiten discriminar el tipo de alteración dominante en función de los minerales que componen cada asociación. La operación entre bandas del SWIR $(5+7)/6$, permite resaltar alteraciones fílicas ricas en sericita. Para el sector estudiado parece marcarse en negro los sectores que presentan ese tipo de alteración, aunque no resulta claro. Se aplicó una segunda operación para marcar los sectores con alteración argílica mediante el cociente $(4+6)/5$ (Figura 5.5.d), el cual en el Distrito Minero Castaño Nuevo muestra en color blanco todo el sector alterado independientemente del tipo de alteración.

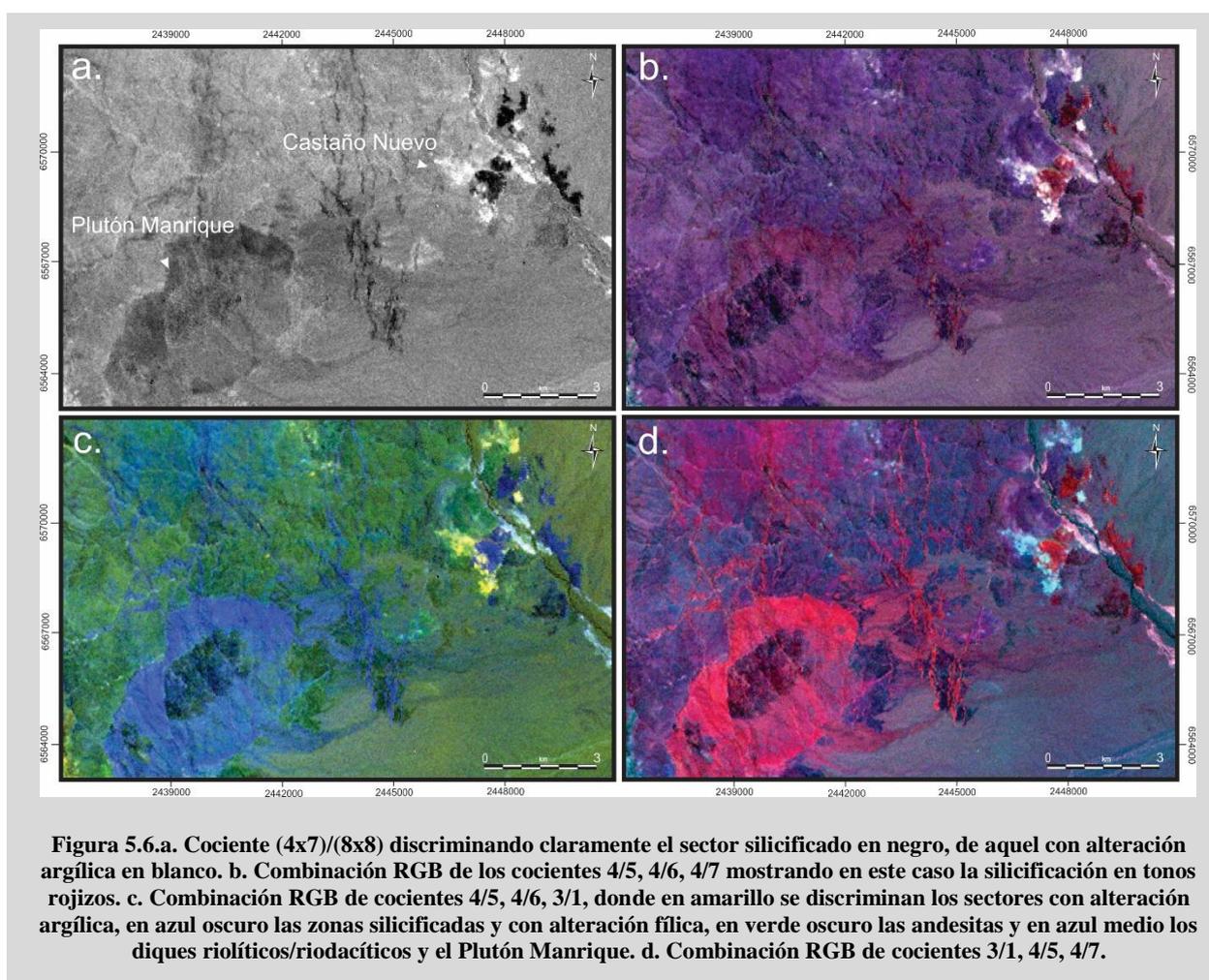
Testa et al. (2018) proponen el cociente $(4x7)/(8x8)$, basándose en las similitudes espectrales entre micas blancas y minerales del grupo del caolín para generar imágenes discriminantes entre asociaciones de alteración fílica y argílica. Al aplicarlo sobre el sector de Castaño Nuevo se observan en negro los sectores con mayor contenido de cuarzo y micas blancas, mientras que las zonas en las que se reconocen alteración argílica se ven en tono blanco (Figura 5.6.a). En cuanto a las unidades litológicas, las andesitas del Distrito Minero Castaño Nuevo se observan en color gris medio, al igual que las rocas volcanoclásticas del sur del distrito. Los afloramientos de las rocas piroclásticas finas se observan en color negro en ambas márgenes del río Castaño. Los diques riolíticos/riodacíticos y el Plutón Manrique se aprecian en color gris oscuro.



Por otro lado, existen otras combinaciones de cocientes en una imagen RGB como la presentada en la Figura 5.6.b, en la que se disponen las relaciones entre bandas de la siguiente manera: R:4/5, G:4/6 y B:4/7 (Pérez et al. 2007). En esta imagen se perciben nuevamente las unidades volcánicas andesíticas y las rocas volcanoclasticas con características similares, reflejando tonalidades violáceas. Los diques riolíticos/riodacíticos al igual que el Plutón Manrique se observan en color morado. Las rocas piroclásticas finas con alteración silíceas se aprecian en color rojo, mientras que los sectores argilizados se presentan en color blanco.

Otro tipo de combinación similar fue propuesta por Di Tommaso y Rubinstein (2007), quienes utilizaron los cocientes RGB 4/6, 4/7 y 3/1 como discriminantes litológicos y obtuvieron resultados contundentes para volcanitas del Grupo Choiyoi en el depósito El Infiernillo. Al aplicarlo sobre el área del Distrito Minero Castaño Nuevo se puede observar como la totalidad de las rocas hospedantes de la mineralización (de composición andesítica) está en tonalidades verdosas y solo presentan una coloración azul los sectores silicificados y amarilla las zonas con alteración hidrotermal argílica y/o fílica (Figura 5.6.c). Por otro lado, los diques riolíticos/riodacíticos y el Plutón Manrique se observan en color azul medio, contrastando con el verde de las andesitas.

Finalmente, se aplicó una combinación similar a la anterior, pero cambiando el cociente 4/6 por 4/5. Éste último es utilizado para discriminar arcillas como caolinita (dickita), alunita y pirofilita, y es por eso que sería esperable una mejor definición a la hora de discriminar entre zonas con predominio de alteración argílica vs. zonas con mayor contenido de micas. De este modo en la figura 5.6.d se observa la composición RGB 3/1, 4/5, 4/7, donde las litologías máficas se observan en tonalidades violáceas/azuladas, mientras que las unidades félsicas presentan un color rosa fuerte. En cuanto a las alteraciones, las zonas argilizadas presentan color turquesa y los sectores silicificados con contenidos variables de micas se observan en rojo fuerte.



5.4.3. Aplicación de los Índices de Ninomiya

Utilizando las bandas SWIR y TIR de las imágenes ASTER, Ninomiya y Fu (2001) y Ninomiya (2003, 2004) propusieron una serie de índices mineralógicos que permiten ajustar la técnica de sensores remotos para la correcta discriminación de litologías y diversas asociaciones de alteración hidrotermal.

Utilizando las bandas que conforman el SWIR, los autores formularon índices, discriminando

minerales carbonáticos, minerales con hidroxilos en su estructura, minerales del grupo de la caolinita y alunita. Las operaciones que definen a cada uno de los índices, se presentan en la tabla 5.2.

En primer lugar, se estableció que aquellos minerales que contienen OH^- dentro de su estructura cristalina están caracterizados por un rasgo de absorción en la banda 6, lo que resulta en una alta reflectancia para las bandas 4 y 7 y relativamente baja para la banda 6. Definieron subgrupos y en base a eso determinaron dos índices útiles para la identificación de los mismos. Minerales como montmorillonita, illita, muscovita muestran absorciones en torno a la banda 6 y son incluidos en un mismo grupo. Para la discriminación de estas fases minerales Ninomiya (2004) propone el índice OHI_a . La pirofilita en cambio forma parte del segundo subgrupo y presenta un rasgo de absorción agudo en la región de la banda 5, es por esto que el autor propone un índice diferente para su determinación (OHI_b).

Otro grupo de minerales con OH en su estructura, comunes en las asociaciones de alteración hidrotermal, son la caolinita y dickita, que presentan rasgos de absorción en la banda 5, pero con diferente morfología y rasgos de absorción que la pirofilita. Es por esto que para este grupo de minerales se estableció el índice KLI (Ninomiya, 2003).

La alunita constituye otro tipo de mineral común en determinadas asociaciones de alteración. Presenta rasgos de absorción en la banda 5 al igual que el resto de los minerales antes mencionados, y un único y especial rasgo en la banda 8. Para la detección de este mineral Ninomiya (2004) propone el índice ALI.

La calcita presenta un rasgo prominente en la banda 8, donde se observa una absorción profunda y ancha, y muestra además una absorción débil en torno a la banda 5. En base a esas características Ninomiya (2003) establece el índice CLI para la identificación de carbonatos.

El detalle de las imágenes procesadas bajo los índices antes descriptos se observa en la figura 5.7. Como puede apreciarse, en el sector occidental del Distrito Minero Castaño Nuevo los índices de $\text{OHI}_{a/b}$ y KLI muestran claramente una franja con orientación NO-SE en la que los afloramientos se encuentran afectados por alteración hidrotermal, seguramente ligada a un condicionamiento estructural fuerte con la orientación antes establecida (Figura 5.7.a, b y c). En particular, el índice OHI_a no permite una discriminación litológica, mientras que los índices OHI_b y KLI exhiben un color gris oscuro para las unidades máficas y color gris claro para las unidades más félsicas.

Con respecto al índice ALI, la imagen generada no es del todo clara, solo puede apreciarse un incipiente blanqueamiento en torno al sector antes identificado, al oeste del distrito estudiado (Figura 5.7.d). No es posible distinguir las litologías ni otro tipo de alteración.

SWIR Índices Mineralógicos de Ninomiya		
Índice de minerales que contienen OH ⁻	OHI _a	$\frac{B7 * B4}{B6 * B6}$
	OHI _b	$\frac{B7 * B4}{B5 * B5}$
Índice de la caolinita	KLI	$\frac{B8 * B4}{B6 * B5}$
Índice de la alunita	ALI	$\frac{B7 * B7}{B5 * B8}$
Índice de la calcita	CLI	$\frac{B6 * B9}{B8 * B8}$

Tabla 5.2. Índices Mineralógicos de Ninomiya para la región del SWIR, de acuerdo a los propuesto por Ninomiya (2003, 2004).

Finalmente, para el caso del índice CLI puede apreciarse claramente como resalta en color negro el sector fuertemente silicificado, quedando bien demarcado y delimitado de su entorno. Esto podría deberse a la intensa lixiviación y posterior silicificación observada en las rocas, que no daría lugar a ningún vestigio posible de carbonatos (Figura 5.7.e), a diferencia de las rocas de su entorno que, como se mencionó en las descripciones del Capítulo 3, la mayoría cuenta con una leve alteración carbonática que afecta principalmente a los cristales de plagioclasa.

Ninomiya y Fu (2001) propusieron tres índices para mapeo litológico utilizando los datos de la región del TIR de las imágenes ASTER. Estos índices son: Índice del Cuarzo (QI), Índice de Carbonatos (CI) e Índice de Contenido de Sílice Total (SI), y se definen mediante los cocientes presentados en la tabla 5.3. Tanto el cuarzo, como otros minerales silíceos y los minerales carbonáticos muestran un rasgo fuerte en la región del espectro termal, correspondiente a los enlaces Si – O y C – O.

El cuarzo constituye uno de los mayores componentes de las rocas de la corteza terrestre, y presenta un rasgo específico de emisividad en la región del espectro correspondiente a la banda 11 (en torno a los 8.6 μm). Teniendo en cuenta dicho rasgo, se define el índice QI basado en la emisividad captada para la región de la banda 11 respecto de la obtenida para las bandas 10 y 12 (Ninomiya y Fu, 2002). Sin embargo, este índice puede ser impreciso si las rocas contienen altos porcentajes de feldspatos alcalinos (como ocurre frecuentemente en las rocas graníticas), ya que estos minerales tienen una respuesta exactamente opuesta a la del cuarzo, generando índices QI relativamente bajos para rocas con grandes cantidades de cuarzo (Ninomiya y Fu, 2016).

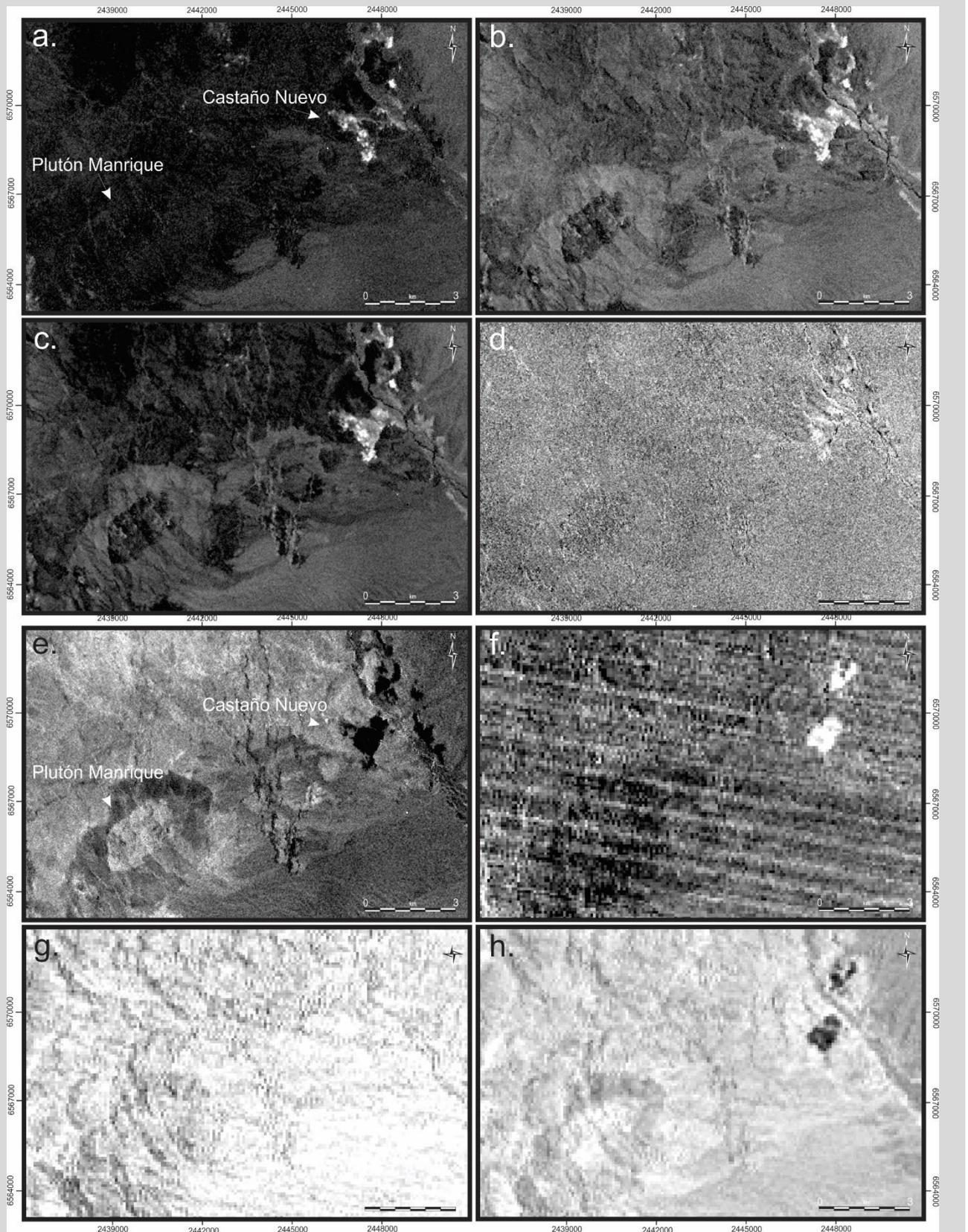


Figura 5.7. Aplicación de índices de Ninomiya. a. Índice de minerales que contienen oxidrilos, utilizando la variante OHL_a. b. Índice de minerales que contienen oxidrilos, utilizando la variante OHL_b. c. Índice de minerales del grupo del caolín KLI. d. Índice de alunita (ALI). e. Índice de calcita (CLI). f. Índice de cuarzo (QI). g. Índice de carbonatos (CI). h. Índice de sílice total (SI).

Las rocas carbonáticas, compuestas mayoritariamente por calcita y dolomita, presentan un único rasgo en torno a los 11,3 μm (correspondiente a la banda 14) que indica una baja emisividad en esa región del espectro, en relación a las regiones de las bandas 10 a 13 donde muestran una alta emisividad. De este modo se define el índice CI, estimando la relación entre las bandas 13 y 14 (Ninomiya y Fu, 2001).

La emisividad que producen las rocas silíceas está directamente relacionada con el contenido de sílice, siendo la respuesta en la región de la banda 12 menor que la de la banda 13 para rocas félsicas, y mayor para rocas máficas (Ninomiya y Fu, 2001). Evaluando la relación entre ambas bandas se obtiene el índice SI, el cual es inversamente proporcional al contenido de sílice de una roca, siendo muy alto para rocas máficas y ultramáficas y bajo para rocas félsicas (Ninomiya y Fu, 2016).

Estos índices fueron aplicados sobre la imagen ASTER del sector estudiado sin corrección atmosférica, de acuerdo a lo propuesto por Ninomiya y Fu (2001). Al aplicar el índice QI sobre la región de estudio se destaca en color blanco (Figura 5.7.f) el sector central del Distrito Castaño Nuevo, donde aflora la Unidad II caracterizada por rocas piroclásticas fuertemente silicificadas. De igual modo, el índice de sílice total SI (Figura 5.7.h) muestra el mismo sector en color negro, reflejando contenidos máximos de sílice, de acuerdo a los parámetros establecidos anteriormente. A diferencia de las imágenes generadas con las operaciones anteriores (Figuras 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7 a, b, c y e), donde la totalidad de los afloramientos de la Unidad II se mostraban con características similares, los índices QI y SI acotan la respuesta, restringiendo las zonas con alteración silícea a la porción central del área de estudio, y distinguiéndola de los sectores con rocas piroclásticas sin alteración.

Otro detalle que resalta a partir de las imágenes generadas con los índices QI y SI es que tanto los diques como el Plutón Manrique muestran tenues variaciones en el tono de grises que reflejan, siendo consistentes con mayores contenidos silíceos en su composición. El índice CI no refleja nada en la imagen generada, lo que indica la ausencia de rocas carbonáticas en el sector de trabajo (Figura 5.7.g).

TIR Índices Mineralógicos de Ninomiya		
Índice del cuarzo	QI	$\frac{B11 * B11}{B10 * B12}$
Índice de carbonatos	CI	$\frac{B13}{B14}$
Índice de contenido total de sílice	SI	$\frac{B12}{B13}$

Tabla 5.3. Índices Mineralógicos de Ninomiya para la región del TIR, de acuerdo a los propuesto por Ninomiya y Fu (2001, 2002).

5.4.4. Clasificación supervisada SAM

Las técnicas cuantitativas para el mapeo espectral a partir de una imagen, como el método SAM (*Spectral Angle Mapper Method*, Kruse et al., 1993), comparan los espectros que componen cada pixel de la imagen con espectros de referencia. El algoritmo utilizado determina la similitud espectral calculando el ángulo de mejor aproximación, y si bien fue diseñado para imágenes hiperespectrales, pueden ser aplicado en sistemas con resolución inferior (Rowan y Mars, 2003).

A partir de las imágenes generadas en los apartados anteriores, al concentrar la atención sobre el Distrito Minero Castaño Nuevo, se pueden observar rasgos diferenciales de acuerdo a las litologías y asociaciones de alteración hidrotermal presentes. En la Figura 5.8. se muestra un mosaico con todas las imágenes generadas y recortadas del área de estudio a fin de poder comparar las distintas metodologías aplicadas y discriminar correctamente unidades y zonaciones de alteración.

Las respuestas de las unidades litológicas fueron explicadas en cada uno de los apartados, pudiendo establecerse con un alto grado de certeza las respuestas particulares de las andesitas pertenecientes a la Unidad I, las rocas piroclásticas finas de la Unidad II y las rocas volcánicas de la Unidad III. De igual modo, los diques riodacíticos mostraron una respuesta diferente a su entorno que permitió identificarlos y es concordante con su composición más félsica, establecida en el Capítulo 3.

En cuanto a las alteraciones, si bien pudieron identificarse zonas afectadas por hidrotermalismo, no fue posible discriminar asociaciones. Se determinaron zonas con mayor absorción de la banda 6 (como en la imagen del cociente 4/6 y las imágenes RGB representando cocientes, ver en Figura 5.8), que estarían vinculadas con una alteración de tipo argílica. Asimismo, esos mismos sectores, que se alinean sobre una franja NO-SE en el sector centro-occidental del área de estudio, fueron identificados con los índices de Ninomiya (OHI_a , OHI_b y KLI, ver Figura 5.8), pudiendo identificarse zonas con posible predominio de minerales como muscovita, montmorillonita e illita, y zonas con mayor contenido de minerales como caolinita, dickita o alunita. Por otra parte, los sectores con fuerte silicificación también fueron discriminados correctamente con los índices de Ninomiya QI y SI (Figura 5.8).

Para ajustar el nivel de conocimiento de las alteraciones y sus respuestas en las imágenes ASTER, se aplicó el método de clasificación supervisada SAM sobre el sector estudiado. A modo de mejorar esta metodología se utilizaron muestras obtenidas durante un relevamiento de base, a partir de las cuales pudieron obtenerse los espectros característicos del sector para cada una de las fases minerales presentes. Dichos espectros fueron tomados con un equipo Terraspec® 4Hi-Res facilitado por la empresa *Troy Resources Ltd.* En la Figura 5.9 se muestran las curvas obtenidas para cada una de las fases minerales presentes y su correspondiente transformación a la resolución de ASTER.

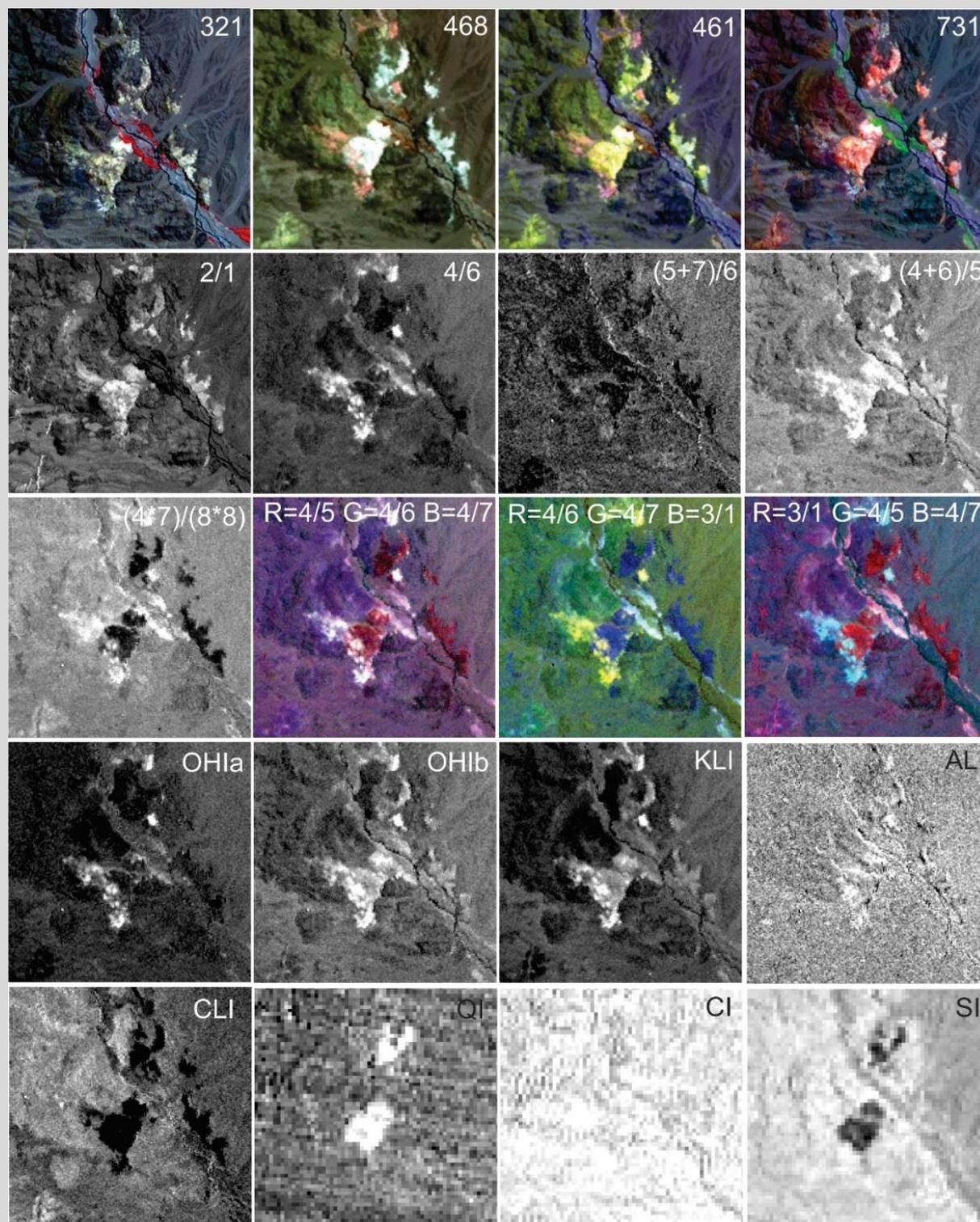


Figura 5.8. Comparación entre las diferentes técnicas aplicadas sobre la imagen ASTER, en el sector del Distrito Minero Castaño Nuevo. Combinaciones de bandas RGB: 321, 468, 461, 731. Cocientes y operaciones entre bandas: 2/1, 4/6, (5+7)/6, (4+6)/5, (4/7)*(8*8). Combinaciones RGB de cocientes: R=4/5 G=4/6 B=4/7, R=4/6 G=4/7 R=3/1, R=3/1 G=4/5 B=4/7. Índices de Ninomiya: OHIa y OHIb (índices de minerales que contienen OH⁻), KLI (índice de la caolinita), ALI (índice de la alunita), CLI (índice de la calcita), QI (índice del cuarzo), CI (índice de carbonatos), SI (índice de contenido total de sílice).

La imagen ASTER que se utilizó fue la corregida atmosféricamente, a fin de trabajar con datos de reflectancia. Con la librería espectral propia del Distrito Minero Castaño Nuevo, se procedió a la clasificación SAM, utilizando un valor de *threshold* de 0,10 radianes y superponiendo los resultados sobre una imagen en escala de grises de la banda 2 (Figura 5.10). Para poder apreciar correctamente se realizaron mapeos por grupos de minerales.

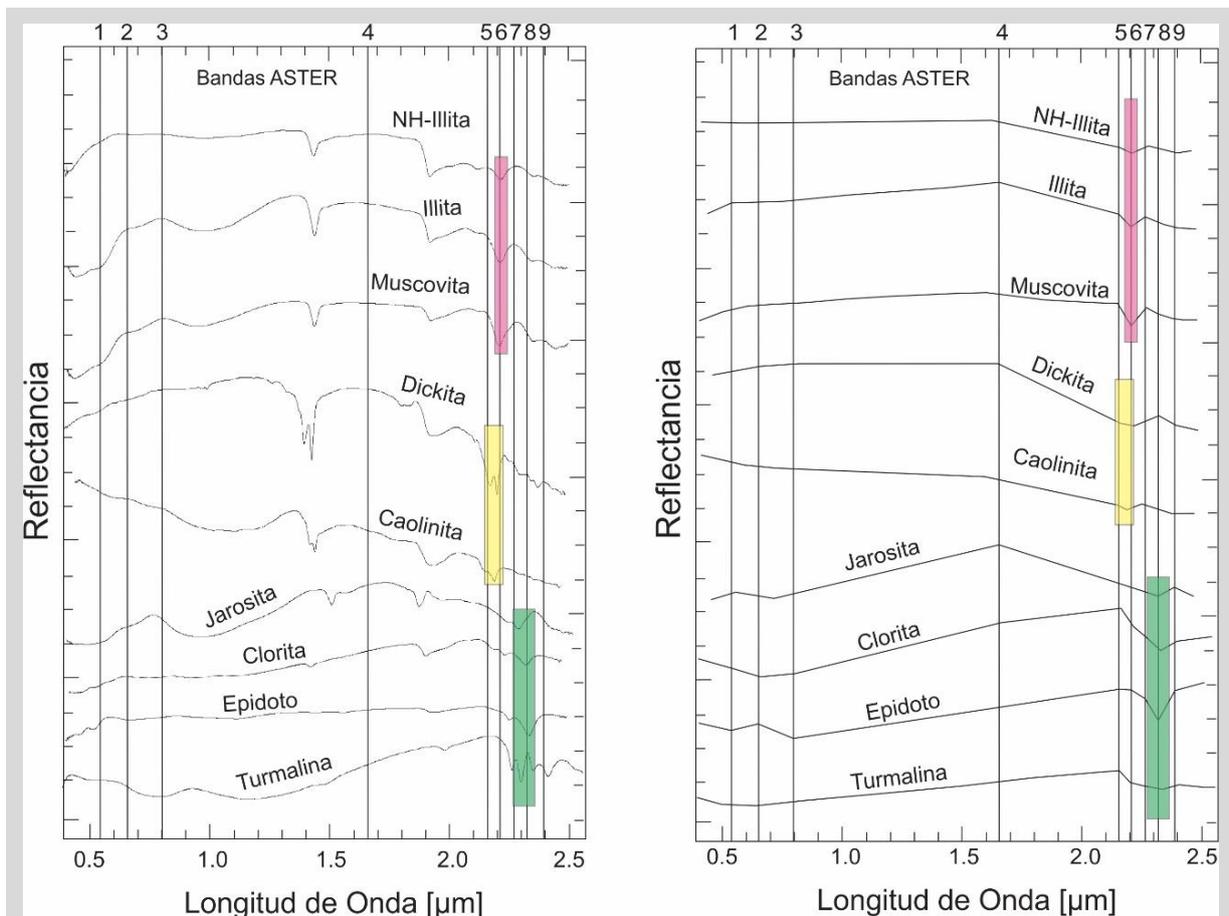
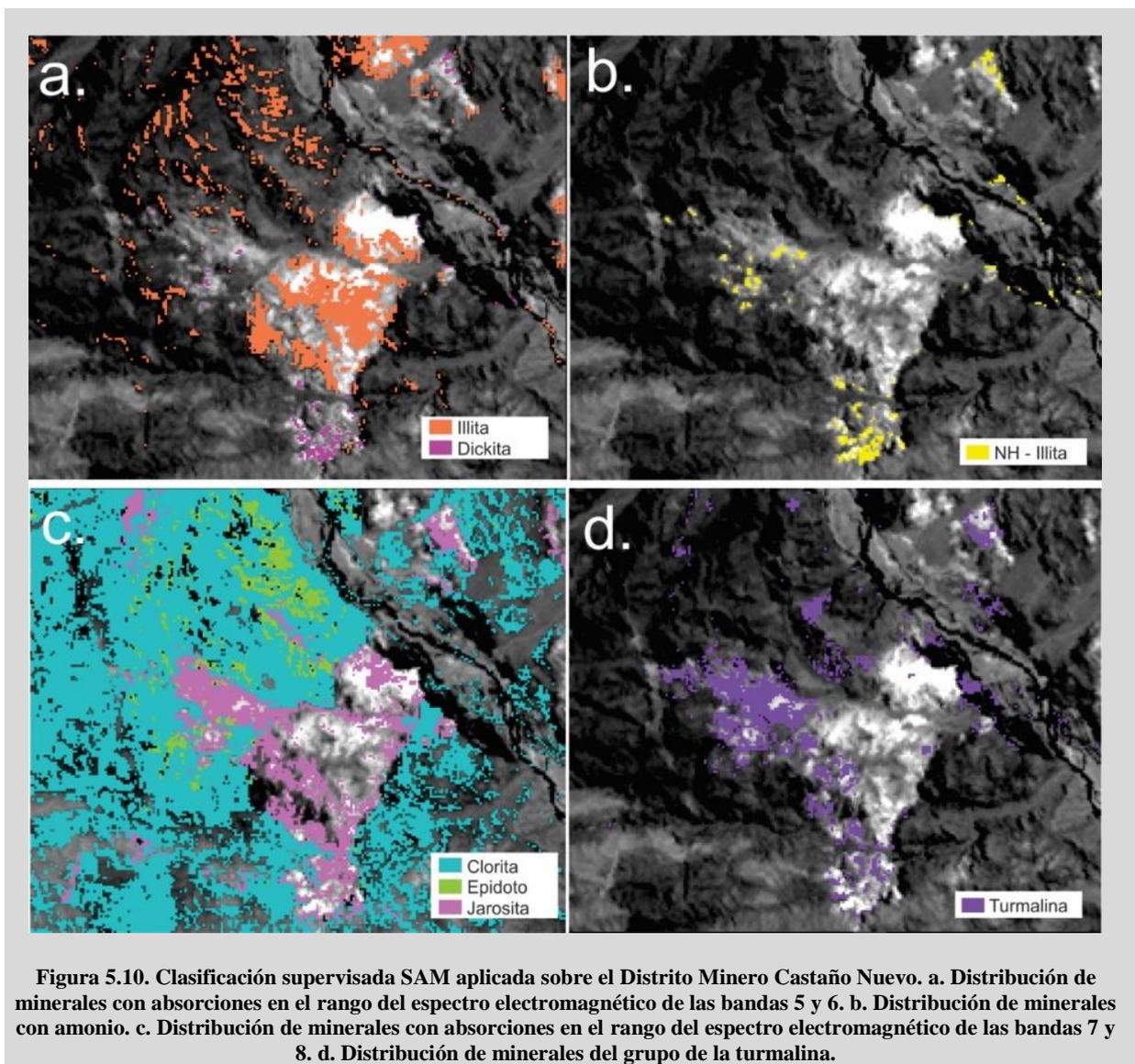


Figura 5.9. a. Espectros obtenidos mediante el uso de un espectrómetro portátil Terraspec® 4Hi-Res. b. Los mismos espectros re-muestreados a la resolución ASTER. En rosa se marcan las absorciones asociadas a la región del espectro de la banda 6, en amarillo las absorciones asociadas a la banda 5 y en verde las relacionadas a la banda 8.

En la Figura 5.10.a se observa la distribución de los minerales que presentan rasgos de absorción en torno a las bandas 5 y 6. La aplicación de esta clasificación solo detectó la presencia de illita y dickita. La dickita se encuentra restringida al corredor NO-SE antes identificado, mientras que la illita se distribuye entre dicho corredor, el sector central donde predomina una fuerte silicificación y parte de los afloramientos de las andesitas (Unidad I) que contienen al sistema vetiforme. Por otro lado, se identificó la presencia del ion amonio en algunos espectros de illita y, al aplicar la clasificación SAM, se observa que este mineral está restringido al sector de alteración NO-SE, fundamentalmente en los extremos (Figura 5.10.b).

Los minerales con rasgos de absorción característicos entre las bandas 7 y 8 corresponden, en el Distrito Minero Castaño Nuevo, principalmente a clorita, epidoto y jarosita. La distribución de los mismos se muestra en la Figura 5.10.c, donde puede apreciarse el predominio de clorita en las rocas localizadas al norte y sur de los sectores alterados y que corresponden a las andesitas de la Unidad I y a las rocas volcánicas riódacíticas de la Unidad III. Se identifica además la presencia de epidoto, concentrado en los afloramientos de la Unidad I donde se hospedan las vetas de cuarzo- adularia. Por otro lado, se destaca la presencia de jarosita asociada al corredor NO-SE y también a otras estructuras que limitan al sector central de la zona de estudio y que fueron identificadas en el Capítulo 3. Sobre los mismos sectores donde se distribuye la jarosita se observa la presencia de turmalina y su localización se muestra en la Figura 5.10.d.



5.5. Discusión y Conclusiones

El primer análisis a realizado en el sector del Distrito Minero Castaño Nuevo, fue la comparación entre el uso de imágenes Landsat y ASTER. Anteriormente, los trabajos publicados por Delendatti (2003, 2005) si bien demostraban la gran utilidad de la técnica de sensores remotos, tenían como limitante la baja resolución espacial y espectral de las imágenes utilizadas, lo que provocaba algunas interpretaciones difusas y llevaban a comparar con otros sistemas aledaños que no comparten las mismas características del sistema en estudio.

La utilización de diferentes metodologías como las presentadas en este capítulo permitió discriminar de manera bastante certera diferentes litologías, pese a las similitudes composicionales como sucede en el Distrito Minero Castaño Nuevo. El uso y análisis de datos del sensor multiespectral ASTER en la zona de estudio, ha permitido establecer una correspondencia entre las diferentes respuestas obtenidas y el mapa confeccionado a partir del levantamiento geológico y estructural presentado en el Capítulo 3.

Las combinaciones simples de bandas, en particular aquellas que involucran bandas de los dos subsistemas (VNIR y SWIR) permiten hacer una rápida diferenciación de las unidades y grandes estructuras, como con la combinación 461 (Figura 5.4.c) y 731 (Figura 5.4.d). De igual forma, los cocientes simples entre bandas como el 2/1 (Figura 5.5.a) muestra a los diferentes tipos litológicos con claridad. Por otro lado, cocientes como el 4/6 permite acotar la localización de minerales con OH⁻ dentro de su estructura y, de ese modo, delimitar zonas con alteración hidrotermal de tipo argílica o fílica (Figura 5.5.b). Resulta claro, a partir de la observación de estas imágenes, que la alteración está controlada por una serie de estructuras, de las cuales se destaca una que define un corredor con orientación NO-SE dentro del cual se alinean los afloramientos con alteraciones hidrotermales.

Las relaciones entre bandas donde los minerales presentan una máxima reflectividad vs. máximas absorciones permite ahondar en los tipos de asociaciones de alteración hidrotermal predominantes. Es así que en las combinaciones RGB presentadas en la Figura 5.6 quedan delimitados con claridad sectores con predominio de minerales silíceos sílice ± micas blancas y sectores donde predominan arcillas como caolinita/dickita y sulfatos como la alunita. La aplicación de estos cocientes combinados en imágenes RGB ha sido de gran utilidad para definir zonaciones de alteración y seleccionar sectores para posteriores muestreos y ensayos. De este modo, se localizaron los sectores con mayor predominio de minerales arcillosos dentro del corredor NO-SE antes definido, mientras que las asociaciones de tipo silíceos sílice ± micas blancas se concentran en la porción central del área estudiada.

En cuanto a los Índices Mineralógicos de Ninomiya para la región del SWIR, las respuestas fueron contundentes para el caso de los índices de OHI_a y KLI (Figuras 5.7.a y c), permitiendo acotar la presencia de minerales como caolinita y/o dickita en determinados sectores dentro del corredor NO-SE delimitado con las imágenes anteriores. El índice de alunita ALI no arrojó resultados positivos en

ninguna porción de la imagen, hecho que puede interpretarse como la ausencia de este mineral en cantidades significativas. De igual modo el índice CLI no resulta de gran interés en este distrito, ya que sólo permite diferenciar los sectores donde aflora la Unidad II, los cuales se observan en color negro (Figura 5.7.e).

En cuanto a los Índices de Ninomiya para el TIR, se destacan las imágenes generadas para los índices QI y SI (Figuras 5.7. f y h) donde se delimitan exclusivamente los sectores con fuerte silicificación, de manera independiente de la litología que los contiene.

La combinación de las técnicas detalladas anteriormente, permitió definir de manera parcial los tipos de asociaciones de alteración hidrotermal presentes en el Distrito Minero Castaño Nuevo. A partir de esa información, se realizó un muestro puntual y posteriormente se confeccionó una librería espectral para el sector estudiado, permitiendo la aplicación del método de clasificación supervisada SAM. Los resultados obtenidos mediante esta metodología mostraron de manera rápida la distribución de diferentes asociaciones de alteración hidrotermal (Figura 5.10).

Se identifica un corredor NO-SE, localizado en el sector occidental del área de estudio. A lo largo del mismo se disponen afloramientos de rocas fuertemente alteradas, correspondientes a andesitas de la Unidad I y, en menor medida, a rocas piroclásticas de la Unidad II. Sobre ese corredor, en la porción central la alteración predominante se caracteriza por la asociación illita + turmalina + jarosita, mientras que en los extremos la asociación de minerales que se presentan en mayor abundancia es dickita + NH-illita + turmalina + jarosita.

Fuera de ese corredor, se destaca un sector en la porción central del área de estudio donde la silicificación es el proceso predominante, aunque también se detectaron micas blancas. De este modo, se definió una asociación de minerales silíceos + illita para ese sector.

Los afloramientos al norte de estos sectores fuertemente alterados, corresponden a las andesitas de la Unidad I definidas en el Capítulo 3 y que resultan las rocas hospedantes de la mineralización vetiforme caracterizada por estructuras de cuarzo-adularia. En los afloramientos que contienen a las vetas se destaca una asociación clorita + epidoto + illita ± turmalina.

Finalmente, hacia el sur, donde afloran las rocas volcánicas denominadas Unidad III, que en afloramientos se observan con escasa a nula alteración, sólo se distingue la presencia de clorita y escasa jarosita asociada a estructuras.

La utilización de imágenes de sensores remotos, en particular las ASTER, resulta una herramienta de suma utilidad para los relevamientos de base de cualquier sector afectado por hidrotermalismo. La resolución espacial y espectral de estas imágenes, en conjunto con el fácil acceso y descarga de las mismas, resulta en un trabajo rápido, eficaz y de muy bajo costo para la identificación de sectores de posible interés económico. Asimismo, permite abarcar grandes áreas con una buena definición y discriminar litologías contrastantes, así como también diferentes asociaciones minerales que podrían definir un depósito.

La aplicación de esta herramienta en el Distrito Minero Castaño Nuevo resultó en la confirmación de las respuestas diferenciales de las distintas litologías definidas previamente en el área y en sectores aledaños, así como en la delimitación de asociaciones de alteración hidrotermal con características particulares, que contribuyeron a la definición del depósito presente en el distrito estudiado.

5.6. Trabajos citados en el Capítulo 5

- Amri, K., Mahdjoub, Y. y Guergour, L. 2011. Use of Landsat 7 ETM+ for lithological and structural mapping of Wadi Afara Heouine área (Tahifet-Central Hoggar, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* 4: 1273-1287.
- Chuvieco, E. 1990. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones Rialp S.A. 453 p. Madrid.
- Corbett, G. y Leach, T. 1998. *Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization*. Society of Economic Geologists. Special Publication Number 6: 237 p. Chelsea, Michigan.
- Crosta, A.P. y McMoore, J. 1989. Enhancement of LANDSAT TM imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain. In *Proceedings of the 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*: 1173-1187. Environmental Institute of Michigan Calgary, Alberta.
- Delendatti, G.L. 2003. Caracterización de zonas de alteración hidrotermal en las márgenes del río Castaño, provincia de San Juan, mediante procesamiento digital de imágenes TM. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58: 97-108.
- Delendatti, G.L. 2005. Caracterización genética del complejo mineralizado Castaño Nuevo y su relación con el magmatismo Gondwánico en Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Juan (inérita), 213p. San Juan.
- Di Tommaso, I. y Rubinstein, N. 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews* 32: 275–290.
- Espina, R.G., Cegarra, M.I., Ragona, D., González, P. y Lo Forte, G.L. 1998. Hoja 3169-20 Castaño Nuevo, provincia de San Juan, Argentina, escala 1:250.000. Buenos Aires.
- Fujisada, H. 1995. Design and performance of ASTER instrument. *Proceedings Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Advanced and Next-generation Satellites*. Vol. 2583: 16-25.
- Guha, A. y Kumar, K.V. 2016. New ASTER derived thermal indices to delineate mineralogy of different granitoids of an Archaean Craton and analysis of their potentials with reference to Ninomiya's indices for delineating quartz and mafic minerals of granitoids—An analysis in Dharwar Craton, India. *Ore Geology Reviews* 74: 76-87.
- He, J., Harris, J.R., Sawada, M. y Behnia, P. 2015. A comparison of classification algorithms using Landsat7 and Landsat-8 data for mapping lithology in Canada's Artic. *International Journal of Remote Sensing* 36 (8): 2252-2276.
- Hunt, G.R. y Salisbury, J.W. 1971. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: II. Carbonates. *Modern Geology* 2: 23-30.
- Hunt, G.R. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics* 42: 501-513.
- Hunt, G.R. 1979. Near-infrared (1.3–2.4) μm spectra of alteration mineral - Potential for use in remote sensing. *Geophysics* 44: 1974-1986.
- Hunt, G.R. y Ashley, R.P. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology* 74: 1613-1629.
- Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzel, W.M., Lowers, H.A., Driscoll, R.L. y Klein, A.J. 2017. *USGS Spectral Library Version 7 Data*: U.S.

- Geological Survey data release. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ds1035>
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.B., Heidebreicht, H.K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J. y Goetz, A.F.H. 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS)-interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment* 44: 145-163
- Mars, J.C. 2018. Mineral and Lithologic Mapping Capability of WorldView 3 Data at Mountain Pass, California, Using True- and False-Color Composite Images, Band Ratios, and Logical Operator Algorithms. *Economic Geology* 113 (7): 1587-1601.
- Mars, J.C. y Rowan, L.C. 2010. Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance products for spectroscopic mapping rocks and minerals. *Remote Sensing of Environment* 114: 2011-2025.
- Merodio, J.C. 1985. *Métodos Estadísticos en Geología*. Asociación Geológica Argentina, Serie B, Didáctica y Complementaria, 13. 229 p. Buenos Aires.
- Ninomiya, Y. 2003. A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toulouse, Francia, pp. 1552-1554.
- Ninomiya, Y. 2004. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Proceedings Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Advanced and Next-generation Satellites VII*. Vol 5234: 180-190.
- Ninomiya, Y. y Fu, B. 2001. Spectral indices for lithologic mapping with ASTER thermal infrared data applying to a part of Beishan Mountains, Gansu, China. *Proceeding IGARSS*. pp. 2988-2990.
- Ninomiya, Y. y Fu, B. 2002. Quartz index, carbonate index and SiO₂ content index defined for ASTER TIR data. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan* 22: 50-61.
- Ninomiya, Y. y Fu, B. 2016. Regional Lithological Mapping Using ASTER-TIR Data: Case Study for the Tibetan Plateau and the Surrounding Area. *Geosciences* 6, 39: 1-52.
- Pérez, D.J., Azcurra, D., D’Odorico, P. y Sequeira, N. 2007. Mapeo de Alteración Hidrotermal con datos ASTER, en la región de La Coipa, Cordillera Frontal (31°45’S), Provincia de San Juan, Argentina. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Actas: 2095-2102. Florianópolis, Brasil.
- Rodríguez Fernández, L.R., Heredia, N., Gallastegui, G., Quesada, C., Robador, A., Marín, G., Cardó, R., 1996. Hoja 3169-14: Paraje Castaño Viejo. Escala 1:250.000. SEGEMAR. Buenos Aires.
- Rowan, L.C. y Mars, J.C. 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emissivity and Reflection Radiometer ASTER data. *Remote Sensing of Environment* 84: 350-366.
- Rowan, L.C., Mars, J.C. y Simpson, C.J. 2005. Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment* 99 (1-2): 105-126.
- Sillitoe, R.H. 1985. Ore-related breccias in Volcanoplutonic Arcs. *Economic Geology* 80: 1467-1515.
- Sillitoe, R.H. 1999. Styles of High-Sulphidation Gold, Silver and Copper Mineralisation in Porphyry and Epithermal Environments. *Pacrim ’99 Proceedings*, Bali, Indonesia: 29-45. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne.
- Swan, A.R.H. y Sandilands, M. 1995. *Introduction to Geological Data Analysis*. Blackwell Science, 446 pp. Oxford, Great Britain.
- Testa, F.J., Villanueva, C., Cooke, D.R. y Zhang, L. 2018. Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping of Epithermal, Porphyry and Tourmaline Breccia Districts in the Argentine Andes Using

“Caracterización geológica-estructural de las manifestaciones hidrotermales del Distrito Minero Castaño Nuevo, y su relación con el Magmatismo Gondwánico. Cordillera Frontal de San Juan, Argentina.” Lic. María Agustina Cócola

ASTER Imagery. *Remote Sensing* 10, 203:1-45.

Ye, B., Tian, S., Ge, J. y Sun, Y. 2017. Assessment of WorldView-3 Data for Lithological Mapping. *Remote Sensing* 9: 1132.

Capítulo 6: Sistemas Hidrotermales

6.1. Introducción

6.2. Metodología

6.3. Depósitos asociados a vetas de cuarzo/adularia

6.3.1. Descripción general

6.3.2. Estilo estructural

6.3.3. Caracterización del relleno de las vetas

6.3.3.1. Episodios y pulsos

6.3.3.2. Inclusiones fluidas

6.3.4. Distribución y zonación de los contenidos metálicos

6.3.5. Distribución de las alteraciones hidrotermales

6.4. Depósitos diseminados asociados a cuerpos de brechas y sílice residual

6.4.1. Descripción general

6.4.2. Descripción de los cuerpos

6.4.3. Distribución y zonación de los contenidos metálicos

6.4.4. Distribución de las alteraciones hidrotermales

6.5. Discusión e integración de los resultados

6.5.1. Sistema de vetas de cuarzo/adularia

6.5.2. Sistemas de brechas y sílice residual

6.6. Trabajos citados en el Capítulo 6

Capítulo 6: Sistemas Hidrotermales

6.1. Introducción

El Distrito Minero Castaño Nuevo comprende dos tipos de manifestaciones hidrotermales de tipo epitermal con características particulares, que permiten diferenciarlos y caracterizarlos independientemente. En el sector noreste se disponen vetas de cuarzo y adularia (\pm amatista \pm calcita), emplazadas en andesitas de la Unidad I. La mineralización de estos cuerpos se reduce a Au (\pm Ag) (Delendatti, 2005) y presenta numerosas labores subterráneas sobre veta. Este sistema vetiforme constituye el depósito de mayor importancia económica del distrito, explotado a fines del siglo XIX y explorado en diferentes etapas durante los últimos 20 años. La gran cantidad y extensión de labores subterráneas evidencian la importancia de este sistema. Las últimas campañas de exploración realizadas sobre este sistema no arrojaron resultados alentadores, es por esto que la correcta caracterización de las vetas es relevante para el desarrollo de las actividades prospectivas.

En la porción centro y sur del área de estudio se desarrolla un sistema de menor importancia económica, sobre el cual se realizaron escasos trabajos exploratorios. La mineralización es de tipo diseminada, con anomalías de Au, As, Hg y Bi, caracterizada por cuerpos de brecha, fuertemente silicificados y pequeños afloramientos de *vuggy quartz*. Este sector se identifica con una expresión superficial representada por una fuerte alteración hidrotermal, la cual se percibe desde las imágenes satelitales y fue identificada y descrita en los capítulos anteriores.

Los depósitos epitermales se asocian a ambientes magmático/hidrotermales dominados mayormente por un entorno volcánico vinculado al desarrollo de fallas extensionales (Hedenquist et al., 2000; Simmons et al., 2005). Estos depósitos se originan a partir de la precipitación de minerales desde soluciones acuosas con temperaturas entre 200 y 350°C, que circulan a profundidades no mayores a los 1000 m por debajo de la superficie (Hedenquist et al., 2000).

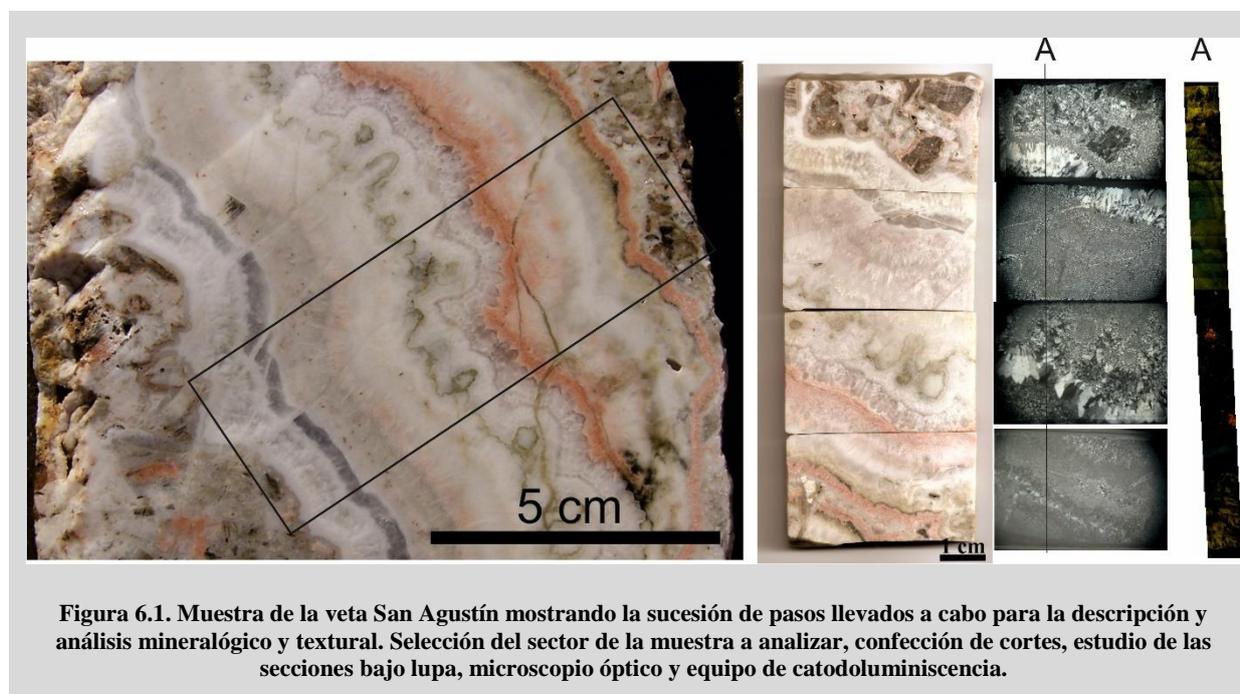
Estos tipos de yacimientos se forman en la corteza superior donde la dinámica de los fluidos es controlada por zonas de falla. La heterogeneidad dentro de un sistema de falla resulta en el desarrollo de zonas de apertura con mayor circulación de fluidos, que guardan una estrecha relación con las condiciones de presión, temperatura, geometría de la estructura, permeabilidad y características de las rocas hospedantes. Los cambios en alguno de estos parámetros resultan en la precipitación de minerales a partir de los fluidos circundantes y consiguiente relleno de los espacios abiertos, con características texturales y mineralógicas específicas (Simmons et al. 2005).

En el presente capítulo se detallan las características de los sistemas epitermales presentes en el Distrito Minero Castaño Nuevo, abordándolos desde diferentes aspectos que definen y controlan la localización de la mineralización.

6.2. Metodología

El análisis de los sistemas hidrotermales se llevó a cabo a partir de un mapeo de detalle de la morfología de los afloramientos y de las estructuras, tanto en superficie como en las antiguas labores subterráneas. Se tomaron mediciones de azimut y buzamiento, espesores reales y aparentes, en cada punto de observación. Sobre los planos de fallas se midieron ángulos de *rake* de estrías. El análisis cinemático y los cálculos fueron realizados mediante el *software* FaultKin 7 (Allmendinger, 2017).

Para el estudio de las variaciones texturales y mineralógicas se tomaron muestras en cada uno de los afloramientos de ambos sistemas, y en profundidad se analizaron la totalidad de los sondajes de diamantina realizados por la empresa *Troy Resources Ltd.* (ver en Capítulo 1, Tabla 1.1 y Figura 1.5). Las muestras fueron descritas bajo lupa binocular y, una vez establecidas las relaciones entre pulsos de relleno, reemplazo y alteraciones de las rocas de caja, se seleccionaron muestras para su estudio bajo microscopio óptico. Sobre cada una de las muestras se realizaron cortes para estudios petrográficos, de catodoluminiscencia y microtermométricos (Figura 6.1). Se efectuaron cortes petro-calcográficos y bipulidos en el Laboratorio de Petrotomía de la Universidad Nacional del Sur. Los mismos fueron estudiados mediante el empleo de una lupa binocular Leica MZ9 5 con analizador y una fuente de luz Leica CLS 100X. También se empleó un microscopio Leica DM750P de luz transmitida y reflejada, y un equipo de catodoluminiscencia CL8200 Mk5-2 acoplado a un microscopio Nikon Eclipse 50i, todos ellos pertenecientes al Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur.



Del sistema de vetas se seleccionaron muestras para análisis termométrico de inclusiones fluidas. El mismo se realizó en una platina de calentamiento-enfriamiento Linkam MDS 600, con un

rango de operación de -180° a $+600^{\circ}\text{C}$, equipada con un sistema de enfriamiento por nitrógeno líquido y una resistencia para calentamiento, instalada en un microscopio petrográfico Olympus BX50 con un objetivo Leitz UTK50/0.63. La platina fue calibrada con sustancias estándares puras como inclusiones naturales de CO_2 puro de Calanda-Suiza ($-56,6^{\circ}\text{C}$), agua destilada (0°C) y estándares con punto de fusión conocido del laboratorio Merck (70°C , 100°C , 135°C , 180°C , 200°C , 247°C , $306,8^{\circ}\text{C}$, 398°C). Para las mediciones microtermométricas se seleccionaron las inclusiones fluidas que no presentaran evidencias de escape de fluidos, estrangulamiento o decrepitación a fin de evitar lecturas que no representen el fluido original y valores que hayan sido modificados por fenómenos post-entrapamiento. Luego de las primeras lecturas se estableció una temperatura de -80°C para alcanzar el sobrecongelamiento (descartando la presencia de CO_2), y una máxima de 400°C para conseguir la homogenización de las fases. De este modo, se procedió a la obtención de las temperaturas de homogenización (T_h), temperaturas del eutéctico (T_e) y las temperaturas de fusión final (T_m). La temperatura de homogenización constituye la temperatura mínima de entrapamiento, es decir del fluido al momento de precipitar. La temperatura del eutéctico solo pudo apreciarse de manera segura en escasas inclusiones, arrojando valores entre -21° y -24°C , lo que sugiere un sistema $\text{H}_2\text{O} - \text{NaCl} - (\text{KCl})$, y es por esto que las salinidades fueron expresadas como porcentaje en peso de NaCl eq (Davis et al., 1990; Bodnar, 2003). Finalmente, el valor de salinidad del fluido fue obtenido a partir de la temperatura de fusión final (T_m), según la ecuación propuesta por Bodnar (1993).

Las alteraciones hidrotermales fueron estudiadas en primera instancia con un equipo de espectrometría de reflectancia infrarroja Terraspec® 4Hi-Res facilitado por la empresa *Troy Resources Ltd.* El espectrómetro utilizado registra valores de reflectancia desde la región del visible e infrarrojo cercano (VNIR) a la región del infrarrojo de onda corta (SWIR), abarcando desde los $0,35\ \mu\text{m}$ a los $2,5\ \mu\text{m}$ del espectro electromagnético. En superficie se efectuó un muestreo a lo largo de grillas separadas por 100 m, con un muestreo regular cada 20 m, intensificando en sectores de mayor interés y omitiendo sectores con relleno moderno. En el sector del sistema vetiforme, se efectuó un muestreo sistemático cada 5 m, y se incrementó la densidad en torno a las estructuras ($0,5$ a $1\ \text{m}$), a fin de detectar variaciones composicionales en las fases minerales y a su vez tener una correspondencia entre la alteración y los resultados de la química de canaletas realizada por la empresa *Troy Resources Ltd.* También se efectuaron lecturas sobre los sondajes disponibles. Se seleccionaron algunas secciones de las vetas Dios Protege y San Agustín y se realizó un muestreo cada 5 m a lo largo del sondaje, intensificando las lecturas alrededor de las estructuras mencionadas.

Las lecturas fueron obtenidas mediante el *software* RS³, visualizadas y corregidas mediante ViewSpect Pro y SpecMin, y finalmente procesadas e interpretadas mediante el empleo de TSG Pro y posterior chequeo con aiSIRIS. Los cálculos mineralógicos se efectuaron de acuerdo a las ecuaciones propuestas por Pontual (2010) y algunos algoritmos presentados por Sonntag et al. (2012), resumidos en la Tabla 6.1.

Parámetros Espectrales			
Nombre	Descripción	Algoritmos	Rangos
Grupo Mineral Dominante	Indica si la absorción dominante pertenece a un mineral con AlOH, FeOH o MgOH/CO ₃	$W 2275 \pm 75$	AlOH= $W 2160-2220 $ FeOH= $W 2230-2296 $ MgOH/CO ₃ = $W 2306-2365 $
Composición de las micas blancas	Distingue entre micas sódicas (paragonita), normal potásica (muscovita/illita) y férricas (phengita), a partir de la localización del rasgo en torno a los 2200	$W 2204 \pm 24$	Paragonita= $2180-2196 $ Muscovita/illita= $2200-2208 $ Phengita= $2210-2228 $
Cristalinidad de las micas blancas	Indica el grado de ordenamiento cristalino de las micas blancas, comparando la profundidad de absorción relativa entre los rasgos en 1900 nm y 2200 nm	$D AlOH /D H_2O $ $(D 2204 \pm 24) / (D 1910 \pm 30)$	$x < 1$ Baja Cristalinidad $x > 1$ Alta Cristalinidad
Proporción relativa de esmectitas	Permite estimar el predominio de minerales del grupo de las esmectitas por sobre otras fases minerales	$D H_2O /D 2150-2370 $ $(D 1910 \pm 30) / (D 2275 \pm 75)$	$x < 1$ Esmectita Subordinada $x > 1$ Esmectita Dominante
Cristalinidad de la caolinita	Indica el grado de ordenamiento cristalino de caolinita comparando los valores de reflectancia entre la posición 2180 nm y 2164 nm	$R 2180 / R 2164 $	$x < 1$ Baja Cristalinidad $x > 1$ Alta Cristalinidad
Composición de la clorita	Distingue entre Fe-cloritas y Mg-cloritas, y términos intermedios (FeMg-clorita)	$W 2255 \pm 15$	Mg-Clorita= $2240-2249 $ FeMg-Clorita= $2250-2256 $ Phengita= $2257-2265 $

Tabla 6.1. Parámetros espectrales calculados para las muestras del Distrito Minero Castaño Nuevo, de acuerdo a los propuesto por Pontual (2010) y Sonntag et al. (2012). W = wavelength position (valor de longitud de onda de la posición del rasgo de absorción); D = relative absorption depth (profundidad del rasgo de absorción en determinado valor de longitud de onda); R = reflectance (valor de reflectancia en determinado valor de longitud de onda).

Para confirmar la presencia de algunas de las fases minerales determinadas a partir del método de espectrometría de reflectancia, se empleó la técnica de difracción de Rayos X utilizando un equipo Rigaku Denki Max 3C, con radiación CuK α y monocromador de grafito, operado a 35kv y 15 mA (Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur). La interpretación de los resultados de difracción se realizó mediante el método Hanawalt (Hanawalt, 1986) empleando el *software* Jade v.6 (Materials Data Inc.).

Para la caracterización geoquímica de ambos sistemas se utilizaron los datos obtenidos y compilados por la empresa *Troy Resources Ltd.* Para los cálculos, los elementos cuyos valores se encuentran por debajo del límite inferior de detección, fueron reemplazados por la mitad del valor de dicho límite (Verbovšek, 2011). Por otro lado, para la estimación del valor umbral (*Threshold*) por encima del cual se consideraron anómalas las concentraciones de los elementos de interés, se empleó la fórmula $[Me \pm 2MAD]$ donde Me es la mediana de la población estudiada y MAD corresponde a la desviación absoluta media, calculada como la mediana del valor absoluto de cada valor x_i menos la mediana (Reimann et al., 2005; Reimann y Caritat, 2016). Las relaciones entre distintos elementos químicos fueron analizadas a partir de una matriz de Pearson y se clasificaron los coeficientes de correlación de acuerdo a los siguientes rangos: [0 – 0,4] correlación mala; [0,4 – 0,6] correlación moderada; [0,6 – 0,8] correlación buena; [0,8 – 1] correlación muy buena.

Los mapas, secciones transversales, longitudinales, imágenes rasters y demás material gráfico fue generado mediante el empleo de una licencia de MapInfo-Discover Pro, aportada por la empresa *Troy Resources Ltd.* El algoritmo de interpolación utilizado en ellos es el del Vecino Natural (Sibson, 1981). Este algoritmo encuentra al subconjunto de muestras más cercano al punto de consulta y aplica ponderaciones sobre éstas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor (Ledoux y Gold, 2006).

6.3. Depósitos asociados a vetas de cuarzo-adularia

6.3.1. Descripción general.

En el sector noreste del área de estudio se dispone un conjunto de vetas emplazadas en estructuras cuyas orientaciones varían entre N345° y N10°, buzantes al oeste y con una compleja historia de relleno que incluye múltiples eventos, la mayoría con proporciones variables de cuarzo y adularia. Las principales estructuras, explotadas hacia finales del siglo XIX, fueron denominadas desde aquellos años como San Agustín, San Pedro y Dios Protege (Figura 6.2). La edad de la veta Dios Protege fue establecida por medio de una datación K/Ar en adularia de 267 ± 6 Ma (Delendatti, 2005). Posteriormente, Grignola (2017) obtuvo edades Ar/Ar en adularia provenientes de dos muestras tomadas en la veta San Agustín, que arrojaron resultados de $265,9 \pm 2,1$ Ma y $267,0 \pm 2,2$ Ma.

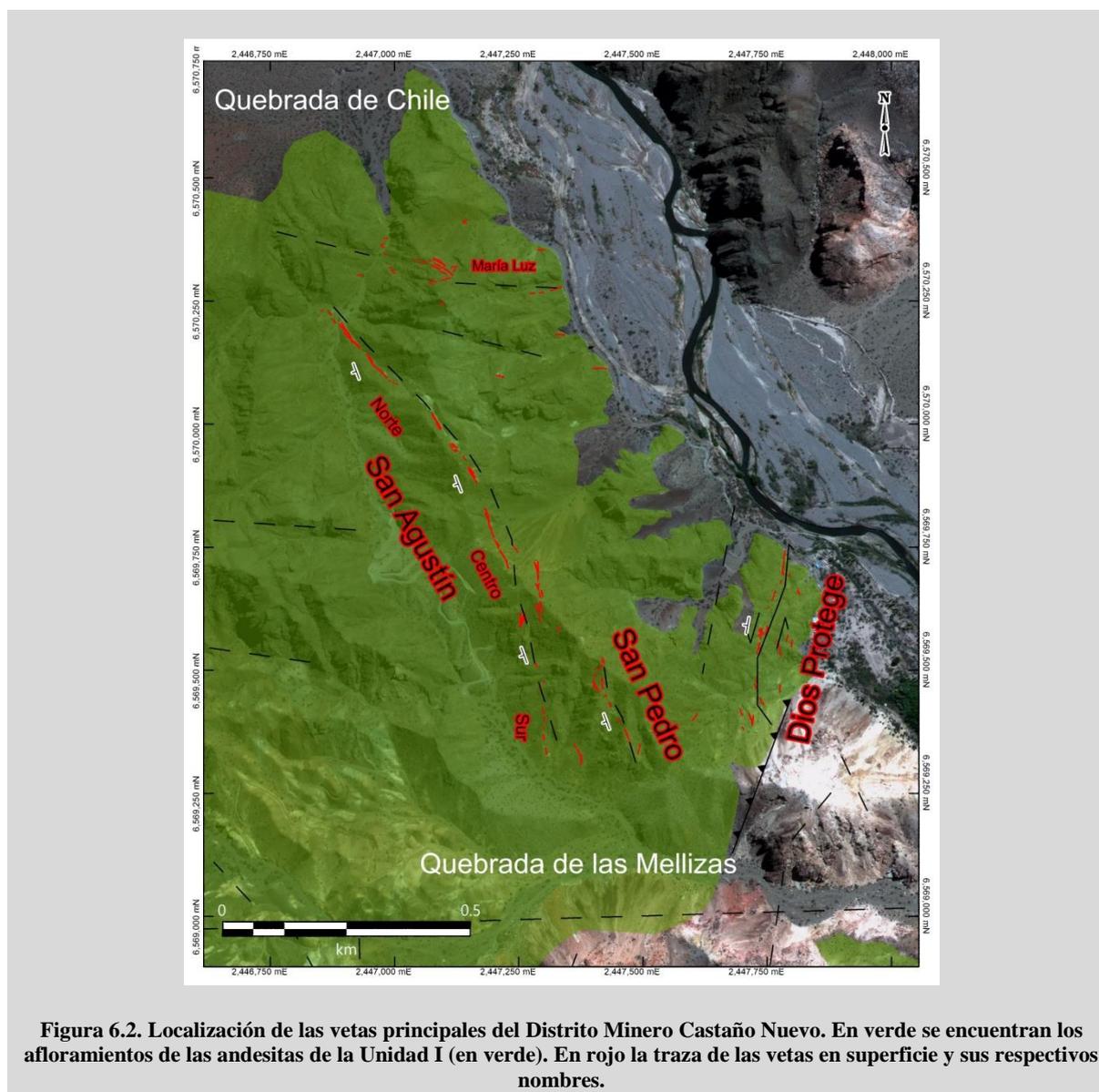


Figura 6.2. Localización de las vetas principales del Distrito Minero Castaño Nuevo. En verde se encuentran los afloramientos de las andesitas de la Unidad I (en verde). En rojo la traza de las vetas en superficie y sus respectivos nombres.

La veta Dios Protege constituye la estructura principal del Distrito Minero Castaño Nuevo (Figuras 6.2 y 6.3). Las altas leyes reportadas en los registros históricos (Hermitte, 1914) y su inmediatez a la planta de procesamiento, constituyen las razones fundamentales sobre las que se basa la importancia de esta veta. Sobre la misma se desarrollaron las labores más relevantes. En superficie aflora de manera discontinua con espesores variables entre 0,5 m y 2,5 m. El rumbo general es N10°. Los afloramientos son escasos, es por esto que las antiguas labores resultan de gran utilidad para llevar a cabo su estudio. Hacia el norte continúa su traza al otro lado del río Castaño, donde se aprecian dos labores subterráneas, aunque no es posible observar la veta en superficie ya que se encuentra por debajo de los abanicos terciarios (Figura 6.3). Hacia el sur, en superficie se encuentra parcialmente cubierta por el derrubio generado por la falla NE-SO que pone en contacto a la Unidad I con la Unidad II (Figura 3.25, Capítulo 3), aunque se observan varias estructuras subparalelas sobre la traza original de la veta principal, conformando un rasgo tipo cola de caballo (Granier, 1985).

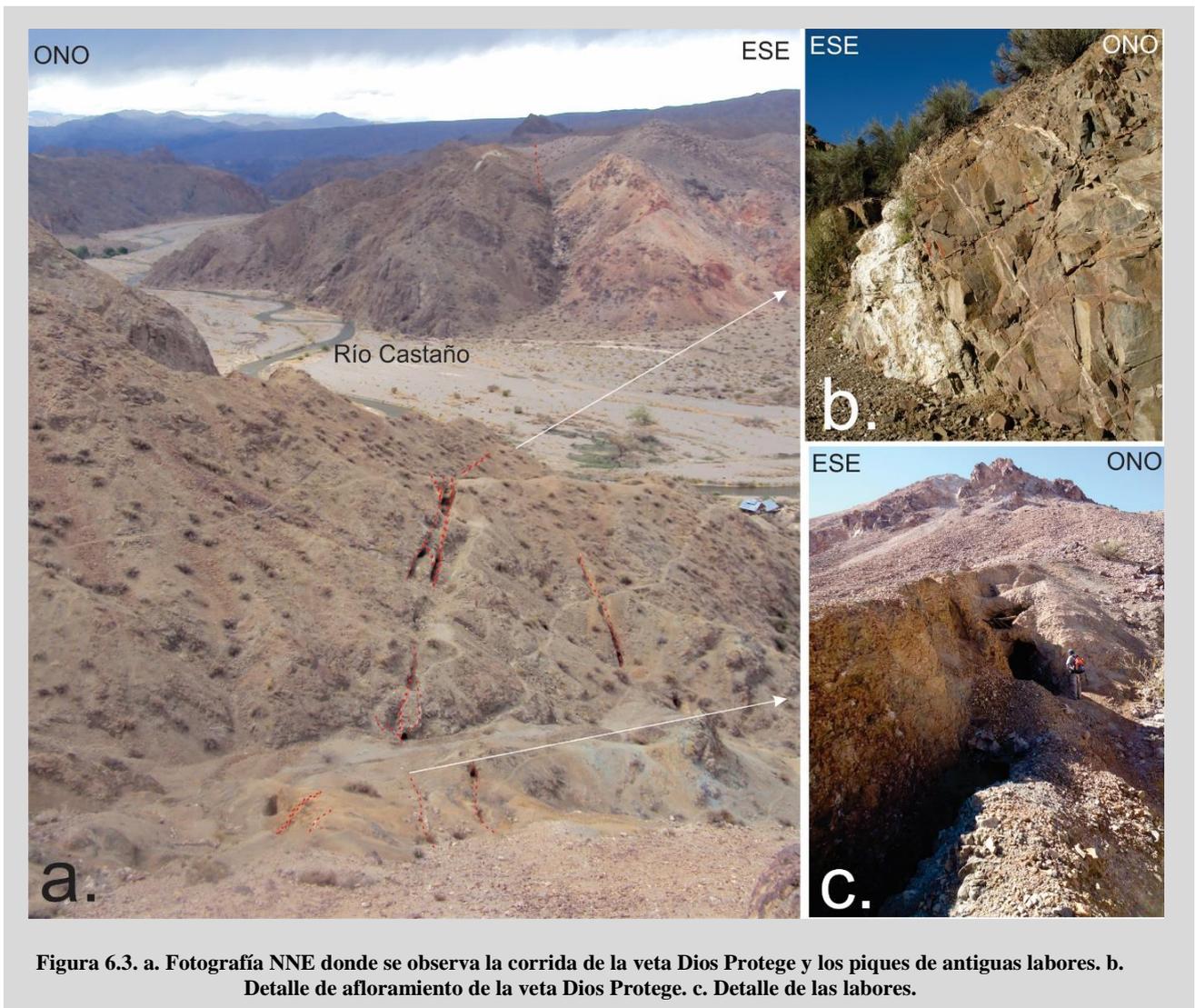


Figura 6.3. a. Fotografía NNE donde se observa la corrida de la veta Dios Protege y los piques de antiguas labores. b. Detalle de afloramiento de la veta Dios Protege. c. Detalle de las labores.

La veta San Pedro constituye una estructura de dimensiones inferiores a las otras del distrito, aunque presenta también dos importantes labores. La orientación en superficie es N340°, con espesores máximos de 0,8 m y una corrida en superficie de 200 m (Figuras 6.2 y 6.4). Al sur, se pierde debajo de depósitos modernos y hacia el norte se reduce a un venilleo cuya proyección se une con la veta San Agustín.

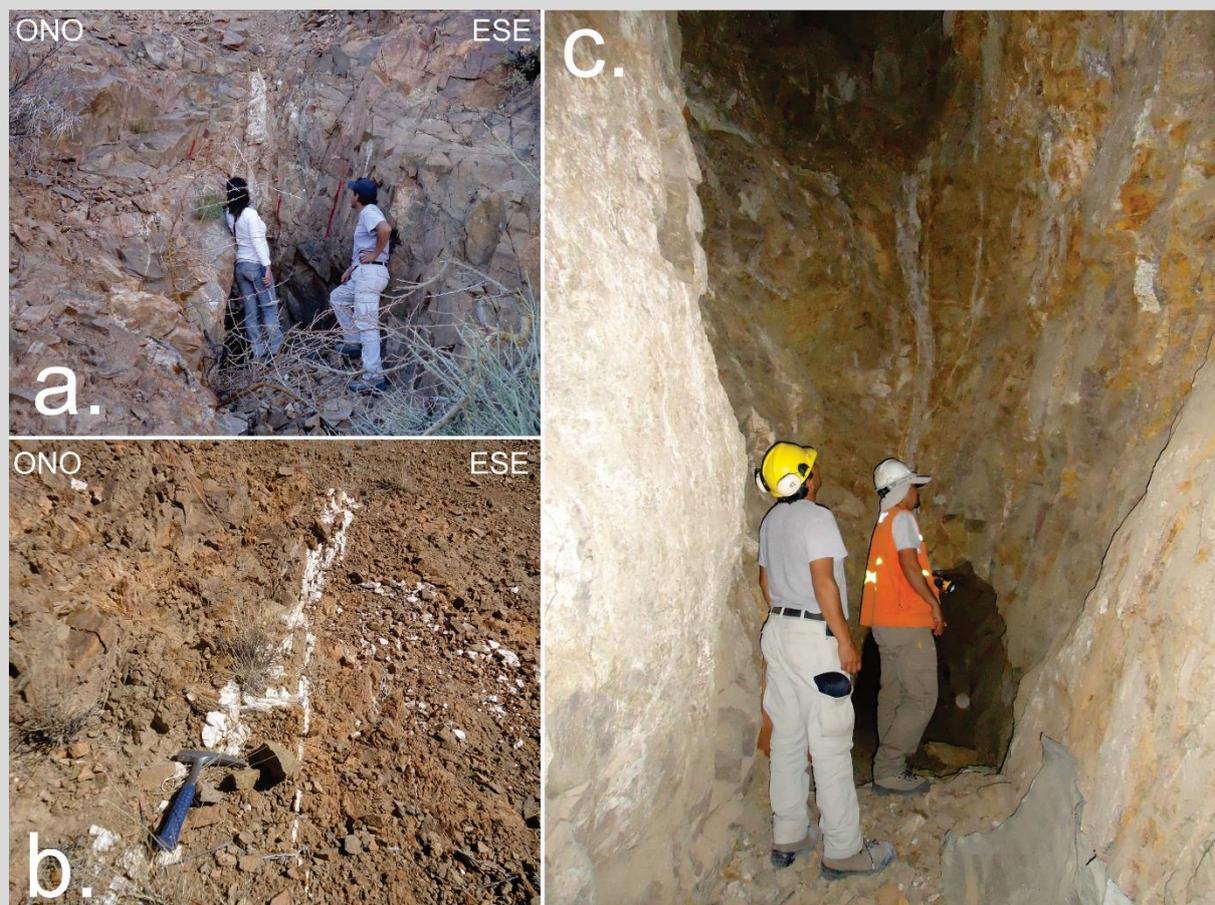


Figura 6.4.a. Bocamina de una de las labores de la veta San Pedro. b. Detalle de la veta de escaso espesor en superficie. c. Interior de una de las labores.

La veta San Agustín constituye la estructura con mayor recorrido en superficie, alcanzando 1000 m con una orientación aproximada NO-SE. Debido a su extensión, fue dividida a lo largo del rumbo en San Agustín Norte, Centro y Sur (Figura 6.2). El sector Norte presenta los máximos espesores (de 4 a 5 m), tiene una orientación N330° y los afloramientos se prolongan hacia el NO hasta la Quebrada de Chile. En ese sector se identifican, además vetas y venillas delgadas con orientación promedio N110° que se agrupan bajo la denominación de la propiedad minera que las contiene, María Luz. No fue posible establecer la relación entre la veta San Agustín y las estructuras de María Luz ya que la proyección en superficie de la intersección entre ambas está cubierta en la Quebrada de Chile. El sector central de la veta San Agustín presenta un espesor promedio de 2,5 m y concentra las labores subterráneas más

importantes realizadas sobre esta estructura. La orientación general en este sector es N345°. La estructura principal se bifurca (Figura 6.5) y vuelve a unirse en el sector sur. Allí, el espesor se vuelve escaso (menor a 0,5 m) y solo se observan labores subsuperficiales de escasos metros. Hacia el sur, la estructura tiene una orientación general N-S y se interrumpe en la Quebrada de las Mellizas cubriéndose con depósitos modernos.



Figura 6.5. Fotografías de la veta San Agustín en el sector central. a. Vista al sudeste del sector donde se bifurca la veta. b. Detalle del mismo sector. c. Afloramiento del sector norte donde los espesores se incrementan.

6.3.2. Estilo Estructural.

En el sector superior de la corteza terrestre, donde se forman los depósitos de tipo epitermales, predomina la deformación frágil, caracterizada por discontinuidades, zonas dilatacionales y desplazamientos a lo largo de fracturas de cizalla. La formación de este conjunto de elementos es la principal causa de la generación de permeabilidad estructural, fundamental para el desarrollo de este tipo de depósitos. Los planos contenidos en las zonas de fallas suelen tener diversos arreglos: en *echelon*, ramificados, anastomosados o entrelazados, escalonados hacia la izquierda o derecha, etc. (Davis y Reynolds, 1996). Estos patrones representan formas diferentes en el desplazamiento, siendo de mayor interés los sectores escalonados o con inflexiones, ya que constituyen puntos de concentración del

esfuerzo y, por consiguiente, de mayor permeabilidad estructural debido a fracturas que pueden actuar como canales que facilitan la circulación de fluidos (Curewitz y Karson, 1997).

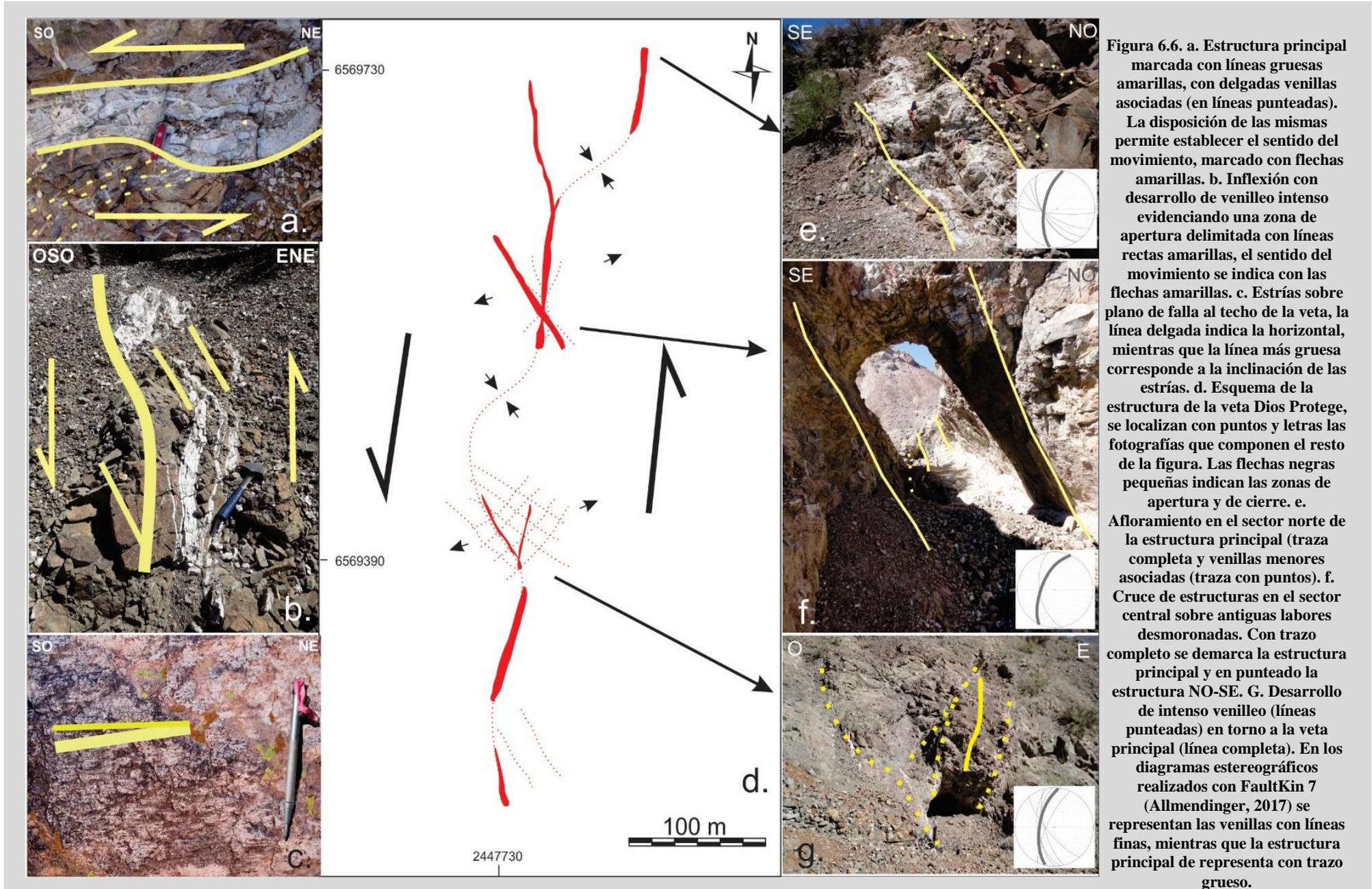
Sobre esta base, se procedió a la identificación de los rasgos estructurales característicos de cada una de las vetas. Se midieron orientaciones de venillas, planos de fallas y estrías, tanto en superficie como dentro de las labores a las que se pudo acceder. De este modo se estableció que cada una de las estructuras presenta características especiales y es por esto que se definen a continuación de manera individual. Parte de los relevamientos estructurales se llevó a cabo en conjunto con el equipo del CET (*Center of Exploration Targeting*, Universidad de Western Australia).

La veta Dios Protege constituye el relleno de una única estructura con rumbo general NNE (entre N350° y N25°) y una inclinación hacia el NO entre 60° y 75°. En afloramiento se observa discontinua, localmente ramificada, con una corrida que alcanza 600 m. Los mayores espesores (hasta 2,5 m) son coincidentes con los cambios en el rumbo y el cruce de la estructura principal NNE con otras menores N-S y NO-SE.

Esta estructura, muestra un desplazamiento siniestral-normal, con un movimiento de rumbo mayor al de la componente normal. El sentido del movimiento a lo largo de la veta/falla fue determinado por la geometría de la estructura y sus ramificaciones (Figura 6.6. a y b), en conjunto con la medición de estrías de falla sobre el techo.

Las estrías de falla en las paredes y dentro de la veta son comunes (Figura 6.6.c). En general presentan bajos ángulos de *rake*, entre 4° y 7° al sudoeste. Los resultados de los cálculos cinemáticos sugieren un eje de extensión subhorizontal (inclinado 9,4°) con rumbo N57°, y un eje de acortamiento inclinado 15° y orientado N149,6°. Debido a estos esfuerzos, en conjunto con la geometría irregular de la estructura, se desarrollan zonas de mayor apertura con alta densidad de fracturas. Estas zonas, denominadas *jogs* (Sibson, 1986) resultan de la vinculación entre dos estructuras paralelas pero separadas, con un incremento de la permeabilidad inducido por el fracturamiento y migración del fluido en los sitios de dilatación (Connolly y Cosgrove, 1999).

En el esquema de la figura 6.6. d puede apreciarse la tendencia general NNE de la estructura. Con flechas negras pequeñas se marcan los sectores de apertura y cierre a lo largo de la veta Dios Protege. En general, cuando la estructura se dispone NNE se registran los mejores espesores, al igual que los sectores donde se generan inflexiones hacia el SE, donde los espesores se incrementan al igual que la densidad de venillas. En algunos sectores se registra la intersección con fallas NO-SE que favorecen también el aumento de espesores y desarrollo de estructuras menores asociadas (Figuras 6.6. e, f y g). Cuando las inflexiones se producen hacia el SO, se generan zonas de compresión disminuyendo el espesor de la estructura hasta quedar representada por un delgado venilleo.



La veta San Pedro presenta escasos afloramientos. Constituye una estructura emplazada en una falla de tipo normal, con una componente menor de rumbo siniestral (Figura 6.7.a). La orientación general es N340° (Figura 6.7.b), en superficie los afloramientos son escasos y se reducen a venillas de hasta 0,20 m (Figuras 6.7. c y d). En el interior de los túneles se observa un incremento de los espesores hasta 0,80 m (Figuras 6.7. e).

Se reconocieron escasos planos de falla con estrías, todas ellas con un ángulo de *rake* entre 30° y 40°. La disposición de las venillas alrededor de la estructura principal indica un movimiento siniestral. Los cálculos cinemáticos sugieren un eje de extensión inclinado 20,9° con rumbo N43° y un eje de acortamiento inclinado 30,3° y orientado N120° (Figura 6.7.a).

La combinación de los datos estructurales y el registro de los cambios de espesores en una distancia vertical cercana a los 100 m, son consistentes con el desarrollo de zonas de apertura inclinadas en dirección al sudoeste. Este hecho también se confirma con la disposición y distribución de los antiguos túneles, los cuales se limitan a determinadas cotas, donde los espesores son máximos. Por encima y debajo de estas cotas la estructura se reduce considerablemente.

La veta San Agustín (Figura 6.8) a diferencia de las otras vetas, se observa continua a lo largo del rumbo con espesores máximos de 5 m en los sectores norte y centro. Hacia el sur los afloramientos son esporádicos y el ancho se reduce considerablemente (Figura 6.8.f). Los tres sectores en los que se subdivide la estructura presentan orientaciones generales diferentes en cada uno de los tramos (Figura 6.8.a). Entre cada uno de ellos se observa una interrupción en la continuidad de los afloramientos.

Si bien a lo largo de la corrida de la veta San Agustín se observan planos de falla que controlan la estructura, no fue posible identificar estrías sobre los mismos. Sólo en uno de los túneles pudo medirse un plano con estrías cuyo ángulo de *rake* corresponde a 62° hacia el noroeste. Por otro lado, las venillas en el techo y piso de la estructura son abundantes (Figuras 6.8. b y c), así como en el medio de los sectores donde la estructura se divide en dos vetas subparalelas (Figuras 6.8 d y e).

El ángulo de las estrías registradas permite establecer una fuerte componente normal en la falla que contiene a la veta San Agustín, mientras que la orientación de las venillas permite establecer una cinemática dextral. Ese venilleo se desarrolla extensamente en los sectores norte y centro, y está particularmente asociado a las zonas de máxima apertura (*jogs*), donde los espesores son mayores.

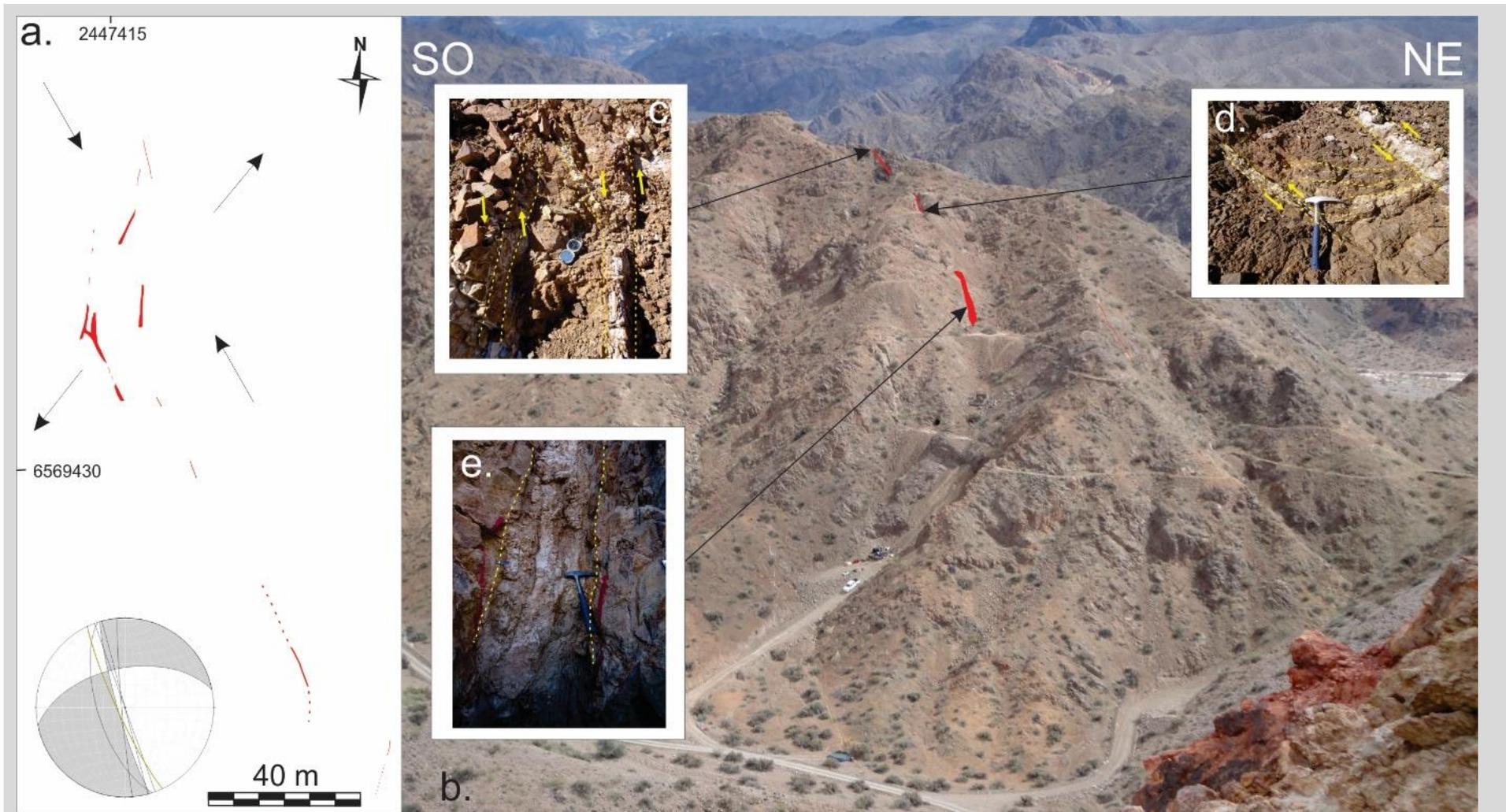


Figura 6.7. a. Mapa de afloramientos (en rojo) de la veta San Pedro. Con flechas negras se disponen los ejes de extensión y compresión calculados. En el estereograma se muestran los planos de falla y estrías medidos en el interior de las labores. b. Fotografía hacia norte mostrando la distribución de la veta San Pedro. c y d. Fotografías de detalle de los afloramientos donde puede apreciarse el espesor reducido y el sentido del movimiento de la estructura. e. Fotografía de la estructura en una labor sobreveta donde puede apreciarse el incremento de espesor.

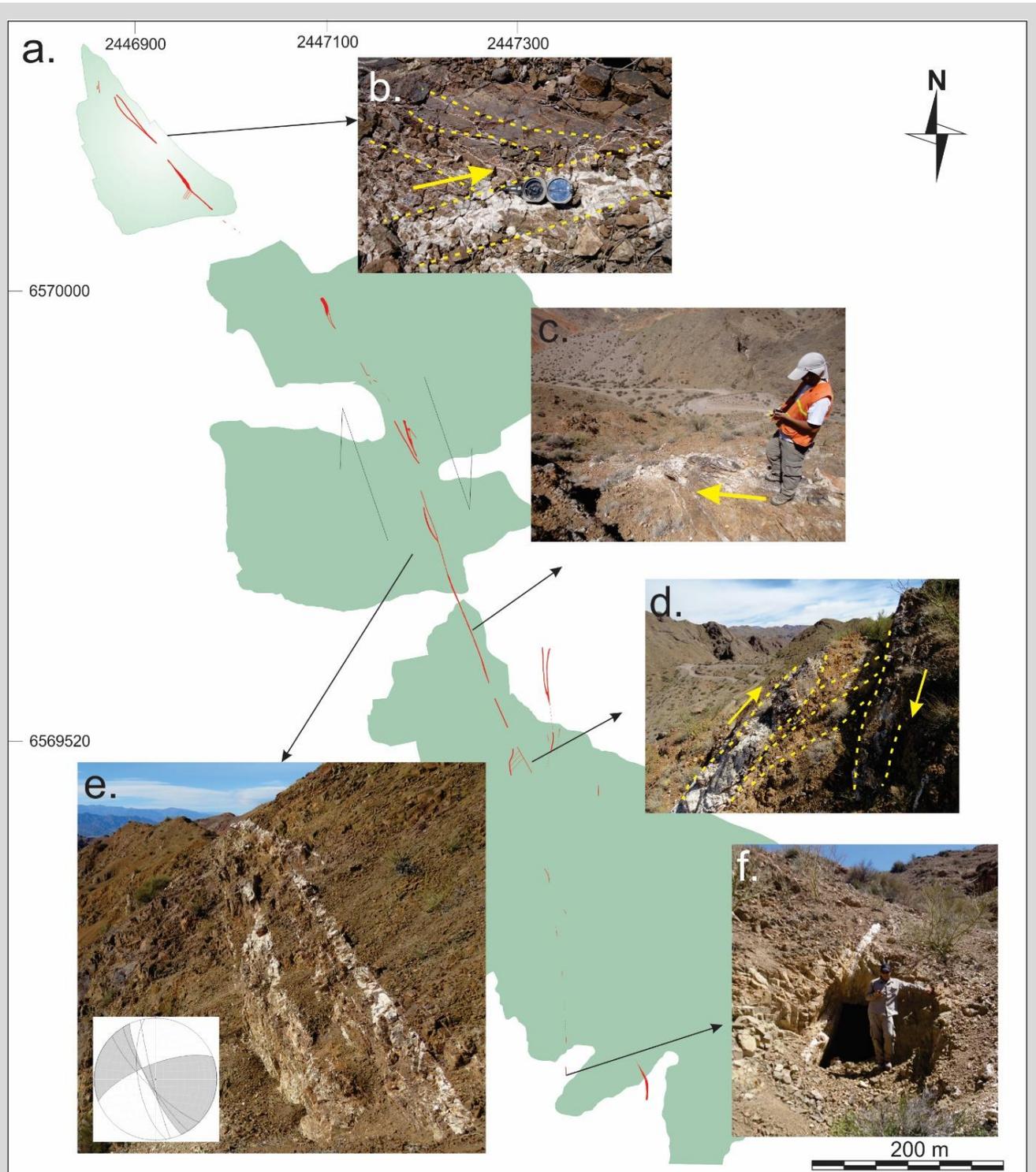


Figura 6.8. a. Mapa de superficie de la veta San Agustín, en verde se representan los afloramientos de las andesitas de la Unidad I. **b.** y **c.** Estructura principal con venilleo asociado evidenciando la componente dextral de la fractura. **d.** y **e.** Venilleo desarrollado en los sectores de apertura donde la veta se abre en dos prolongaciones. **f.** Bocamina en el sector sur, donde se aprecia el escaso espesor de la veta San Agustín en este tramo.

6.3.3. Caracterización del relleno de las vetas

6.3.3.1. Eventos y pulsos de relleno

En los depósitos epitermales de baja sulfuración, los minerales de mena y ganga varían lateral y verticalmente como consecuencia de fluctuaciones en temperatura, presión, composición del fluido e interacción con la roca hospedante (Hedenquist et al., 2000; Simmons et al., 2005).

En las vetas epitermales de baja sulfuración, el cuarzo es el mineral de ganga principal. Es por esto que las características de este mineral, su morfología, estructura cristalina, composición química y propiedades fisicoquímicas, reflejan diferentes condiciones hidrotermales durante el desarrollo de la veta (Dong et al., 1995).

Un método fundamental para caracterizar una veta de cuarzo consiste en el análisis de la morfología del cuarzo y sus agregados. Adams (1920) propuso un método de descripción detallada de las características morfológicas de los cristales de cuarzo al microscopio. Posteriormente, Dong et al. (1995) propusieron una clasificación basada no sólo en las características ópticas de cada mineral, sino también en los rasgos internos y relaciones geométricas entre los distintos agregados, y en los arreglos texturales que conforman.

Las tres estructuras evaluadas muestran una sucesión de eventos compleja, con múltiples pulsos de relleno y brechamiento. Cada uno de ellos presenta características mineralógicas y texturales específicas, y se observan relaciones de corte entre los mismos que permiten establecer su orden temporal. En general, las tres vetas contienen pulsos similares, con una alternancia de eventos equiparable entre cada una de ellas. Difieren en la proporción en que se presenta cada pulso, asociado a los distintos niveles evaluados para cada una de las vetas y a la localización a lo largo de la corrida de cada estructura en particular.

De este modo se estableció un modelo paragenético conformado por diferentes pulsos asignados a seis eventos principales de relleno (Cócola et al., 2019). En la figura 6.9 se muestra un esquema generalizado de estos eventos, donde se puede apreciar la relación entre los mismos y las fases minerales que los componen.

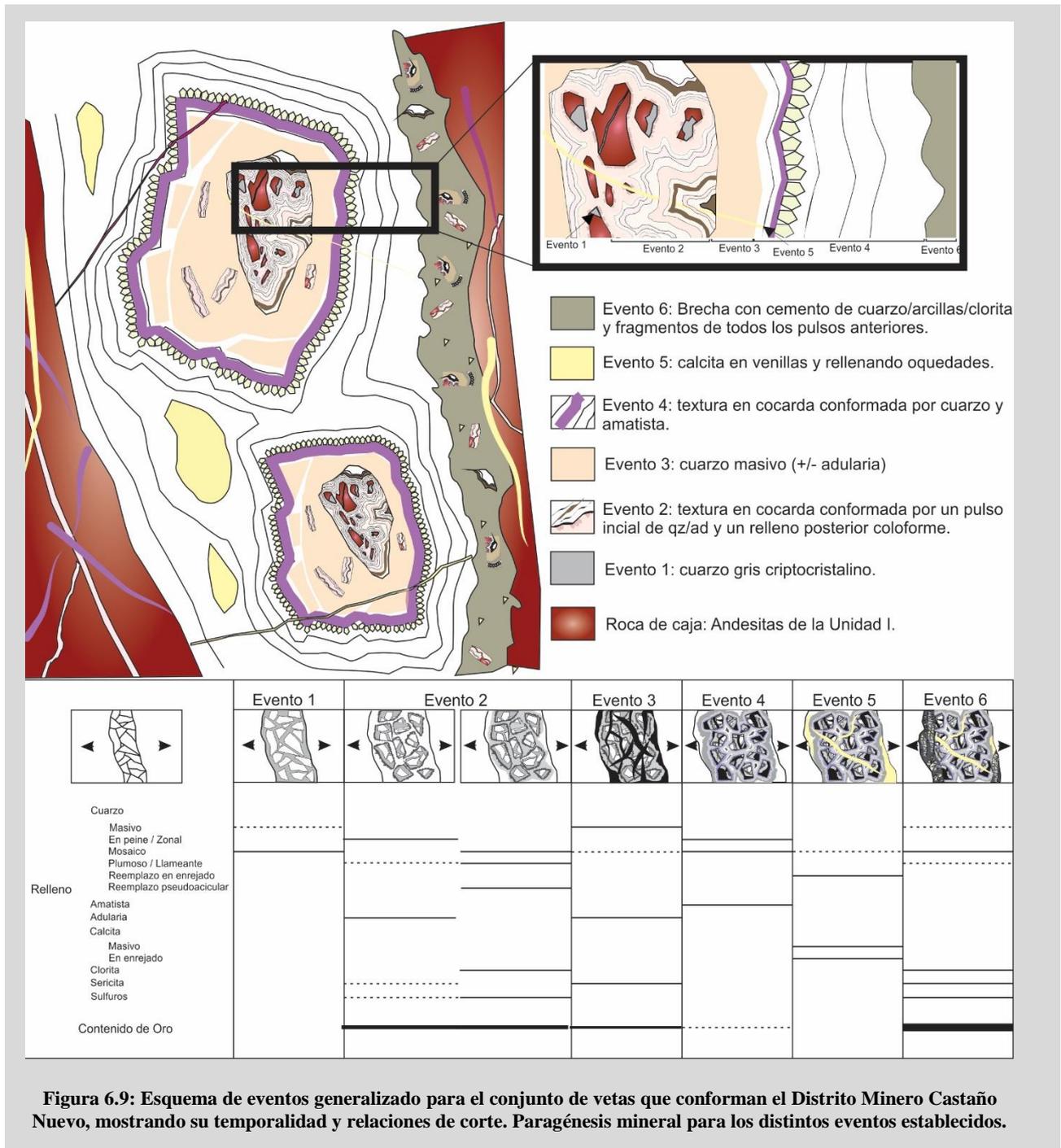


Figura 6.9: Esquema de eventos generalizado para el conjunto de vetas que conforman el Distrito Minero Castaño Nuevo, mostrando su temporalidad y relaciones de corte. Paragénesis mineral para los distintos eventos establecidos.

Primer evento (E1): corresponde a las instancias iniciales de apertura de la estructura, y, por consiguiente, la roca de caja tiene una gran participación. Sólo pudo identificarse *in situ* en un pequeño afloramiento en la veta Dios Protege y en el sector norte de la veta San Agustín. Se compone de un pulso de cuarzo gris criptocristalino que cementa los fragmentos de roca de caja y rellena delgadas venillas de hasta 5 mm (Figura 6.10.a). No se observaron minerales opacos asociados. En corte delgado se observa como delgadas venillas que cortan a los fragmentos de roca de caja, a su vez brechados por los eventos siguientes. Se compone de cuarzo en mosaico muy fino (Figuras 6.10.b y c) evidenciando recristalización de las fases originales.

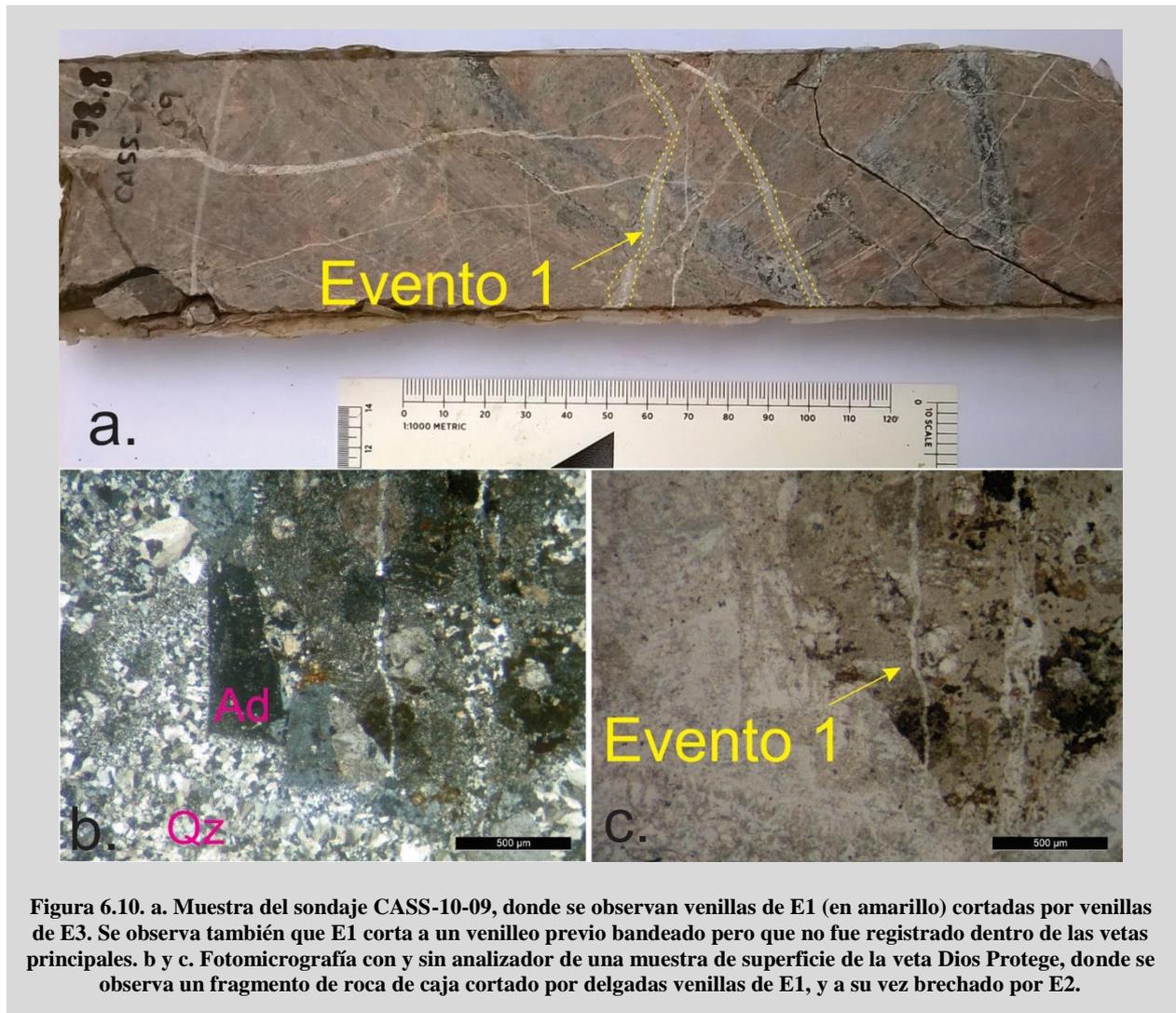


Figura 6.10. a. Muestra del sondaje CASS-10-09, donde se observan venillas de E1 (en amarillo) cortadas por venillas de E3. Se observa también que E1 corta a un venillo previo bandeado pero que no fue registrado dentro de las vetas principales. b y c. Fotomicrografía con y sin analizador de una muestra de superficie de la veta Dios Protege, donde se observa un fragmento de roca de caja cortado por delgadas venillas de E1, y a su vez brechado por E2.

Segundo evento (E2): se desarrolla en los sectores de mayor apertura dentro de las estructuras principales. Se compone de dos pulsos que cementan una brecha tipo cocarda, con fragmentos de la roca de caja y del evento anterior. El relleno de los espacios generados por el intenso brechamiento comienza con un pulso de cuarzo/adularia dispuesto en bandas gruesas, alternándose entre bandas con mayor proporción de adularia y bandas con predominio de cuarzo. Este pulso está caracterizado por grandes cristales de adularia del tipo subróbica (Dong y Morrison, 1995) de hasta 5 mm, que crecen a partir de los bordes de los fragmentos (Figura 6.11.a). Presenta un importante desarrollo en el sector norte de la veta Dios Protege, donde se registran los máximos espesores (Figura 6.11.b). De igual modo en el interior de los túneles de San Agustín se registra este pulso, conformando texturas en cocardas así como bandeados coloforne-crustiforme de gran espesor (Figura 6.11.c).

La adularia se encuentra en proporciones variables siendo más abundante en el contacto con los fragmentos de la roca de caja. En general, se observan cristales con macla simple, localmente en parrilla (Figuras 6.12. a), con moderada alteración a sericita (Cocola et al. 2011). Está acompañada por cristales de cuarzo de menor tamaño, con extinción levemente ondulosa y textura microplumosa en los bordes.

Cristales de pirita de hasta 100 μm se observan asociados a las bandas con mayor contenido de adularia.



El primer pulso de E2, anteriormente descrito, se encuentra rodeado por bandas finas blanco grisáceas y verdes, de hasta 5 mm de espesor (Figura 6.12.b). En sectores con mayor espacio libre, este pulso constituye bandeados coloforme-crustiformes. En las franjas verdosas se identifican finas bandas de material microcristalino subparalelas al bandeado general. Tanto las bandas blanco grisáceas como las verdosas se componen enteramente por cuarzo con texturas de recristalización tipo mosaico, (\pm plumosa y llameante). Localmente, se observan bandas con cristales de cuarzo con mejor desarrollo cristalino, pero igualmente recristalizados hacia los bordes. La alternancia de bandas queda evidenciada bajo el microscopio, por las diferencias de tamaño de los cristales de cuarzo (Figura 6.12.c).

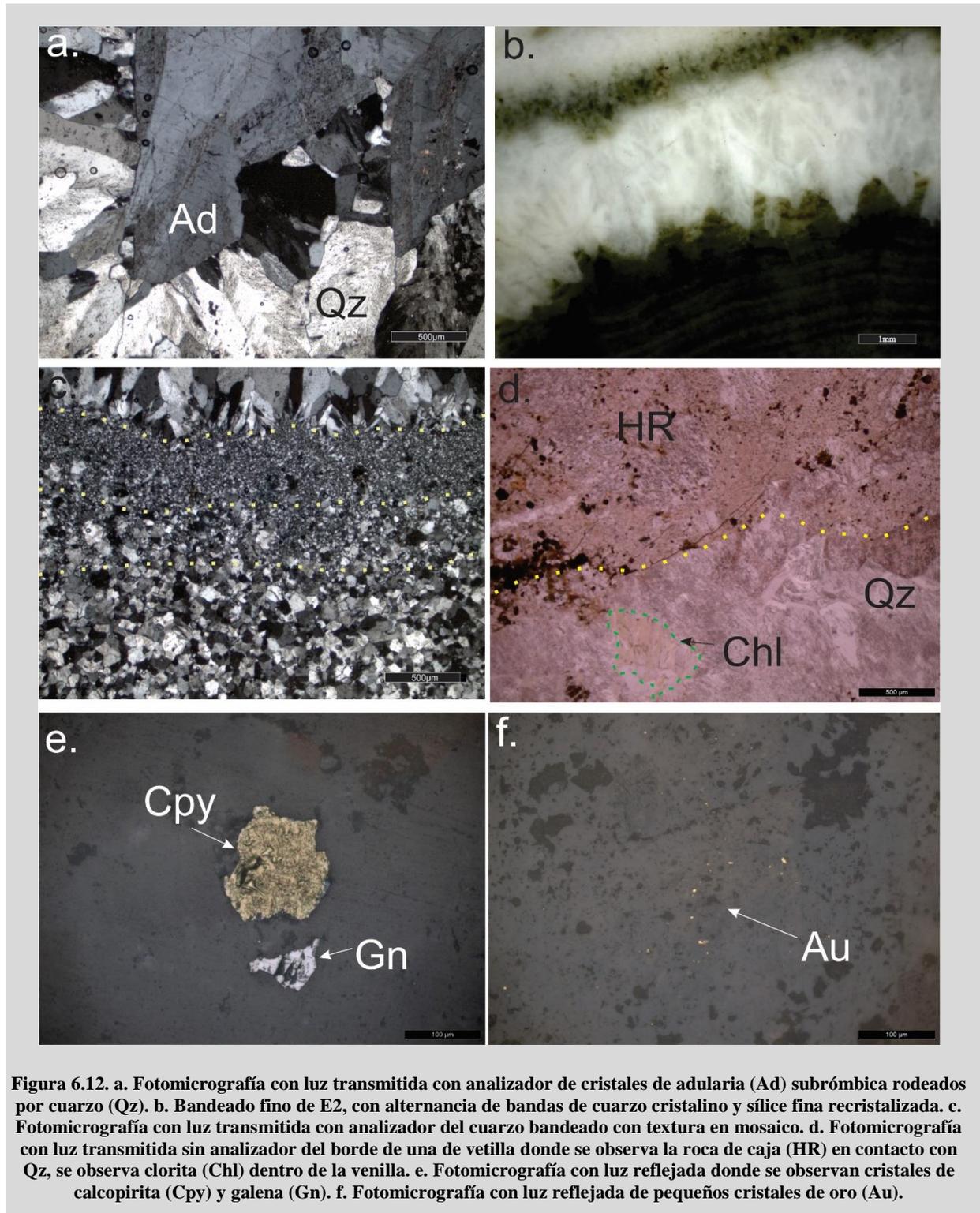
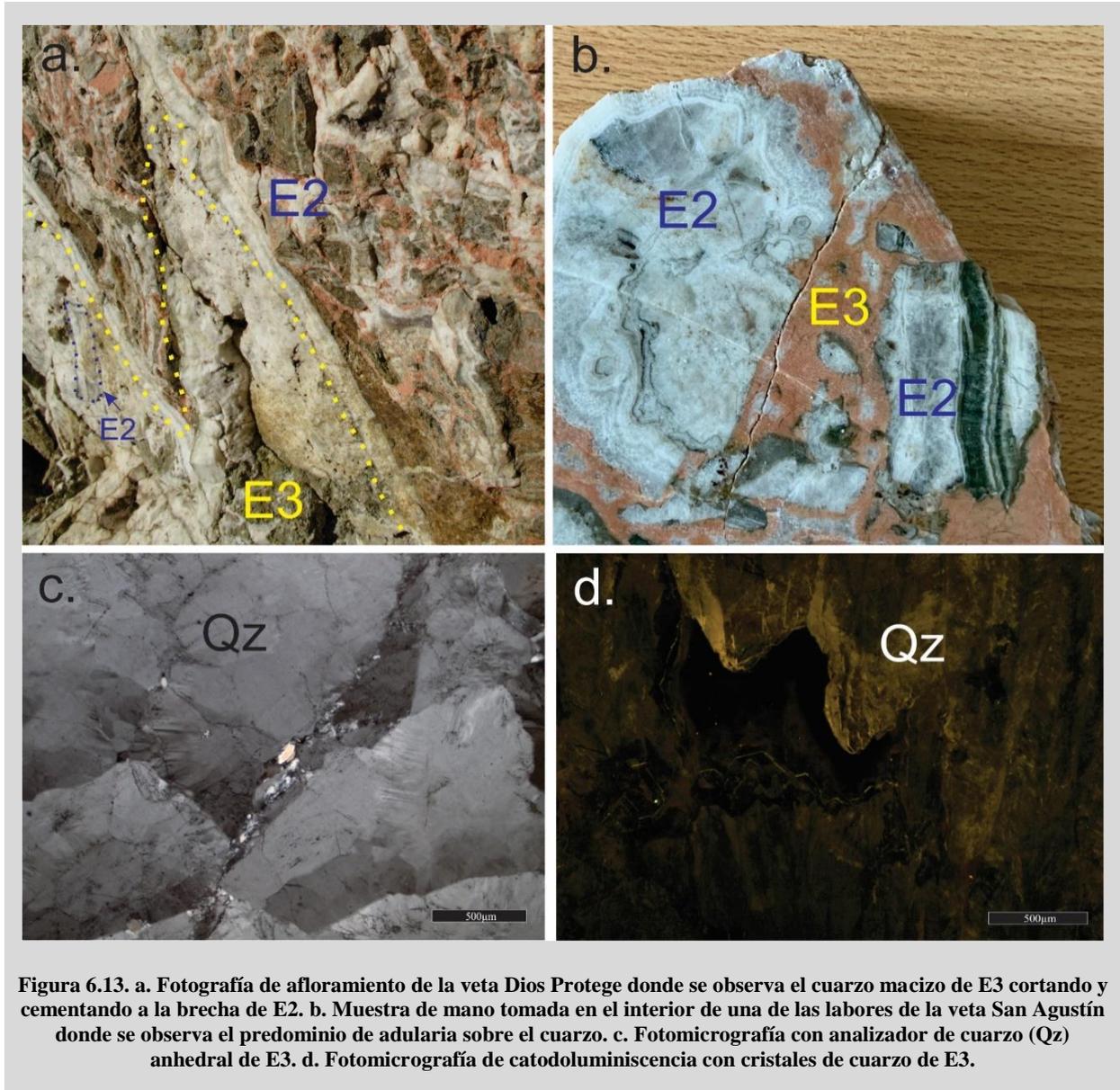


Figura 6.12. a. Fotomicrografía con luz transmitida con analizador de cristales de adularia (Ad) subrómica rodeados por cuarzo (Qz). **b.** Bandedo fino de E2, con alternancia de bandas de cuarzo cristalino y sílice fina recristalizada. **c.** Fotomicrografía con luz transmitida con analizador del cuarzo bandedo con textura en mosaico. **d.** Fotomicrografía con luz transmitida sin analizador del borde de una de vetilla donde se observa la roca de caja (HR) en contacto con Qz, se observa clorita (Chl) dentro de la vetilla. **e.** Fotomicrografía con luz reflejada donde se observan cristales de calcopirita (Cpy) y galena (Gn). **f.** Fotomicrografía con luz reflejada de pequeños cristales de oro (Au).

En algunos sectores se identifican agregados fibrosos/pseudoaciculares de cuarzo, con una distribución radial cuyo eje principal presenta una disposición perpendicular a la orientación de crecimiento de las bandas. Localmente, se observan filosilicatos relleno de oquedades, principalmente clorita (Figura 6.12.d) y en menor proporción sericita. En los límites entre algunas bandas de cuarzo se reconocen cristales de calcopirita, con galena subordinada (Figura 6.12.e), de grano fino, junto a escasos

cristales aislados de oro de tamaños reducidos (Figura 6.12.f).

El evento E2 presenta un *stockwork* asociado, con venillas rellenas de cuarzo/adularia con texturas en peine y crustiforme, alcanzando espesores de hasta 3 cm.



Tercer evento (E3): conformado por cuarzo (\pm adularia) se localiza en el centro de las estructuras y brecha hacia los bordes a los pulsos anteriores (Figura 6.13.a). Particularmente tiene gran desarrollo en los sectores donde las estructuras son más delgadas, en especial en los afloramientos de la veta San Pedro y Dios Protege. En la veta San Agustín, localmente se observa un pulso mayoritariamente de adularia que brecha y cementa a E2 y fue interpretado como parte de este evento (Figura 6.13.b).

El evento E3 caracterizado por un pulso de cuarzo blanco macizo con escasos cristales de adularia dispuestos al azar. Si bien se encuentra mayoritariamente como masas sin estructura aparente, localmente puede apreciarse un bandeamiento grueso. Al microscopio se compone de cristales

anhedrales de cuarzo de gran tamaño ($> 500 \mu\text{m}$), con extinción ondulosa (Figura 6.13.c y d), y texturas de recristalización en mosaico en los bordes y entre los intersticios de los grandes cristales. Se observan algunas arcillas entre los cristales, mayoritariamente caolinita y sericita (Figura 6.13.c). Venillas asociadas a este evento se extienden hacia el techo y piso de las estructuras y cortan a la roca de caja y al *stockwork* del evento E2.

Si bien en los cortes delgados estudiados no fue posible constatar la presencia de sulfuros o metales preciosos, se pudieron determinar valores anómalos mediante mediciones puntuales con un equipo de fluorescencia de Rayos X provisto por la empresa *Troy Resources Ltd.*

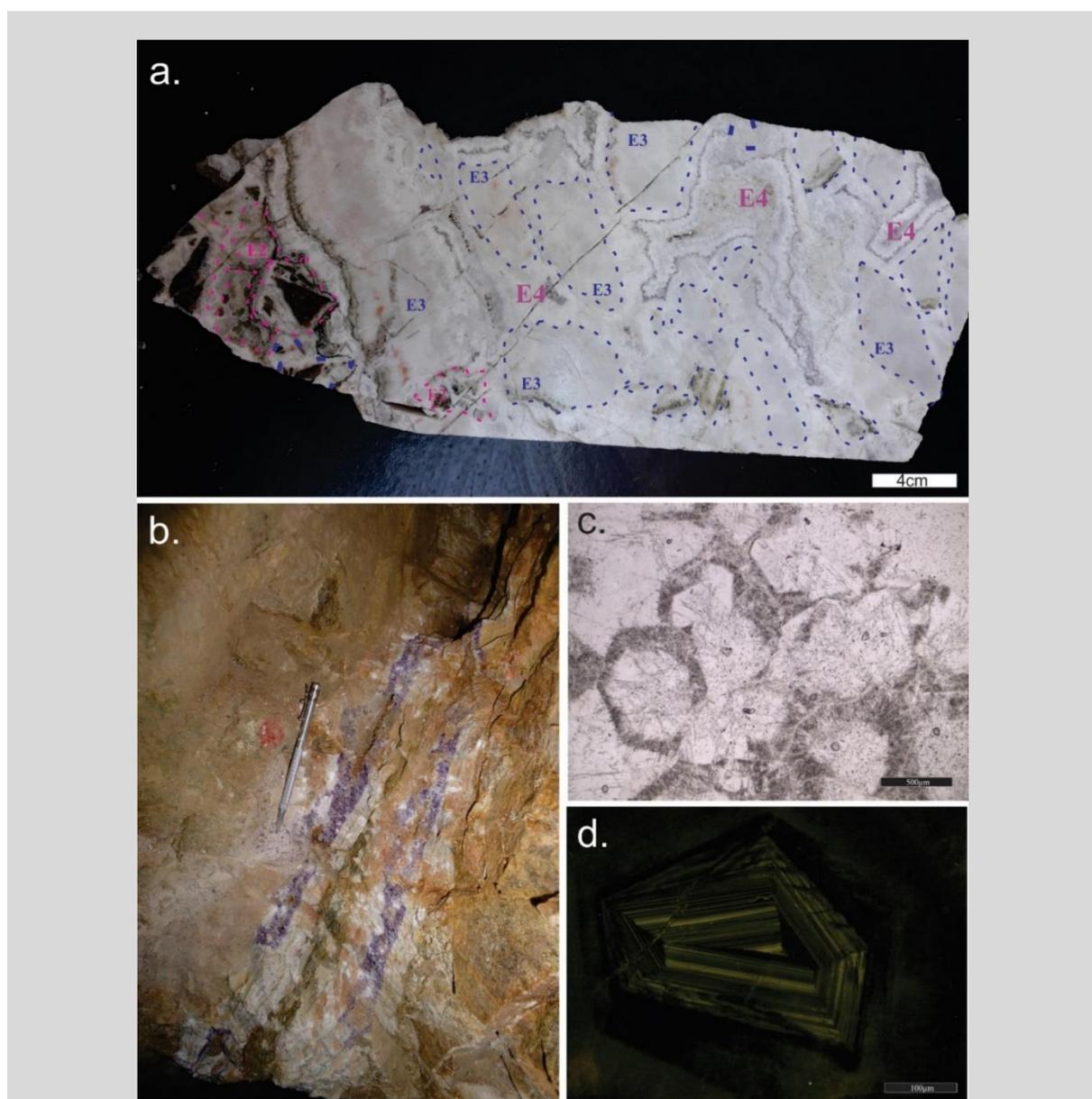


Figura 6.14. a. Muestra del interior del túnel principal de la veta Dios Protege donde se observan fragmentos de E2 brechados, cementados por E3, este último también brechado y cementado por E4. b. Venillas de amatista en el interior del mismo túnel. c. Fotomicrografía con luz transmitida sin analizador de cristales de amatista con zonación de E4 con abundantes inclusiones fluidas e impurezas demarcando estas líneas. d. Fotomicrografía de catodoluminiscencia de una sección basal de un cristal de amatista de E4 con líneas de crecimiento.

Cuarto evento (E4): brecha al evento anterior y presenta, como rasgo característico, abundante amatista dispuesta en finas bandas alternadas con cuarzo euhedral gris claro y como relleno de cavidades (Figura 6.14.a). Este evento tiene mejor desarrollo hacia el sector norte de la veta Dios Protege, donde además se constató la presencia de venillas de amatista (Figura 6.14.b), pertenecientes a este evento. En la veta San Pedro se registra en las labores subterráneas, mientras que en San Agustín no tiene gran desarrollo, solo se lo percibe en los afloramientos del sector central y dentro de los túneles, donde se reconocen venillas de amatista que serían asignables a este evento. Sin embargo, la relación de corte no es clara.

El desarrollo de texturas en cocarda constituye el rasgo principal, en este caso con bandas más finas, cristalinas y amatista como mineral principal, diferenciándose de este modo del evento 2. Los cristales de amatista muestran zonación y tienen abundantes inclusiones fluidas (en su mayoría monofásicas) siguiendo las líneas de crecimiento (Figura 6.14.c). Estas líneas se identifican claramente en las imágenes de catodoluminiscencia sobre las secciones basales de cristales individuales (Figura 6.14.d).

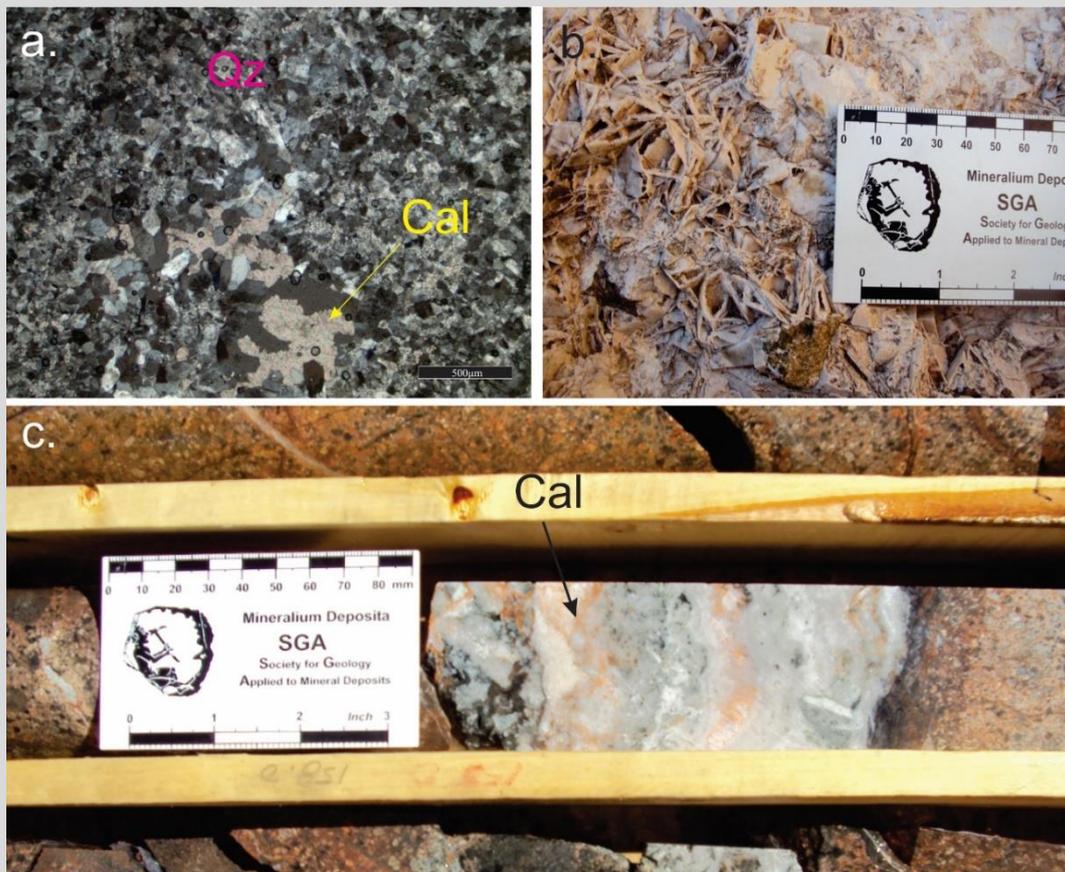


Figura 6.15. a. Fotomicrografía con luz transmitida con analizador de cristales de calcita (Cal) de E5 ocupando intersticios en medio de cuarzo (Qz) con textura en mosaico de E2. **b.** Fotografía de afloramiento de relleno de calcita con textura en enrejado, reemplazada por sílice, asignado al evento 5. **c.** Fotografía de sondaje de la veta Dios Protege donde se observa calcita en medio de la estructura interceptada.

Quinto evento (E5): está representado por venillas gruesas (de hasta 10 cm) y delgadas (menores a 5 mm) de calcita, que cortan las estructuras principales y a la roca de caja, incluyendo al venilleo de los eventos anteriores. También rellenan oquedades (Figura 6.15.a) y se observan en delgadas venillas en los cortes delgados. Se constató la presencia de textura en enrejado en el sector centro-sur de la veta Dios Protege (Figura 6.15.b) y en sondajes de la veta San Agustín centro, reemplazado parcialmente por cuarzo. En los sondajes de las vetas Dios Protege y San Pedro se observa calcita maciza (Figura 6.15.c) como relleno de fracturas irregulares, junto con cuarzo microcristalino asociado.

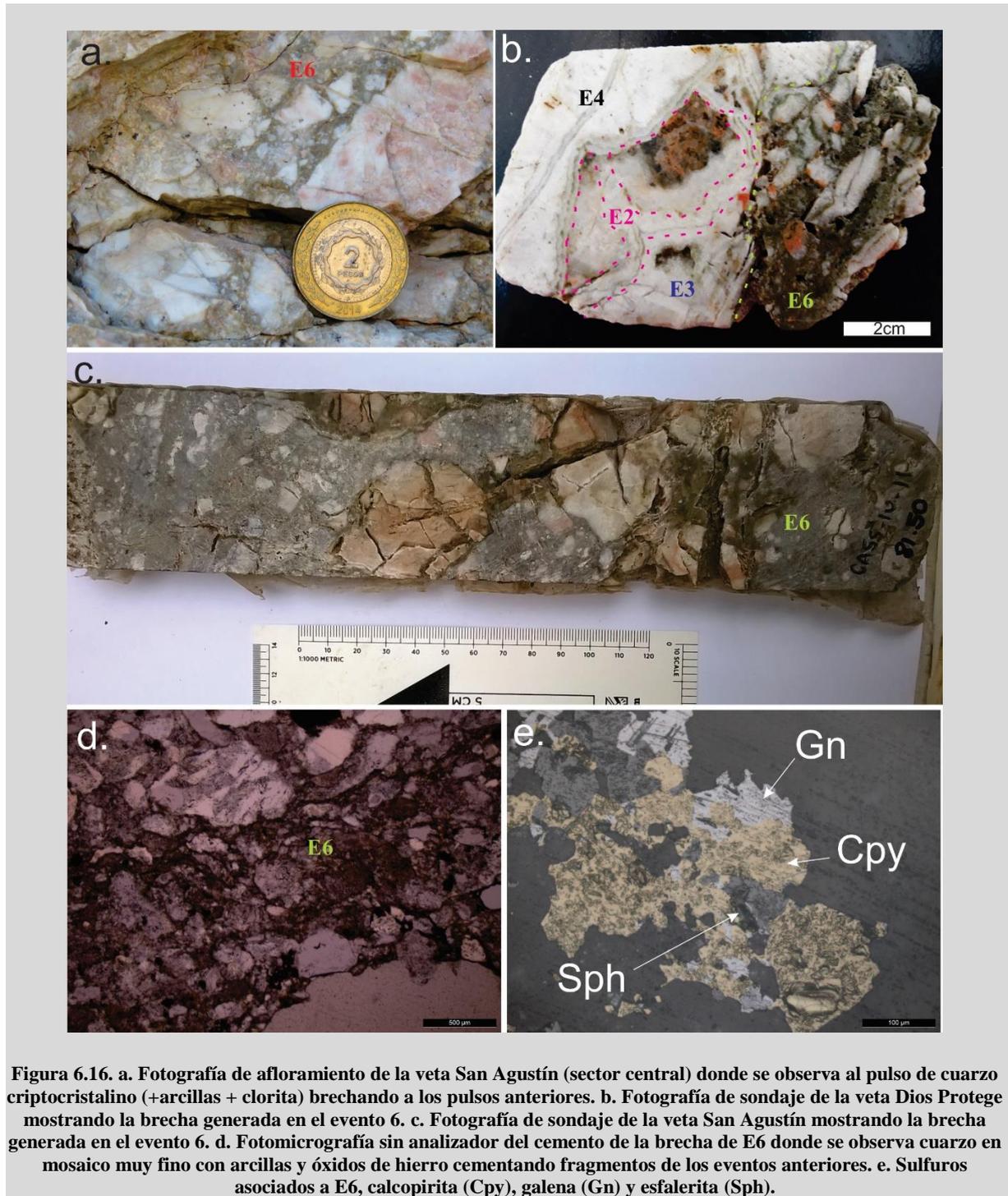


Figura 6.16. a. Fotografía de afloramiento de la veta San Agustín (sector central) donde se observa al pulso de cuarzo criptocristalino (+arcillas + clorita) brechando a los pulsos anteriores. b. Fotografía de sondaje de la veta Dios Protege mostrando la brecha generada en el evento 6. c. Fotografía de sondaje de la veta San Agustín mostrando la brecha generada en el evento 6. d. Fotomicrografía sin analizador del cemento de la brecha de E6 donde se observa cuarzo en mosaico muy fino con arcillas y óxidos de hierro cementando fragmentos de los eventos anteriores. e. Sulfuros asociados a E6, calcopirita (Cpy), galena (Gn) y esfalerita (Sph).

Sexto evento (E6): está formado por una brecha con fragmentos angulosos a subredondeados de diversos tamaños, asignables a todos los pulsos antes mencionados y una baja proporción de roca de caja (Figura 6.16.a). Corresponde al último evento con escaso desarrollo, pero con los mejores valores de Au y Ag, característica que comparten todas las vetas, y que fue constatado tanto en muestras de superficie como de sondajes (Figuras 6.16.b y c). Las proporciones de fragmentos vs. cemento son muy variadas, y en función de esta relación se observan brechas que pueden clasificarse como tipo *crackle* (mayor proporción de fragmentos, sin rotación de los mismos), mosaico (mayor separación entre fragmentos y leve rotación) y caóticas (mayor participación del cemento, clastos separados y rotados), las cuales se disponen tanto al piso como al techo de las estructuras (Woodcock y Mort, 2008). Los tamaños de los fragmentos son variados, desde escasos milímetros hasta 8 cm. El cemento pardo a gris verdoso, se halla conformado por cuarzo fino en mosaico (localmente se observan texturas plumosas), clorita, illita, arcillas finas y óxidos de hierro como pátinas y en microfracturas (Figura 6.16.c). Localmente se observan cristales de cuarzo con mayor desarrollo, pero en muy baja proporción. Se observan sulfuros de pequeño tamaño (<50 μm), principalmente calcopirita, galena y esfalerita diseminados en el cemento (Figura 6.16.e), mientras que el Au y la Ag se encuentran en tamaños muy reducidos dispuestos en pequeños *clusters* en dicho cemento.

6.3.3.2. Microtermometría de Inclusiones Fluidas

Con el objetivo de conocer las temperaturas y salinidades de los fluidos, se realizó el análisis de las inclusiones fluidas hospedadas dentro de minerales hidrotermales que rellenan las estructuras estudiadas. Se siguieron los criterios de Wilkinson (2001) para establecer la relación temporal entre las distintas asociaciones de inclusiones fluidas. Se seleccionaron muestras representativas de los eventos de relleno de las vetas Dios Protege y San Agustín. Se estudiaron muestras de superficie, de labores subterráneas y sondajes. Los eventos que pudieron ser analizados son el 2, 3, 4, y 6, evitando aquellos cristales que mostraran evidencias de intensa recristalización o que presentaran elevada cantidad de impurezas que imposibilitaran la visualización correcta de los fenómenos estudiados. La localización de las muestras seleccionadas para este estudio se exhibe sobre dos secciones longitudinales dispuestas en el Anexo I. Los minerales analizados corresponden a distintas variedades texturales de cuarzo y adularia de ambas vetas. Los tamaños de las inclusiones fluidas son variados, en promedio 30 μm alcanzando, en casos excepcionales, hasta 140 μm . Inclusiones fluidas monofásicas de múltiples tamaños y formas facetadas fueron registradas en gran proporción aunque, en general, predominan las inclusiones fluidas bifásicas con proporciones variables líquido:vapor. En función de los criterios de Goldstein y Reynolds (1994) se establecieron 34 asociaciones de inclusiones fluidas (FIAs, *Fluid Inclusion Assemblages*) que se resumen en la tabla 6.2.

Microtermometría del Evento 2. Un total de 20 FIAs fueron medidas en cristales de cuarzo euhedral de grano grueso en las paredes de los fragmentos, y en el cuarzo con textura en peine y crustiforme en venillas. Las inclusiones fluidas medidas para estos pulsos son de naturaleza bifásica, en su mayoría líquido dominante (Figura 6.17.a), aunque también se registraron poblaciones con predominio de fase vapor y Th consistentes entre ambos tipos de inclusiones (Figura 6.17.b).

Para la veta Dios Protege, las inclusiones fluidas primarias en los cristales euhedrales, presentan temperaturas promedio de 283,89°C y salinidades de 3,9% NaCl eq. También se midieron inclusiones fluidas alojadas en los bordes cristalinos asociadas a texturas microplumosas, que fueron clasificadas como pseudosecundarias, donde las temperaturas registradas promedian los 315,46°C y 1% NaCl eq. Asimismo, se midieron inclusiones fluidas secundarias en el cuarzo recristalizado de las bandas finas que conforman la textura en cocarda, agrupándolas en tres FIAs. La sílice se encuentra completamente recristalizada y las inclusiones que pudieron medirse no reflejan las condiciones al momento de cristalización de las bandas, sino a eventos posteriores. Estas inclusiones se observan en trenes que atraviesan por completo los cristales. La temperatura de homogenización promedio para dicho evento es de 338,28°C y salinidad media de 1,584% NaCl eq.

El evento 2 es el más difundido en la veta San Agustín, particularmente en los sectores norte y centro, donde fueron tomadas las muestras evaluadas (ver Anexo D). Las muestras seleccionadas provenientes del sector sur no presentaban inclusiones fluidas primarias.

En la veta San Agustín, E2 pudo ser evaluado a dos cotas diferentes. Las muestras de superficie CN-01 y CN-02 (cota aproximada 1.830 m.s.n.m.) presentan una Th promedio de 273,89°C y salinidad media de 3,75% NaCl eq. Una muestra proveniente del sondaje CASS-10-06 (1.750 m.s.n.m.) presenta valores de Th y salinidad similares a los de superficie, siendo los promedios 278,03°C y 3,349% NaCl eq., respectivamente.

Se seleccionaron algunas esquirlas con cristales de adularia pertenecientes a este evento. Debido a la escasa diafanidad de los cristales y a la alteración sobreimpuesta que presentaban no fue posible obtener mediciones confiables. Sólo se obtuvieron dos datos (poco confiables) los cuales arrojan temperaturas mayores a 400°C, pero no serán tenidos en cuenta para la interpretación, debido al tamaño reducido de la población de datos y a las temperaturas anómalas obtenidas para este mineral.

Evento	Veta	Muestra	Cota	FIA	Mineral	Tipo	Forma	L:V	Tamaño promedio (µm)	Th (n)	Th Rango (°C)	Th Promedio (°C)	Tm (n)	Tm Rango (°C)	Salinidad Promedio (% NaCl eq.)
2	Dios Protege	01080709	1650	P2x-Ia	Qz bn	P	Facetada	2:8	20,67	3	[262.7 - 295.7]	282,27	-	-	-
		01080709	1650	P2x-Ib	Qz bn	P	Redondeada	6:4	44,5	3	[252.8 - 271]	263,37	1	-6,5	9,855
		01080709	1650	P2x-II	Qz bn	P+S	Irregular	6:4	20	6	[302.8 - 334]	322,68	1	-0,4	0,705
		02080709	1685	P2x-III	Qz bn	P	Irregular	8:2	39,25	8	[285.9 - 312.4]	302,62	1	-1,6	2,737
		02080709	1685	P2x-IV	Qz bn	P+S	Irregular	8:2	30,33	6	[321.7 - 386.1]	353,58	-	-	-
		02080709	1685	P2Ad-I	Ad	P	Facetada	7:3	82	3	S/D	-	-	-	-
		DP-04	1650	P2x-Va	Qz cc	P	Irregular	3:7	33	10	[250.7 - 302.4]	272,52	-	-	-
		DP-04	1650	P2x-Vb	Qz cc	P	Irregular/Redondeada	7:3	25,46	26	[263 - 298]	279,23	6	[-1.4 a -0.6]	1,621
		DP-04	1650	P2x-VI	Qz cc	P+S	Irregular/Redondeada	5:5	36,8	5	[241.6 - 266.3]	257,04	3	[-1 a -0.1]	1,161
		CN-03	1670	P2x-VII	Qz cc	P	Irregular	5:5	28	10	[297.1 - 312.2]	303,38	3	[-1.2 a -0.6]	1,392
		CN-03	1670	P2x-VIII	Qz cc	P+S	Irregular/Facetada	5:5	43,33	3	[322.2 - 333.9]	328,56	2	[-0.9 a -0.4]	1,135
		CN-03	1670	P2Ad-II	Ad	P	Facetada	7:3	42,5	1	412,6	-	1	-2,1	3,548
		DP-04	1650	P2c-I a	Qz bn	S	Irregular	3:7	10,66	3	[318.6 - 380.2]	340,13	-	-	-
		DP-04	1650	P2c-I b	Qz bn	S	Irregular/Redondeada	6:4	13,33	12	[303.6 - 384.6]	340,41	3	[-1.4 a -0.2]	1,611
01080709	1650	P2c-I c	Qz bn	S	Irregular	8:2	16,29	27	[297.8 - 381.6]	334,3	8	[-1.8 a -0.4]	1,557		
3	San Agustín	CN-01	1830	P2x-IX	Qz cc	P	Irregular	8:2	33,62	8	[191.7 - 312.6]	251,55	3	-	-
		CN-01	1830	P2x-X	Qz cc	P	Irregular/Redondeada	2:8	44,66	3	[247.2 - 294.5]	270,93	-	-	-
		CN-02	1830	P2x-XI	Qz cc	P	Irregular/Facetada	7:3	30,55	9	[274.3 - 330.1]	299,2	4	[-0.9 a -5.7]	3,75
		CN-02	1830	P2Ad-III	Ad	P	Irregular	7:3	50	1	427,4	-	-	-	-
		CASS-06	1750	P2x - XII	Qz bn	P	Irregular/Redondeada	7:3	30,4	10	[244.1 - 317.3]	278,03	4	[-0.2 a -4.1]	3,349
3	Dios Protege	04080709	1670	P3-I a	Qz ms	P	Irregular	2:8	63,42	7	[268.6 - 333.4]	309,22	2	[-0.5 a -0.2]	0,616
		DP-04	1650	P3-I b	Qz ms	P	Irregular	7:3	37,33	9	[296.4 - 324]	313,92	3	[-1.1 a -0.6]	1,451
		02080709	1685	P3-II	Qz ms	P+S	Redondeada	5:5	27,33	3	[245.1 - 268.4]	259,93	1	-0,6	1,05
		02080709	1685	P3-III	Qz ms	P	Irregular	5:5	66,75	8	[275.6 - 312.4]	299,78	4	[-1.4 a -0.1]	0,82
		CASS-01	1585	P3-IV	Qz ms	P	Irregular	7:3	31	8	[317.5 - 348.7]	334,85	1	-1,1	1,905
		CN-03	1670	P3-V	Qz ms	P+S	Irregular	5:5	49,17	29	[263.1 - 298.7]	280,4	11	[-0.9 a -0.1]	0,907
		CN-01	1830	P3-VI	Qz ms	P	Irregular	7:3	21,25	4	[221 - 282.1]	251,95	-	-	-
CN-02	1830	P3-VII	Qz ms	P	Irregular	7:3	23,88	9	[219.2 - 316]	248,38	2	[-0.1 a -0.8]	0,7868		
4	Dios Protege	08280710	1680	P4-I	Am	P	Redondeada	7:3	13	6	[324.7 - 360.1]	340,23	1	-0,2	0,354
		08280710	1680	P4-II a	Qz bn	P+S	Irregular	2:8	28,8	5	[264.6 - 301.9]	290,94	-	-	-
		08280710	1680	P4-II b	Qz bn	P+S	Redondeada	8:2	22,53	15	[236.8 - 306.5]	290,82	2	[-0.8 a -0.6]	1,224
		08280710	1680	P4-III	Qz bn	P	Irregular/Redondeada	5:5	19	4	[309.6 - 329]	318,92	-	-	-
		CN-03	1670	P4-IV	Qz bn	P	Irregular	8:2	25,76	17	[319.4 - 343.4]	330,62	-	-	-
6	Dios Protege	CASS-03	1630	P6-I	Qz ms	P	Irregular	4:6	9,33	5	[278.4 - 294.6]	287,88	2	[-2.4 a -1]	2,88

Tabla 6.2. FIAs definidas para los eventos evaluados en las vetas Dios Protege y San Agustín. Cuarzo con textura bandeada (Qz bn); cuarzo con textura en peine (Qz cc); cuarzo con textura masiva (Qz ms); amatista (Am); tipos de inclusiones primarias (P), secundarias (S) y pseudosecundarias (P+S); relación líquido:vapor (L:V). La localización de las muestras se encuentra en el Anexo I. Cota (aproximada) expresada en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

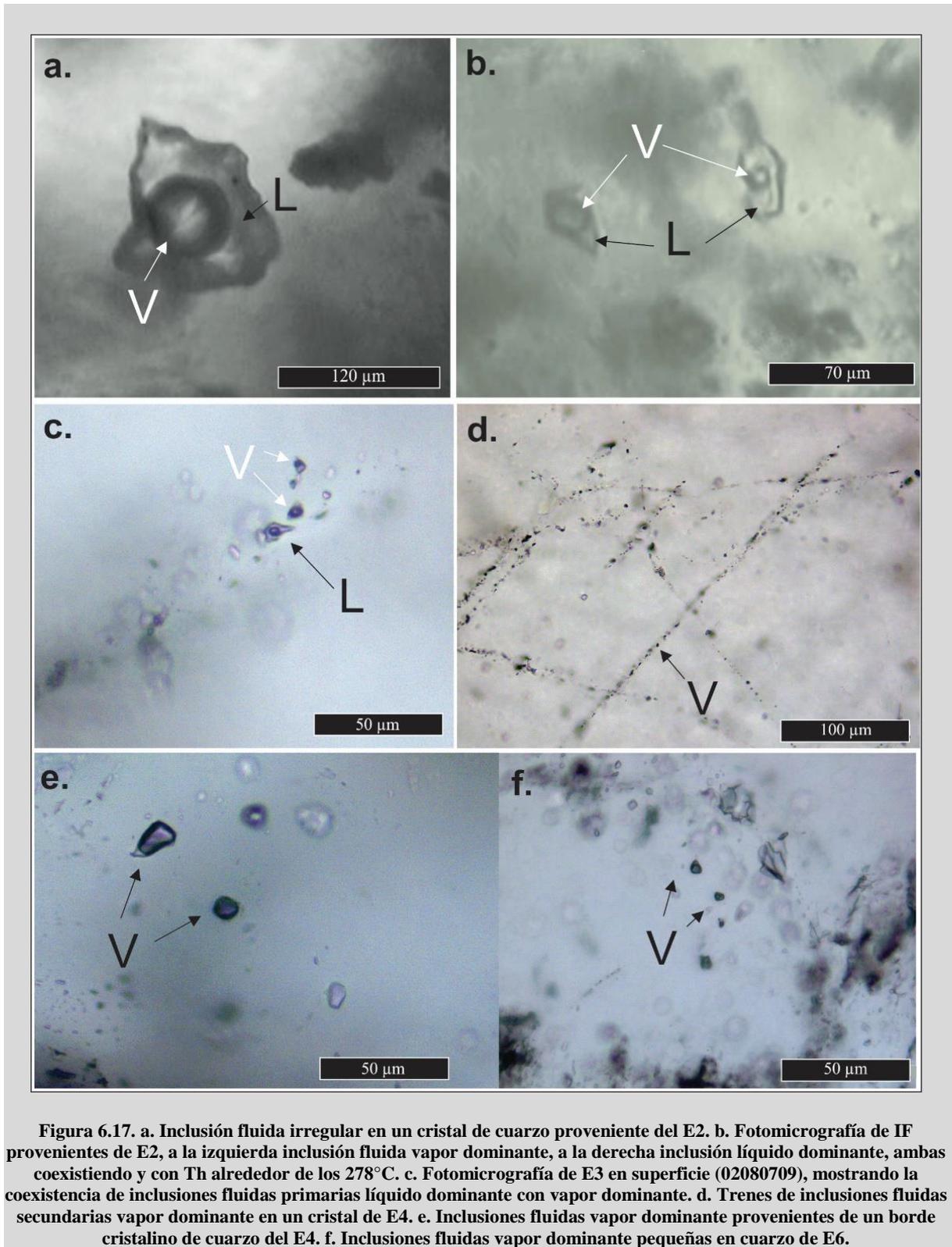
Microtermometría del Evento 3. Este evento, conformado por cuarzo macizo, es el más difundido a lo largo y alto de toda la estructura de Dios Protege. Se analizaron dos muestras de superficie (cotas entre 1.650 y 1.685 m.s.n.m.), una muestra tomada en la galería principal (cota aproximada 1.650 m.s.n.m.) y una muestra proveniente del sondaje CASS-10-01 (cota 1.585 m.s.n.m.). Se establecieron seis FIAs en función de las características específicas de cada inclusión y también de la cota en la que fue tomada la muestra. De este modo se pudo establecer una zonación de temperaturas de homogenización y salinidades en función de la profundidad. Aproximadamente un 30% de las inclusiones fluidas medidas presentan un predominio de la fase vapor sobre la fase líquida, el porcentaje restante corresponde a IF líquido dominante. De ese porcentaje, la mayoría de las inclusiones fluidas vapor dominante se encuentran en las muestras provenientes de superficie (Figura 6.17.c), mientras que en la muestra tomada dentro del túnel sólo un reducido grupo presentaba mayor desarrollo de la fase vapor. La muestra tomada a mayor profundidad no presentaba ninguna inclusión con estas características. Las temperaturas y salinidades de las IF medidas en el cuarzo de las cotas superiores (1.685 m.s.n.m.) arrojan valores promedio de $294,81^{\circ}\text{C}$ y $0,761\%$ NaCl eq., mientras que para el cuarzo de cotas intermedias (~ 1.660 m.s.n.m.) se obtuvo un valor promedio de $Th = 313,92^{\circ}\text{C}$ y salinidad de $1,451\%$ NaCl eq. Finalmente, las IF medidas en la cota inferior (1.585 m.s.n.m.) presentan valores promedio de Th y salinidad de $334,85^{\circ}\text{C}$ y $1,905\%$ NaCl eq, respectivamente.

Para la veta San Agustín, inclusiones fluidas del evento 3 fueron medidas en las muestras de superficie (cota 1.830 m.s.n.m), donde se definieron dos FIAs. Dichas muestras presentan escasas inclusiones fluidas primarias, todas ellas líquido dominante y de tamaños reducidos. La Th promedio presenta un valor de $250,16^{\circ}\text{C}$ y salinidad de $0,786\%$ NaCl eq.

Microtermometría del Evento 4. Este evento sólo fue analizado en la veta Dios Protege, donde se midieron IF hospedadas en cristales de amatista y cuarzo euhedrales dispuestos en bandas que forman la textura en cocarda. Fueron muy escasas las IF primarias observadas, ya que predominan los trenes de IF secundarias que atraviesan los cristales en su totalidad y que representan diferentes eventos posteriores al relleno de este pulso, observándose trenes de inclusiones fluidas bifásicas líquido dominante cortados por trenes de inclusiones monofásicas constituidos por una fase de vapor (Figura 6.17.d). Las IF medidas en amatista son líquido dominante, la Th promedio calculada es de $340,23^{\circ}\text{C}$. Sólo pudo medirse un dato de T_m , por lo tanto, se cuenta con un único valor de salinidad que corresponde a $0,354\%$ NaCl eq. En el cuarzo euhedral, las IF primarias presentan predominio de fase líquida (solo cinco IF registraron mayor proporción de vapor) con una Th promedio de $330,62^{\circ}\text{C}$, en ninguna pudo obtenerse un valor de T_m debido al tamaño reducido de las mismas. Algunas IF pseudosecundarias vapor dominante (Figura 6.17.e) fueron ensayadas sobre los bordes parcialmente recristalizados y arrojaron valores promedio de $290,88^{\circ}\text{C}$ y $1,224\%$ NaCl eq.

Microtermometría del Evento 6. Por último, el evento 6 sólo fue medido en una muestra proveniente del sondaje CASS-10-03 (cota 1.640 m.s.n.m.), en la veta Dios Protege. Debido al tamaño

reducido de los cristales y la escasa diafanidad del cuarzo, sólo pudieron obtenerse cinco valores. Las IF registradas fueron en su totalidad bifásicas con fase vapor dominante (Figura 6.17.f), todas ellas con Th similares que promedian los 287,88°C y valores de salinidad de 2,88% NaCl eq.



En la figura 6.18. se observa un diagrama tipo *box-plot* donde se observa la temperatura de homogenización para cada evento, distinguiendo las cotas aproximadas en los eventos en que fue posible evaluarlo. Se discriminan además según las vetas donde se tomaron lecturas, Dios Protege (DP) y San Agustín (SA).

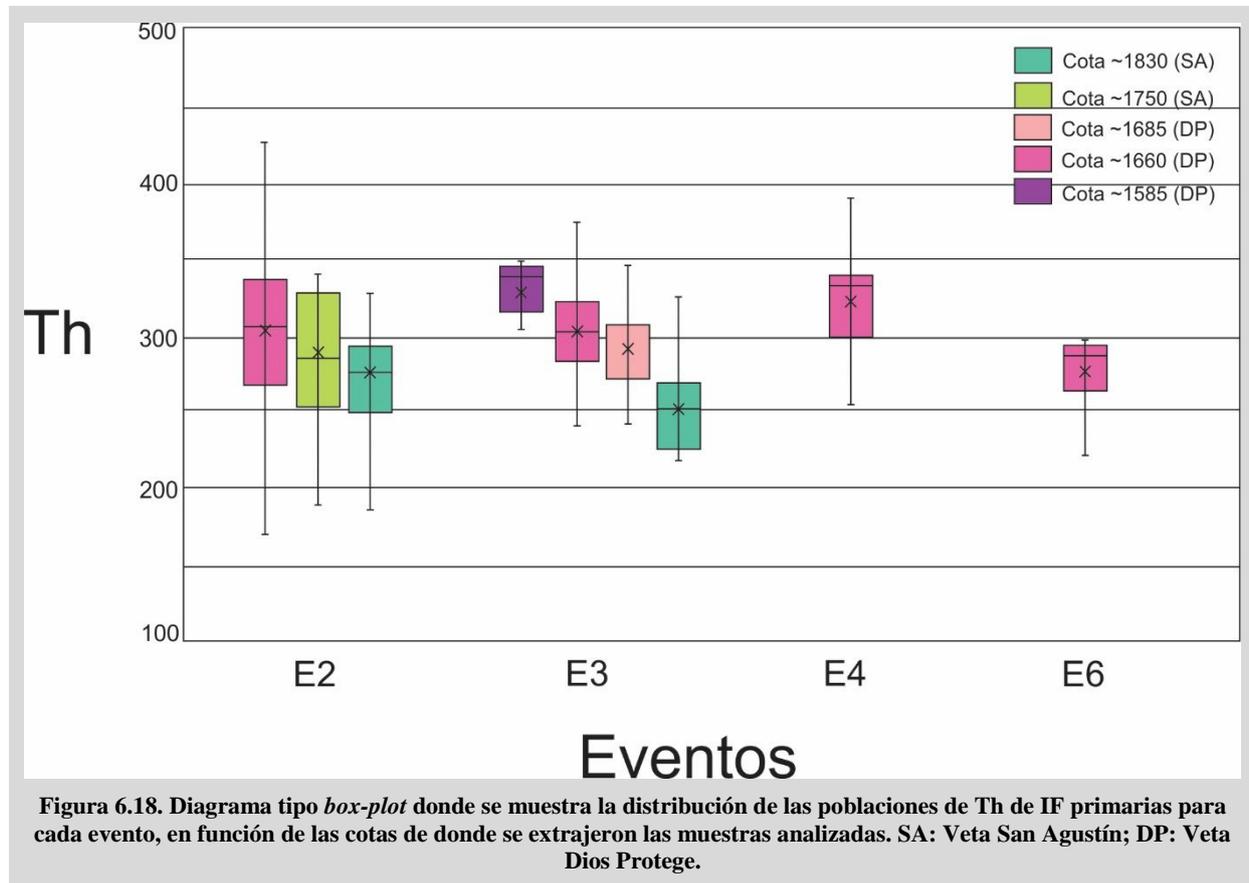


Figura 6.18. Diagrama tipo *box-plot* donde se muestra la distribución de las poblaciones de Th de IF primarias para cada evento, en función de las cotas de donde se extrajeron las muestras analizadas. SA: Veta San Agustín; DP: Veta Dios Protege.

6.3.4. Distribución y zonación de contenidos metálicos

La caracterización geoquímica de las vetas del Distrito Minero Castaño Nuevo se llevó a cabo utilizando los datos obtenidos y compilados por la empresa *Troy Resources Ltd.* Se analizó la distribución tanto en superficie como en profundidad. Para el primer caso fueron consideradas muestras de esquirlas (*rock-chip*) y canaletas tanto de superficie como de pequeñas labores subsuperficiales. En el segundo, sólo se consideraron los sondajes que efectivamente interceptaron las estructuras principales.

En primera instancia, se calcularon los parámetros (valor medio, máximo y mínimo, *threshold*) de cada una de las vetas en superficie a fin de comparar los valores de los principales elementos metálicos en cada una de ellas. Se trabajó con una base de datos de 251 muestras y los resultados se presentan en la tabla 6.3.

Las correlaciones entre los elementos metálicos en superficie se calcularon a partir de una matriz

de Pearson (Anexo II). La veta Dios Protege muestra una muy buena correlación entre Au y Pb, buena entre Au, Cu y Ag y moderada para Zn y Cd. La veta San Pedro presenta una correlación buena para Au con Ag y Pb, moderada para Au-Cu y muy buena entre Ag y Pb. Finalmente, San Agustín muestra una buena correlación entre Au y Ag, moderada para Au con Cu y Pb, y mala con Zn. En la figura 6.19 se exhiben los mapas de distribución de contenidos metálicos, generados a partir de los análisis químicos de superficie (y algunas canaletas en labores subsuperficiales) de las tres vetas con el objeto de visualizar las correlaciones antes expuestas. Estos mapas fueron generados a partir de imágenes rasterizadas utilizando el algoritmo de interpolación del Vecino Natural (Sibson, 1981)

Veta	Valores	Espesor	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Ag/Au
Dios Protege	Media	0,8	6,65	49,09	63,77	77,02	131,25	7:1
	Máximo	2,5	32,35	713	529	561	631	
	Mínimo	0,15	3,22	0,25	7	7	22	
	Threshold	-	8,7	12,2	69	67	193	
San Pedro	Media	0,6	3,13	10,44	82,43	98,64	296,57	3:1
	Máximo	1,1	14,3	39,8	208	277	737	
	Mínimo	10	0,3	0,25	40	31	68	
	Threshold	-	1,22	8,9	116	156	550	
San Agustín	Media	1,03	0,99	11,49	103,92	63,42	172,91	10:1
	Máximo	5	9,03	151,2	2170	1613	587	
	Mínimo	0,3	0,05	0,25	5	9	2	
	Threshold	-	0,73	8,2	64	54	311	

Tabla 6.3. Parámetros de contenidos metálicos para las vetas en superficie del Distrito Minero Castaño Nuevo.

En profundidad, el contenido metálico de las vetas fue evaluado sólo teniendo en cuenta los sondajes que efectivamente cortaron la estructura. En la tabla 1.1. (Capítulo 1) se detallan la totalidad de sondajes llevados a cabo en el Distrito Minero. Un total de 33 sondajes se destinaron al sistema de vetas, de los cuales 2 se realizaron con una máquina de aire-reverso y 31 con diamantina. La mayoría de ellos sólo fueron analizados por Au y Ag, debido a esto no es posible realizar un análisis de correlación entre Au y otros metales (a excepción de Ag) en cotas subsuperficiales.

Veta	Valores	Espesor	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Ag/Au
Dios Protege	Media	0,5	3,69	6,5	33,33	22	155	2:1
	Máximo	1,2	7,95	15	58	40	214	
	Mínimo	0,25	0,37	2	14	11	184	
	Threshold	-	7,32	4,19	56	23	244	
San Pedro	Media	-	-	-	-	-	-	-
	Máximo	-	-	-	-	-	-	
	Mínimo	-	-	-	-	-	-	
	Threshold	-	-	-	-	-	-	
San Agustín	Media	0,9	0,56	4,37	-	-	-	8:1
	Máximo	4,8	9,17	48	-	-	-	
	Mínimo	0,2	0,1	1	-	-	-	
	Threshold	-	0,24	4	-	-	-	

Tabla 6.4. Parámetros de contenidos metálicos para las vetas en profundidad a partir de datos de sondajes.

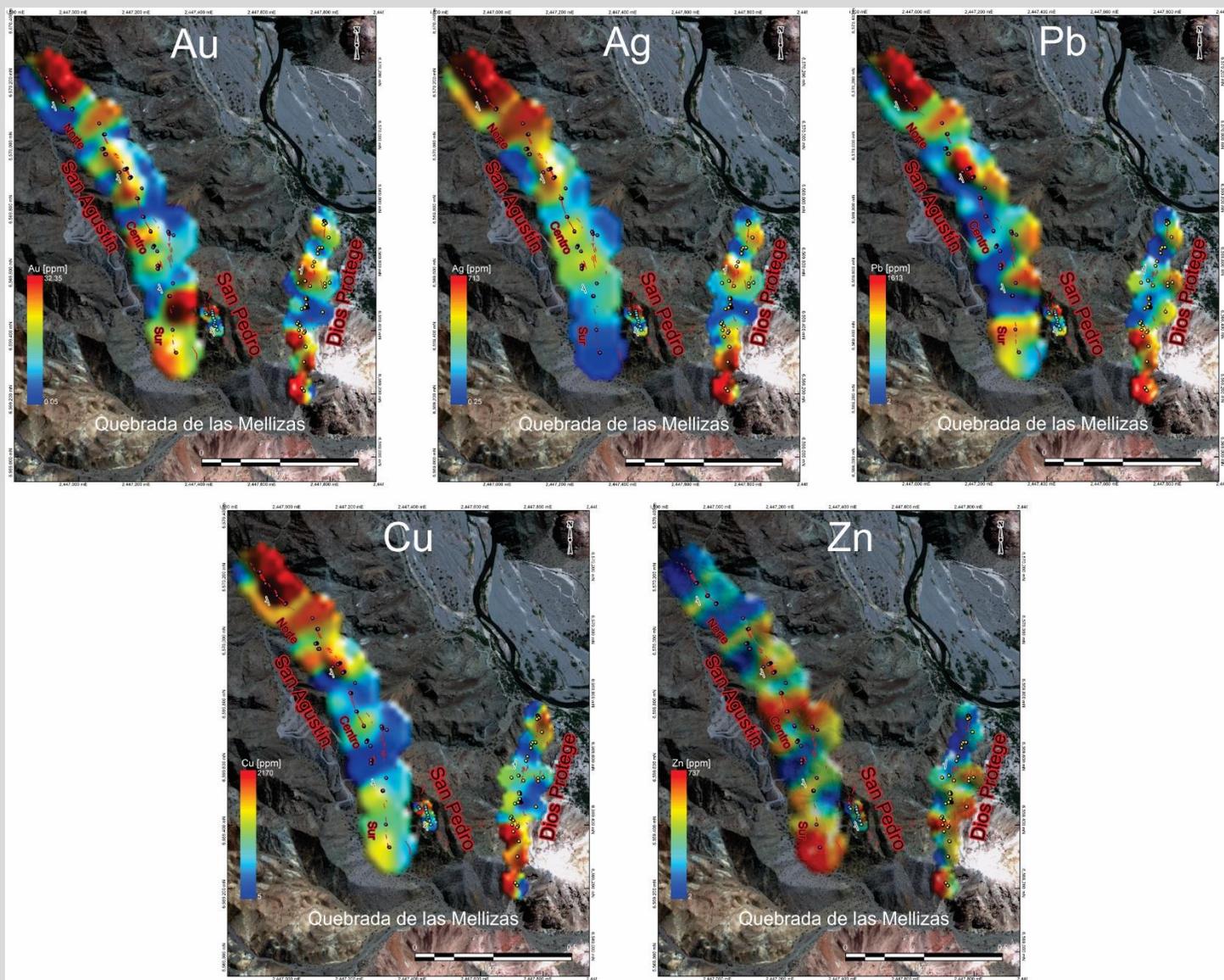


Figura 6.19. Mapa de distribución de contenidos metálicos (Au, Ag, Pb, Cu, Zn) para las vetas del Distrito Minero Castaño Nuevo.

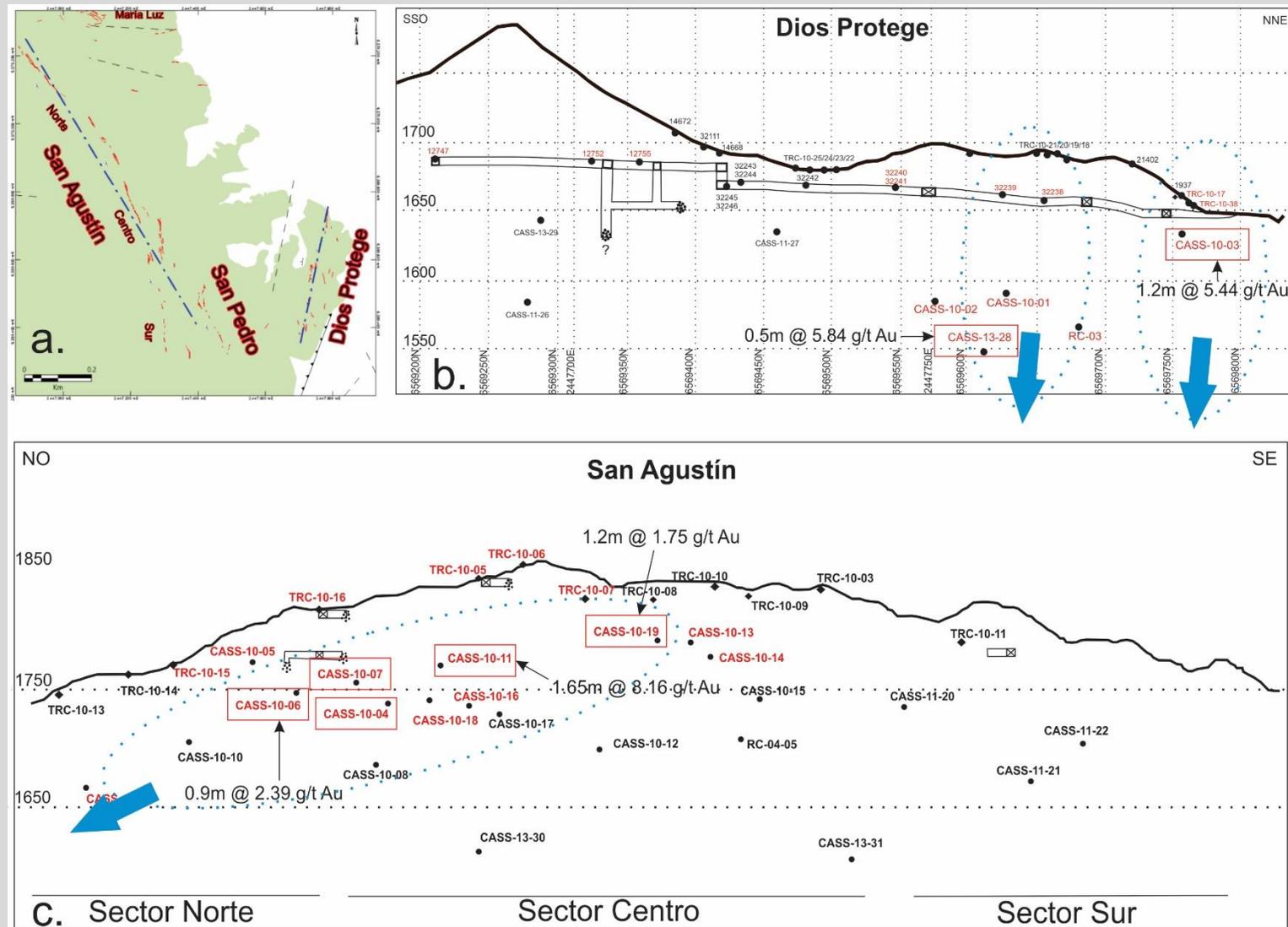


Figura 6.20. a. Mapa de superficie del sistema de vetas (en rojo) con la línea de la traza de la sección longitudinal (en azul) b. Sección longitudinal de la veta Dios Protege. c. Sección longitudinal de la veta San Agustín. En rojo se marcan las muestras de superficie, labores subterráneas y sondajes que interceptaron la estructura y arrojaron valores anómalos. En celeste se marcan las trazas de los posibles clavos y con la flecha se indica los sectores hacia donde podrían continuar los mismos.

Los análisis químicos de los sondajes fueron analizados estadísticamente y los resultados se muestran en la tabla 6.4, todos los valores fueron ponderados por el espesor. En la veta Dios Protege se realizaron 8 sondajes, pero sólo 4 de ellos interceptaron la estructura y todos se localizan en el sector centro-norte. En la veta San Pedro se realizaron 3 sondajes, ninguno con éxito. Finalmente, en la veta San Agustín, se realizaron 22 sondajes a lo largo del rumbo, y sólo 13 cortaron la estructura (3 en el sector norte, 8 en el centro y 1 al sur). En las secciones longitudinales presentadas en la figura 6.20 se marcan la totalidad de los sondajes y se distinguen aquellos que interceptaron con éxito las estructuras Dios Protege y San Agustín. Sólo en aquellos sondajes donde las muestras arrojaron valores anómalos se indican los resultados.

En base a los parámetros calculados para las distintas vetas, tanto en superficie como en profundidad se procedió a la clasificación del sistema vetiforme. De acuerdo a Simmons et al. (2005), la relación Ag/Au permite clasificar a los depósitos epitermales en tres categorías: $Ag/Au < 10$ depósitos auríferos; $Ag/Au [20-200]$ depósitos argentíferos; $Ag/Au > 400$ depósitos pobres en oro, ricos en plata, plomo y zinc. Para las vetas del Distrito Minero Castaño Nuevo, utilizando los valores promedios, la relación Ag/Au es igual o inferior a 10, permitiendo clasificar este depósito como aurífero. De igual modo, utilizando el diagrama propuesto por Albinson et al. (2001), las muestras se encuentran mayoritariamente dentro del campo de los Depósitos Epitermales de Au-Ag (Figura 6.21).

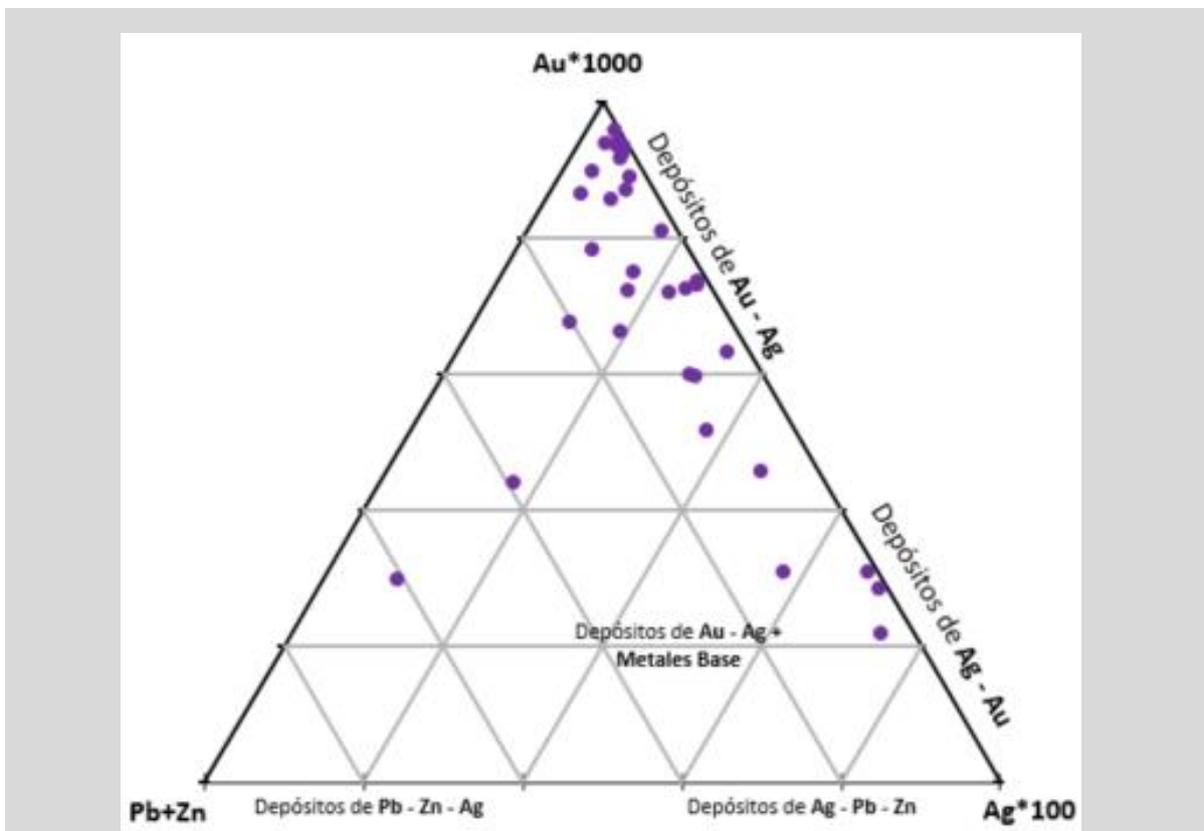


Figura 6.21. Diagrama ternario (Au*1000-Ag*100-Pb+Zn) para las vetas del Distrito Minero Castaño Nuevo (modificado de Albinson et al., 2001).

En los depósitos epitermales las variaciones verticales y laterales de los contenidos de ciertos elementos constituyen rasgos comunes y pueden utilizarse para la determinación de direcciones de flujo y establecer las condiciones fisicoquímicas durante el transporte y precipitación de los metales (Goodell y Petersen, 1974; Gemmell, 2007; Clark y Gemmell, 2018). En particular, las relaciones (cocientes) entre diferentes metales son más indicativas que el valor absoluto de cada metal, y permiten establecer la dirección de migración de fluidos en depósitos hidrotermales, definir zonas de ascenso, flujos laterales y establecer gradientes de temperatura (Goodell y Petersen, 1974).

Esto sólo pudo aplicarse sobre la veta Dios Protege, ya que es la única que cuenta con resultados de todos los metales, tanto en superficie como en profundidad. Se evaluaron los siguientes cocientes $[Au/Pb]*100$, $[Au/Cu]*100$, $[Ag/Pb]*100$, $[Pb/Zn]$, $[Au/(Au+Ag)]*100$. Se presentan los resultados de los dos primeros cocientes en una sección longitudinal (Figura 6.22). Las otras relaciones evaluadas no mostraron ninguna tendencia que permitiera vectorizar la dirección del flujo.

En particular, los valores del cociente $[Au/Pb]*100$ se incrementan al norte y en la porción central, disminuyendo considerablemente hacia el sur. En general, los máximos se disponen cercanos a la superficie, mientras que en profundidad los valores disminuyen considerablemente. Para el caso del cociente $[Au/Cu]*100$, la distribución es similar a la descrita anteriormente, aunque también se destacan valores altos hacia el sur.

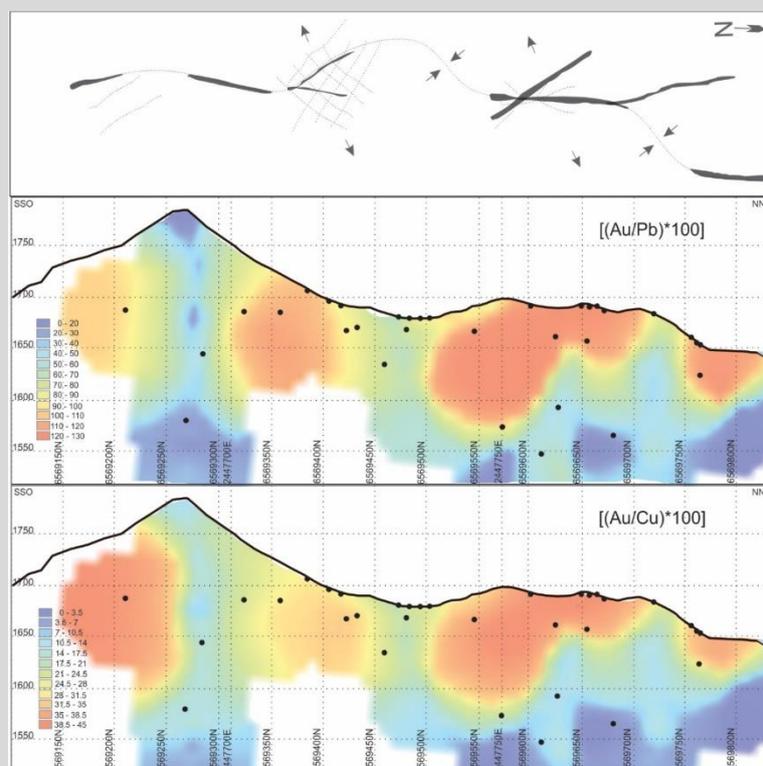


Figura 6.22. Sección longitudinal de la veta Dios Protege y su relación con el modelo estructural propuesto para la estructura. Relaciones entre metales $[Au/Pb]*100$ y $[Au/Cu]*100$ representadas mediante el algoritmo del vecino natural, mostrando los altos en color rojo coincidente con los tramos superficiales/subsuperficiales de los sectores de apertura definidos, disminuyendo en profundidad (en tonos azules).

6.3.5. Distribución de las alteraciones hidrotermales vinculadas al sistema de vetas

La alteración hidrotermal generada por la circulación de fluidos a través de las estructuras mencionadas anteriormente fue estudiada mediante el empleo de un espectrómetro de reflectancia de infrarrojo Terraspec® 4Hi-Res. Se efectuaron transectas cortas alrededor de las estructuras aflorantes y dentro de los túneles. Se seleccionaron sondajes de las vetas Dios Protege y San Agustín a fin de evaluar el comportamiento de las asociaciones de alteración en profundidad. Se trabajó sobre una base de datos con un total de 948 muestras. De este modo se establecieron las siguientes asociaciones de alteración que se presentan sobre una sección esquemática O-E donde se observan las estructuras y la disposición de las alteraciones (Figura 6.23.a).

Asociación adularia + cuarzo: representa la asociación de minerales proximal a las vetas y sólo se extiende a escasos centímetros de las paredes del contacto. Se observa fundamentalmente en venillas que se desprenden de la estructura principal y como reemplazo parcial de plagioclasa de la roca hospedante (Figura 6.23.b). Esta asociación no siempre está presente, siendo frecuente en cercanías a la estructura de Dios Protege y prácticamente ausente en la de San Pedro y San Agustín. El espectro característico de esta asociación se muestra en la figura 6.23.b donde puede apreciarse la firma espectral de los minerales silíceos (curva con forma redondeada), trazas de illita (posiblemente presente como alteración de la adularia o bien de la plagioclasa de la roca de caja) y trazas de clorita.

Asociación illita + clorita ± esmectita ± caolinita: se observa esta asociación formando un halo de 0,5 a 2 m alrededor de las estructuras. Está conformada mayoritariamente por illita de composición normal potásica (establecida a partir del cálculo de la posición de la longitud de onda en torno a los 2200 nm). En algunos casos se observa un incremento en el rasgo de absorción de 1900 nm y una pendiente negativa fuerte entre los 2200 y 2500 nm, lo que sugiere la presencia de esmectitas (Figura 6.23.c). De igual modo, en algunos casos se detectan trazas de caolinita evidenciadas por la deformación de los rasgos de absorción en torno a los 1400 y 2200 nm (Figura 6.23.d). En los cortes delgados analizados se observa afectando a las plagioclasas y a la pasta de las rocas volcánicas que contienen a las estructuras. Asimismo, en la mayoría de los espectros se encuentra asociada clorita, preferentemente de composiciones magnésicas (Figura 6.23.b). La asociación illita/clorita también fue determinada dentro de los interceptos más importantes de San Agustín y Dios Protege, comúnmente asociada a sectores de intenso brechamiento.

Asociación epidoto + clorita ± calcita: constituye la zona más distal de la alteración. En superficie sólo se registró alrededor de la veta Dios Protege, mientras que en profundidad se observa como un halo de decenas de metros alrededor de todas las estructuras. El epidoto se observa como agregados dentro de los cristales de la roca de caja, así como también en la pasta y rellenando oquedades (Figura 6.23.e). La

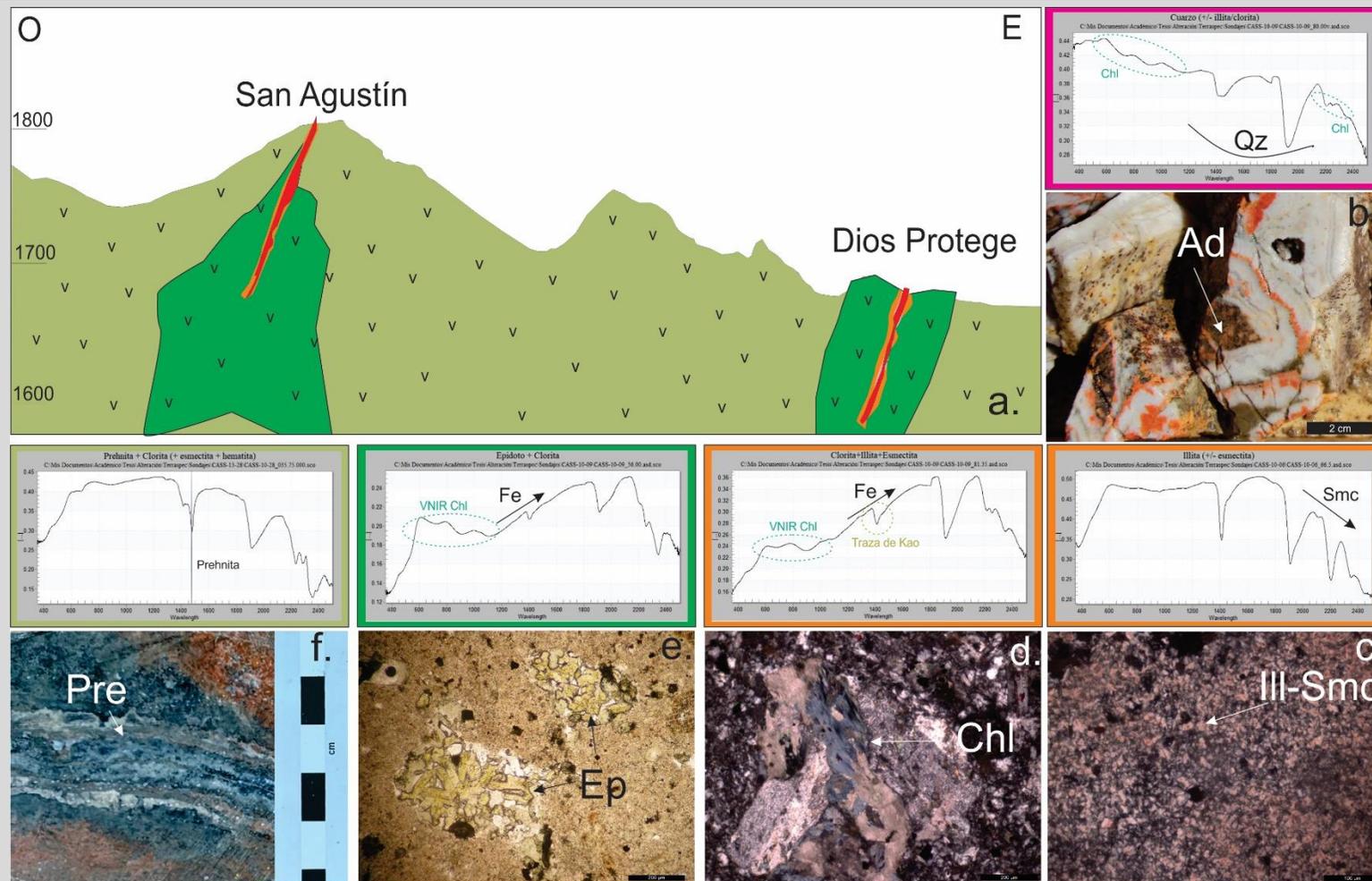


Figura 6.23. a. Corte transversal esquemático del sector noreste de Castaño Nuevo, donde se observan las principales vetas y las asociaciones de alteración identificadas, cada una de ellas representadas con un color específico que se replica en los bordes de los espectros característicos. b. Asociación adularia + cuarzo: Fotografía del sondaje CASS-10-03, donde se observa adularia (Ad) en finas venillas y dentro de un fragmento de roca andesítica. Espectro de cuarzo (Qz) con trazas de clorita (Chl) e illita. c. Asociación illita + clorita ± esmectita ± caolinita: Fotomicrografía con analizador de la pasta de la roca de caja donde se observa la asociación de illita (Ill) con esmectita (Smc) reemplazando a la pasta. La curva espectral que acompaña presenta la firma característica de la illita, con trazas de esmectita. d. Fotomicrografía con analizador de clorita con colores verdes y otras azules. La curva espectral que acompaña la figura presenta la asociación clorita - esmectita, con trazas de caolinita. e. Asociación epidoto + clorita ± calcita: fotomicrografía sin analizador donde se observan *clusters* de epidoto (Ep) relleno de quiebras. La curva espectral muestra la asociación clorita-epidoto (±esmectita). f. Asociación clorita ± prehnita: Fotografía del sondaje CASS-13-28 donde se observa una venilla rellena con prehnita (Pre), clorita y abundantes óxidos de hierro (± cuarzo). La curva espectral muestra el rasgo de absorción característico de la prehnita, asociada a clorita, esmectita y hematita.

clorita se encuentra reemplazando minerales máficos y presenta una composición intermedia entre los extremos de Fe y Mg. La calcita, cuando está presente, se asocia mayoritariamente a delgadas venillas que se distribuyen de forma errática a lo largo de todo el distrito.

Asociación clorita ± prehnita: en los sectores lejanos a las estructuras la alteración se limita a clorita, también de composición intermedia, aunque en algunos casos se detectaron fases más magnésicas, pero sin una distribución particular. La prehnita aparece como un mineral común dentro de los espectros analizados tanto en superficie como en sondajes, pero sin aparente relación espacial con las estructuras principales. En general se trata de venillas color verde oscuro (casi negro) con un material blanquecino pulverulento asociado (Figura 6.23.f). Estas venillas, en cercanías a las vetas se encuentran cortadas (y en algunos casos desplazadas) por el *stockwork* asociado a los eventos 2 y 3. Se determinó también la presencia de otras zeolitas relleno de fracturas, en general de colores rojizos y determinadas mediante DRX como heulandita.

6.4. Depósitos diseminados asociados a cuerpos de brechas y sílice residual

El estudio del sector de alteración y mineralización diseminada identificado en los capítulos anteriores, fue abordado en primer lugar mediante el mapeo de detalle de los afloramientos. Se procedió a distinguir entre las unidades concordantes con la secuencia volcánico-piroclástica que conforma la estratigrafía del área, de aquellas unidades relacionadas a un evento posterior al deposicional. Las unidades concordantes fueron presentadas en el Capítulo 3 y agrupadas bajo la denominación de Unidad II.

Los trabajos anteriores elaborados sobre este sector sugieren la presencia de un sistema volcánico explosivo formado por brechas eruptivas hidrotermales-freatomagmáticas asociadas con una intensa alteración ácido-estable y relacionadas a un sistema de alta sulfuración (Delendatti, 2005).

6.4.1. Descripción general

El sector central del área de estudio se caracteriza por una intensa alteración hidrotermal, asociada a estructuras con múltiples orientaciones y brechas de diferentes características (Figura 6.24). De acuerdo a lo establecido en los capítulos anteriores, el sector de alteración afecta sólo a las Unidades I y II. En la porción central se encuentra aflorante la Unidad I afectada por una intensa alteración ácida que genera pequeños cuerpos de cuarzo residual con texturas tipo *vuggy quartz*. Los afloramientos son reducidos y solo fueron identificados en este sector. Posteriormente, esta roca es afectada por procesos de fracturación conformando grandes cuerpos de brechas monolíticas cuyos fragmentos se componen

enteramente de restos del *vuggy quartz*. Se identifican además cuerpos elongados de brechas asociadas a estructuras y venillas cortando a todo lo anterior. Las tobas finas y brechas heterolíticas de la Unidad II se encuentran fuertemente alteradas a arcillas y localmente silicificadas.

6.4.2. Descripción de los cuerpos

De acuerdo a las observaciones de campo, y luego de discriminar correctamente las brechas volcánicas y piroclásticas, se procedió a la clasificación de los cuerpos de brechas presentes en el sector central del Distrito Minero Castaño Nuevo. Se realizó un mapeo detallado de los afloramientos, el cual se presenta en la Figura 6.24.

El primer subgrupo de brechas identificadas se encuentra asociado a estructuras con variadas orientaciones, emplazadas principalmente en las facies de brechas piroclásticas heterolíticas y facies tobáceas finas identificadas dentro de la Unidad II (Figura 6.25.a). La distribución de estos cuerpos discordantes con la estratigrafía es irregular. Constituyen cuerpos elongados de algunas decenas de metros de extensión. Las orientaciones varían entre N-S y N45°. Alrededor de ellos se destaca un fuerte halo de alteración argílica y abundante óxido de hierro como pátinas en las fracturas de las rocas circundantes.

Los fragmentos corresponden en su totalidad a las facies de la Unidad II y se encuentran fuertemente alterados a arcillas, y localmente silicificados. El cemento de la brecha está compuesto por sílice y óxidos de hierro. En algunos sectores estas estructuras conforman brechas tipo *crackle* como se observa en la Figura 6.25.b. Bajo el microscopio óptico se confirma la fuerte alteración que presentan los fragmentos y el carácter ferruginoso del cemento (Figuras 6.25. c y d).

En el Capítulo 5, mediante la tecnología de sensores remotos se identificó un corredor NO-SE localizado en el sector occidental del área de estudio, a lo largo del cual se identificaron asociaciones de alteración hidrotermal de carácter ácido. En el centro de dicho corredor se disponen afloramientos de la Unidad I afectados por una intensa alteración que provocó la lixiviación de todos sus componentes y una posterior silicificación, conformando una textura tipo *vuggy quartz*. Los afloramientos son escasos y se limitan exclusivamente a las inmediaciones de la Quebrada de Las Mellizas (Figura 6.24).

En general, se aprecia la textura porfírica original donde en lugar de fenocristales se observan huecos que frecuentemente presentan pátinas de óxidos de hierro (Figura 6.26.a), y en algunos casos se encuentran rellenos con arcillas y/o cuarzo (Figura 6.26.b). La pasta se halla completamente reemplazada por cuarzo. Bajo el microscopio se observa cuarzo criptocristalino fino, con desarrollo de variedades cristalinas junto con óxidos de hierro en las paredes de los huecos (Figura 6.26.c). Se observa pirita fina diseminada (Figura 6.26.d).

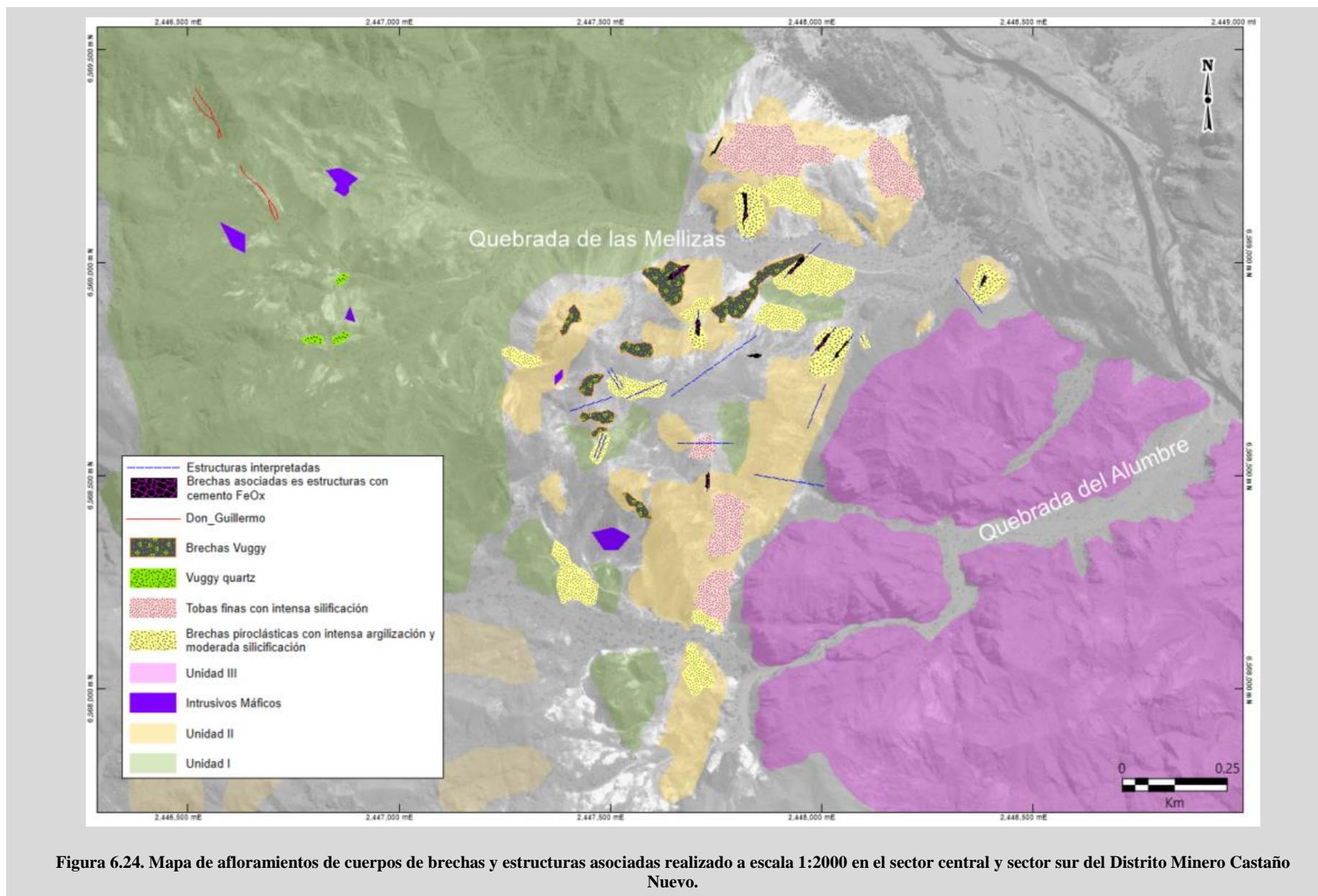


Figura 6.24. Mapa de afloramientos de cuerpos de brechas y estructuras asociadas realizado a escala 1:2000 en el sector central y sector sur del Distrito Minero Castaño Nuevo.

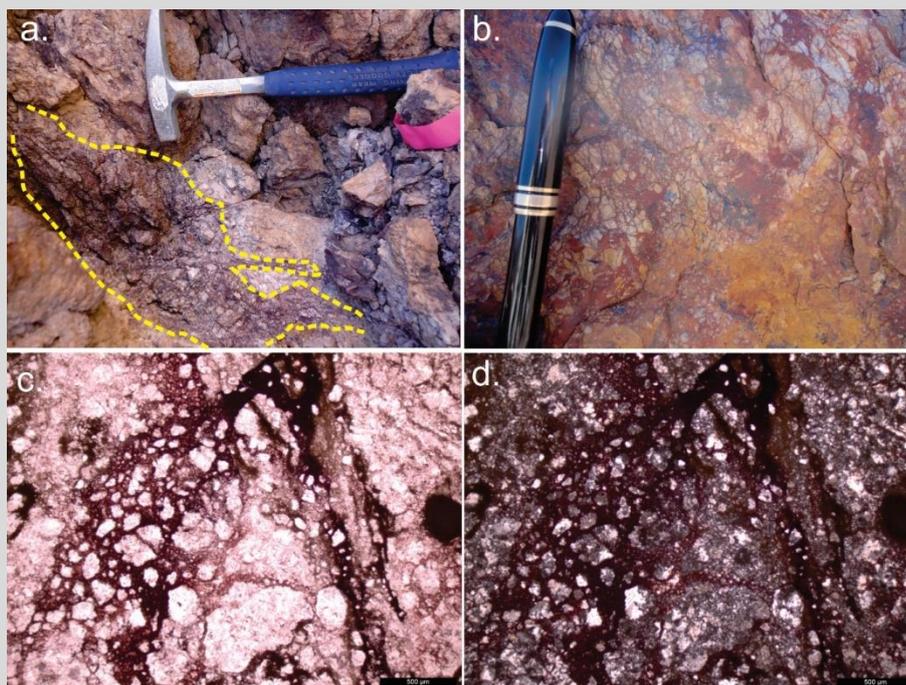


Figura 6.25. a. Fotografía de afloramiento del sector sur, donde se aprecia una estructura en la que se emplaza la brecha, con fragmentos de roca piroclástica y cemento ferruginoso. b. Fotografía en afloramiento donde se observa una *crackle breccia* con el mismo cemento de óxidos de hierro y sílice. c y d. Fotomicrografía sin/con analizador de la brecha.

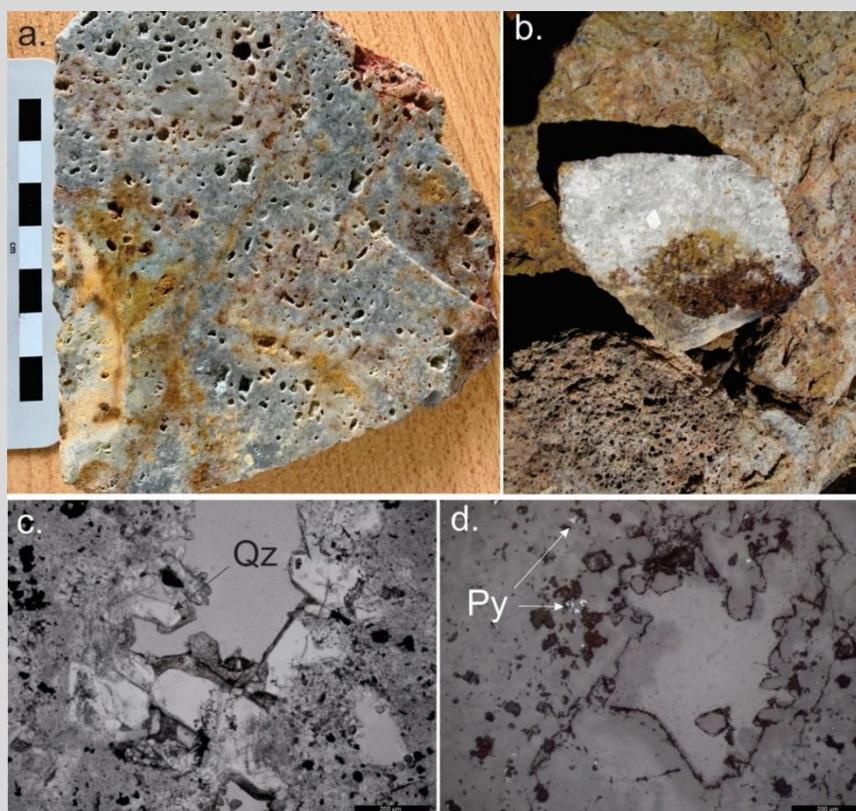


Figura 6.26. a. Fotografía de muestra de mano de andesitas de la Unidad I fuertemente alteradas con textura tipo *vuggy quartz*. b. Fotografía en afloramiento de esta misma textura, pero con las oquedades rellenas con arcillas. c. Fotomicrografía sin analizador de cristales de cuarzo (Qz) creciendo en las paredes de uno de los huecos generados. d. Fotomicrografía con luz reflejada mostrando fina pirita (Py) diseminada.

Hacia el norte, sobre el mismo corredor NO-SE se presenta una estructura vetiforme, paralela a la dirección de este corredor, denominada Don Guillermo. El buzamiento es al oeste con ángulos entre 70 y 85°. El ancho es variable, entre 0,50 y 2 m (Figura 6.27.a). Esta estructura se compone de una brecha con grandes fragmentos de ópalo y sílice calcedónica, cementados por sílice criptocristalina (Figura 6.27.b). Se observan, además, grandes oquedades de formas rectangulares y óxidos de hierro como pátinas. Al piso de la estructura se aprecia una fuerte alteración argílica con abundantes óxidos de hierro asociados.

Esta estructura continúa hacia el sur dentro de la Unidad I constituyendo una delgada vetilla de 0,2 m de cuarzo macizo, hasta perderse en un sector fuertemente alterado a arcillas y yeso. Hacia el norte continúa como un venilleo con predominio de sílice calcedónica y escasas cantidades de fluorita.

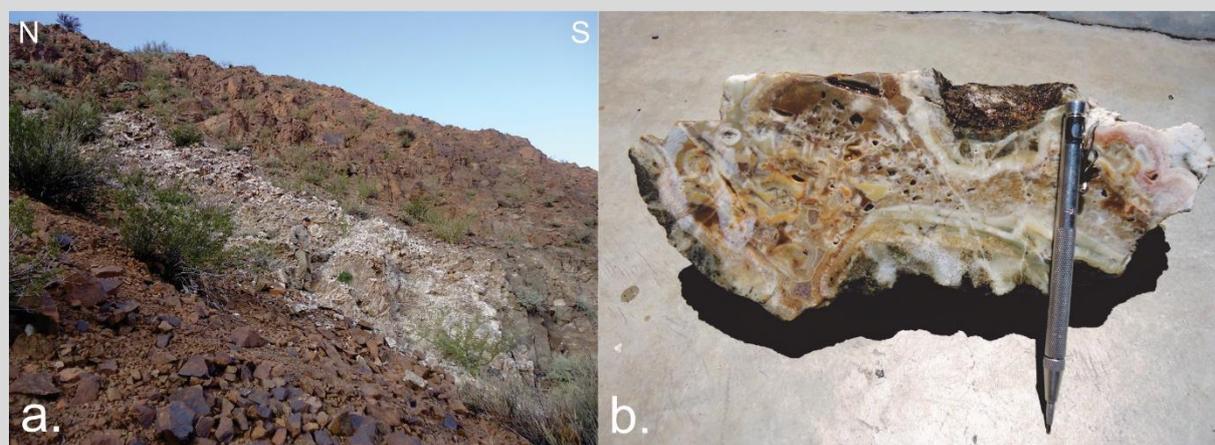


Figura 6.27. a. Fotografía con vista al este de afloramiento de la estructura vetiforme Don Guillermo donde se aprecia el buzamiento hacia el oeste. b. Detalle de muestra de mano de la estructura Don Guillermo donde es posible apreciar las diferentes variedades de sílice, desde ópalo y calcedonia como fragmentos, hasta cuarzo microcristalino cementando la brecha. Se observan abundantes óxidos de hierro y oquedades generadas por la lixiviación de algunos cristales.

Luego de la extensa lixiviación y silicificación que dio lugar a la formación de las texturas tipo *vuggy quartz*, se produjo un evento explosivo de gran magnitud que generó un extenso volumen de brechas, cuyos fragmentos corresponden en su totalidad a los cuerpos de *vuggy quartz*. En general, los fragmentos son redondeados y presentan tamaños variados desde algunos centímetros hasta cerca de 1 m. Las proporciones de fragmentos vs. matrix son muy variables (Figura 6.28). El cemento está conformado por sílice muy fina con diferentes proporciones de óxidos de hierro. Estas brechas se hallan cortadas por venillas de sílice calcedónica de hasta 4 cm.

La distribución espacial entre las diferentes brechas y cuerpos identificados no es clara. La intensa alteración y la fuerte estructuración (establecida en el Capítulo 3) enmascaran los contactos. Por otra parte, la mayoría de las brechas se encuentran como grandes bloques sueltos, algunos caídos sobre la quebrada de Las Mellizas y otros dispuestos sobre los sectores más altos del área de estudio. Si bien

se asume que estos últimos no tuvieron un transporte considerable y se encuentran en su lugar de origen, el hecho de que estén sueltos y la fuerte alteración que los rodea, impide ver las relaciones con el resto de las rocas que conforman la secuencia.

A grandes rasgos puede establecerse que al norte de la quebrada de Las Mellizas se encuentra la Unidad I fuertemente alterada, conteniendo los sectores de *vuggy silica* y la estructura vetiforme Don Guillermo. Al sur de la quebrada se disponen las brechas *vuggy* y las brechas hidrotermales con cemento ferruginoso y silíceo que afectan a la Unidad II. Ambos tipos de brecha presentan variaciones texturales que permiten inferir distintas posiciones dentro de las estructuras por donde ascendió el fluido que les dio origen. Otro rasgo para destacar es la presencia de sectores conformados enteramente por sílice. El reemplazo es total y no se distinguen rasgos de las rocas originales. Se disponen principalmente en el sector de alteración al sur del sistema de vetas epitermales, por encima de las brechas polimícticas de la Unidad II.



Figura 6.28. Subafloramientos de brechas con fragmentos de *vuggy* de diversos tamaños y proporciones. La mayoría está subredondeado. Se destacan venillas de cuarzo cortando a las brechas.

6.4.3. Distribución y zonación de los contenidos metálicos

En el sector estudiado se llevó a cabo un muestro de *rock-chip* en superficie, a lo largo de transectas. Los elementos geoquímicos que muestran anomalías en el sector central y sur del área de estudio fueron filtrados y evaluados sin considerar los valores del sistema de vetas para evitar distorsiones. Se generaron dos matrices de Pearson a fin de establecer las correlaciones entre elementos (Anexo II) distinguiendo el sector de brechas (al sur de la Quebrada de Las Mellizas), del sector de fuerte alteración en torno al corredor NO-SE (principalmente al norte de dicha quebrada).

Los resultados de los parámetros estadísticos obtenidos para estos dos sistemas se presentan en la tabla 6.5. Se distinguen también resultados de un muestreo en superficie del cuerpo vetiforme Don Guillermo.

Sistema	Valores	Au	Ag	Bi	Cu	Mo	Pb	Zn	As	Sb	Hg
Brechas	Media	0,071	0,72	75,4	30,03	15,36	93,67	62,12	126,11	7,6	185,24
	Máximo	2,05	10,7	5100	425	217	1060	475	2040	50	5850
	Mínimo	0,0025	0,24	1	2	0,5	1	0,5	5	2,5	0,1
	Threshold	0,028	1	28	46	20	87	147	131	10	170
Andesitas alteradas	Media	0,10	0,868	12,12	36,16	36,39	50,69	296,57	122,35	6,373	162,48
	Máximo	0,58	18,5	143	144	380	291	737	436	34	638
	Mínimo	0,005	0,25	1	7	0,5	1	5	6	2,5	0,1
	Threshold	0,128	0,25	16	53,5	29	75	550	198,5	2,5	277,5
Don Guillermo	Media	0,134	2,726	2,83	59,34	7,04	40,46	41,86	55,67	5,38	96,56
	Máximo	4,04	43,61	14	1114	32	242	188	562	45	1819
	Mínimo	0,05	0,25	2,5	6	1	1	0,5	2,5	2,5	0,1
	Threshold	0,065	1	2,5	42	8	56,5	65	57,5	2,5	89

Tabla 6.4. Parámetros de contenidos metálicos para cada uno de los sectores identificados en la porción central del área de estudio. Los valores de los elementos están expresados en [ppm], a excepción del Hg que se expresa en [ppb].

En la figura 6.29.a se observa la localización de las muestras analizadas con círculos amarillos. Sobre la imagen GeoEye se superponen las imágenes Raster generadas para facilitar el análisis de la distribución de cada elemento.

Como se observa en la figura 6.29.b los mayores valores de Cu se distribuyen de manera homogénea en la porción central del área de estudio, al norte de la quebrada de Las Mellizas, mientras que hacia el sur disminuyen, registrándose muestras anómalas aisladas. Un comportamiento similar se aprecia en la figura 6.29.c para el caso del Au, el cual muestra una distribución más regular en la región central, y anomalías puntuales en el sector de las brechas. Al igual que estos elementos, el Zn presenta sus mejores valores al norte de la Quebrada de Las Mellizas, en el sector de andesitas alteradas (Figura 6.29.h). El Mo si bien también muestra una distribución regular en ese mismo sector, también registra anomalías en el sector de las brechas con fragmentos de *vuggy quartz* y en los sectores con fuerte reemplazo silíceo (Figura 6.29.f).

El As se concentra en los afloramientos de las brechas con fragmentos de *vuggy quartz* y en los sectores de sílice pulverulenta (Figura 6.29.d). El Bi muestra una distribución similar a la del As,

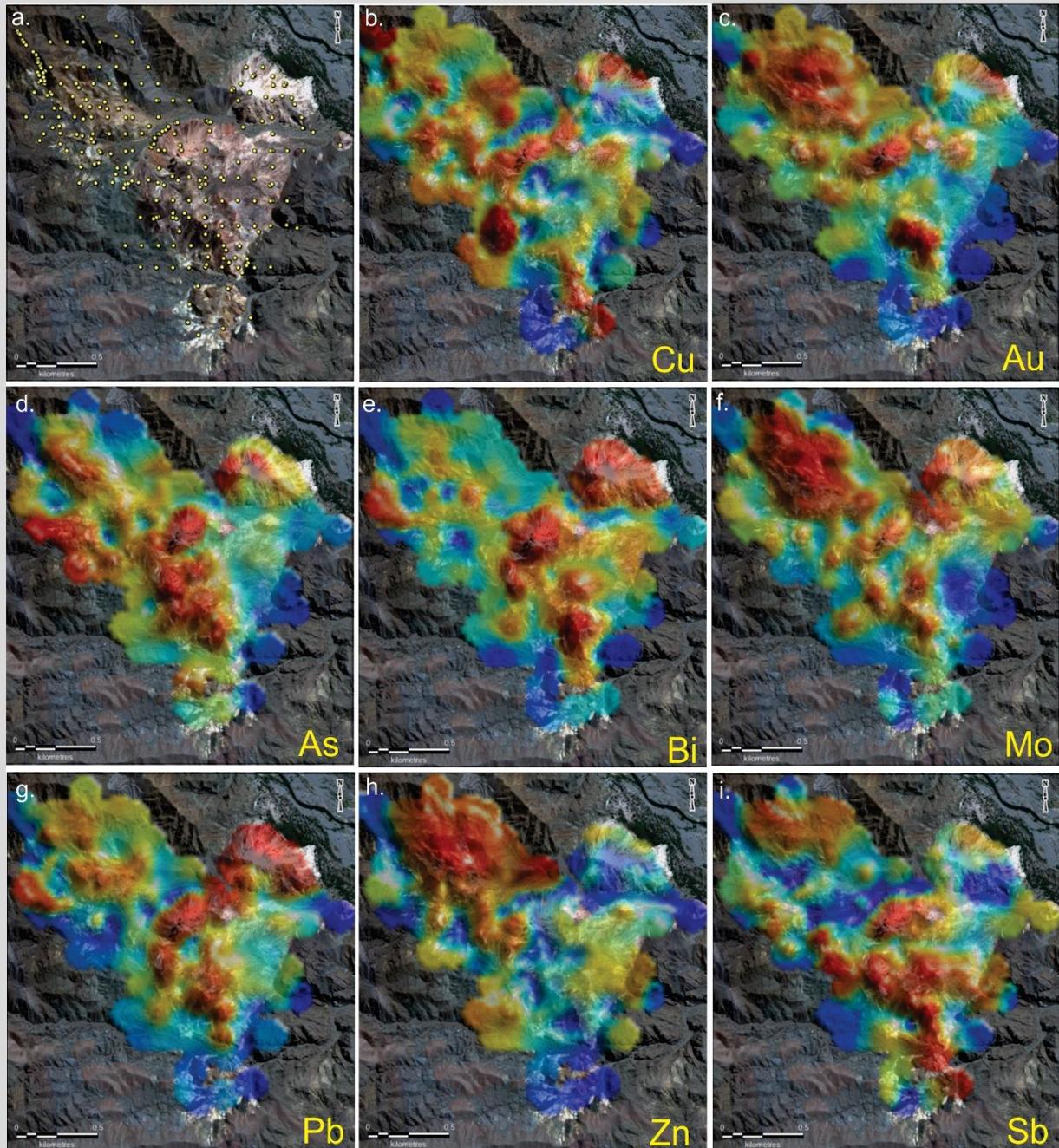
asociado principalmente a los sectores con extensa silicificación (Figura 6.29.e), aunque también muestra esporádicas y débiles anomalías en el sector central, y una muestra anómala en el sector más austral, coincidente con altos valores de Au.

El Pb por el contrario, se observa homogéneamente distribuido a lo largo de todo el distrito, aunque las muestras con anomalías mayores se corresponden con los afloramientos de las brechas con fragmentos de *vuggy quartz* y el sector con sílice pulverulenta al sur del sistema de vetas epitermales (Figura 6.29.g). Finalmente, el Sb muestra las anomalías más altas asociadas al sector sur de la quebrada de las Mellizas, disponiéndose dichas anomalías con una orientación NO-SE (Figura 6.29.h).

Al contrastar los datos absolutos de los elementos teniendo en cuenta los cuerpos identificados en este sector, puede observarse que donde se disponen las brechas (al sur de la quebrada de Las Mellizas) se registran anomalías de Au (hasta 2,05 ppm), de Bi (hasta 5100 ppm), Pb (hasta 1060 ppm), As (hasta 2040 ppm) y Hg (hasta 5850 ppb). A partir del análisis, se establece una correlación buena entre Au y Bi, moderada entre Bi y Pb, Bi y Sb, As y Mo, Sb y Mo, para este sector.

En el sector central, donde se disponen las andesitas alteradas (al norte de la quebrada de Las Mellizas), se observan bajas anomalías de Au (hasta 0,58 ppm), moderadas de Bi (hasta 143 ppm) y Cu (hasta 425 ppm), y altas de Mo (hasta 380 ppm). En cuanto a las correlaciones entre metales, se observa una buena correlación entre Au y Mo, Au y Zn, Bi y Pb.

Alrededor de la quebrada de Las Mellizas, se realizaron cuatro sondajes a mediados de los años 90 por la empresa *Sonoma Resources* (ver figura 6.24). No se tuvo acceso a dichos sondajes, sólo se contó con los resultados químicos de las muestras analizadas, por lo que no pudo establecerse una relación entre las litologías identificadas y los valores anómalos en profundidad. El análisis de estos datos se presentó en Delendatti (2005), donde expuso que los sondajes realizados en el sector central (CN2D y CN4D) presentan los mejores resultados geoquímicos, con valores anómalos de Au (67 ppb), Mo (64 ppm) y Pb (70 ppm), siendo considerablemente inferiores a los registrados en superficie y, a excepción del valor de Mo, el resto de los elementos no constituye anomalías de acuerdo al valor calculado de *threshold* (Tabla 6.4.).



6.4.4. Distribución de las alteraciones hidrotermales

Las alteraciones hidrotermales de este sector presentan una variada y compleja asociación de minerales relacionada a las diferentes estructuras y unidades identificadas. La determinación de las

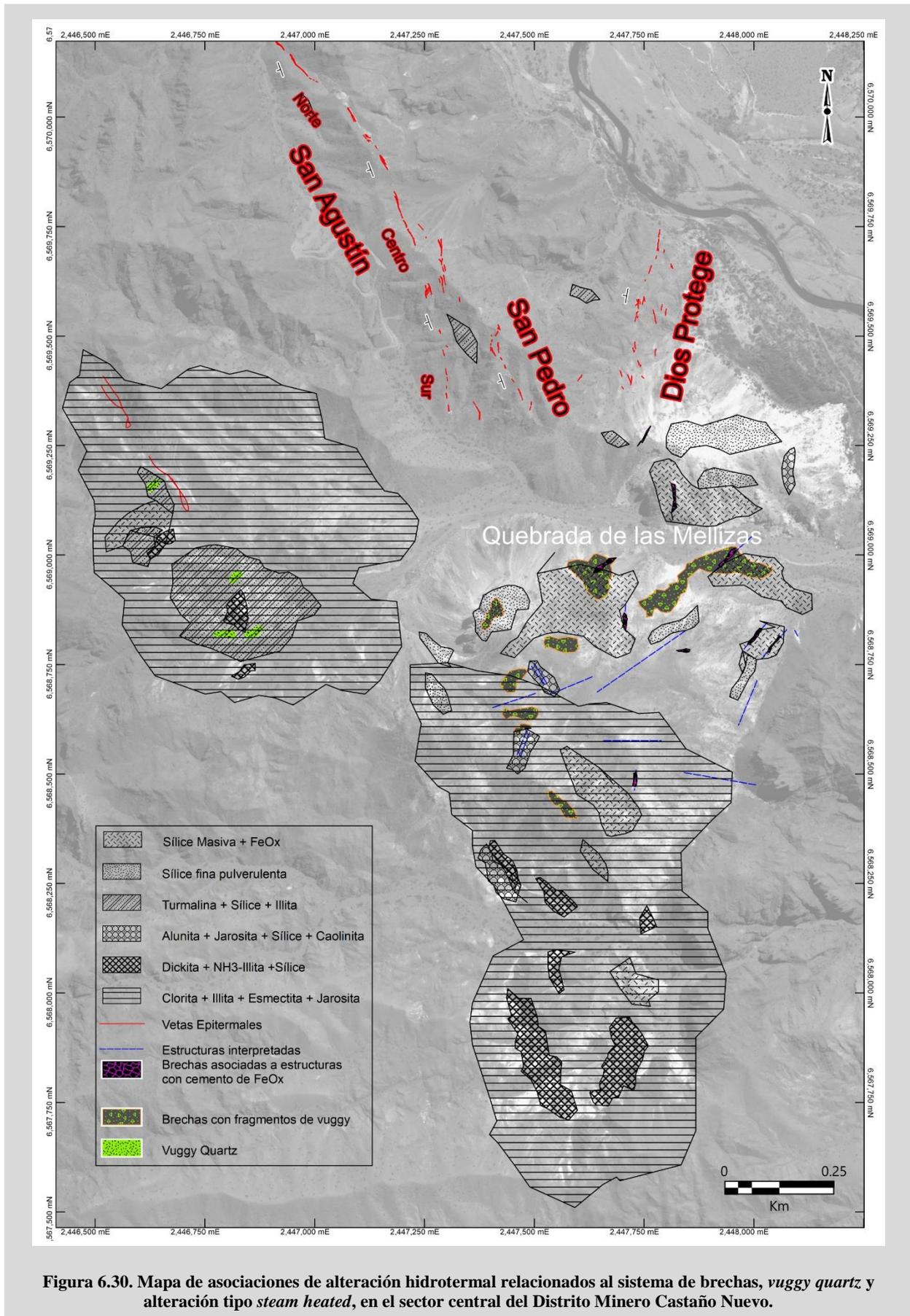
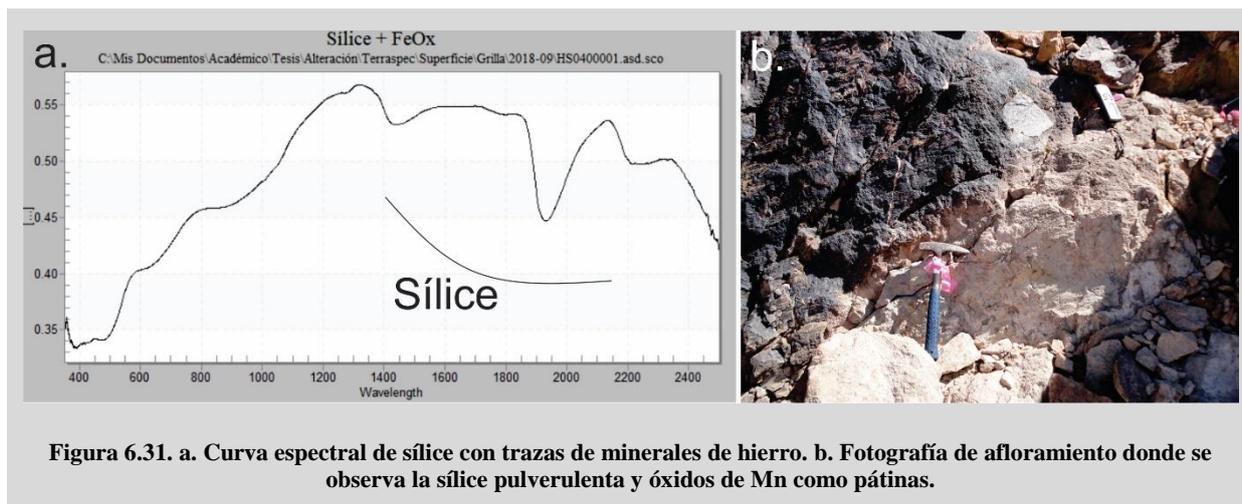


Figura 6.30. Mapa de asociaciones de alteración hidrotermal relacionados al sistema de brechas, *vuggy quartz* y alteración tipo *steam heated*, en el sector central del Distrito Minero Castaño Nuevo.

asociaciones de alteración hidrotermal se efectuó a través del muestreo a lo largo de transectas y su análisis mediante espectrometría de reflectancia de infrarrojo. Algunas variedades no identificadas mediante dicha metodología se determinaron con el uso de difracción de rayos X. De este modo, se establecieron las siguientes asociaciones de alteración hidrotermal que se presentan en el mapa de la Figura 6.30. Cabe destacar que en todo el sector abarcado por este mapa se observan abundantes venillas de yeso, sin una distribución particular. El yeso está presente en gran parte de las lecturas tomadas, independientemente de la asociación mineral a la que pertenezcan.

Asociación Sílice fina pulverulenta ± Óxidos de Fe/Mn: se concentra en la porción central del área de estudio (Figura 6.30), y los mejores exponentes de esta alteración se localizan en los afloramientos al sur del área que comprende al sistema de vetas de cuarzo/adularia. Comprende sectores donde sólo es posible detectar un material pulverulento que, al analizarlo, arroja una curva espectral con rasgos de absorción redondeados atribuibles a la firma del cuarzo (Figura 6.31.a). Óxidos de hierro, principalmente hematita, se encuentran como pátinas en algunos sectores y como relleno de fracturas. Se observan también pátinas de óxidos de manganeso (Figura 6.31.b).



Asociación Sílice masiva + Óxidos de Fe: esta asociación es la que reemplaza a los sectores lixiviados y las brechas tipo *vuggy*, dispuesta en el sector central en inmediaciones de la quebrada de Las Mellizas. El reemplazo es completo, pero aún pueden distinguirse rasgos texturales que permiten establecer la roca original.

En el sector sur, a la altura de la quebrada del Alumbre se destaca un afloramiento de tobas finas, silicificadas con pátinas de óxidos de hierro en fracturas. Sobre un faldeo se observan labores pirquineras de formas irregulares y escasos metros. En su interior se observan lentes irregulares paralelas a la fina estratificación en la que crece un mineral blanco fibroso con brillo vítreo (Figura 6.32). De acuerdo al estudio de difracción de Rayos X este mineral pudo identificarse tentativamente como alunógeno. Una lectura con un equipo portátil de fluorescencia de Rayos X sólo arrojó valores de S, que sería consistente con la composición de dicho sulfato.

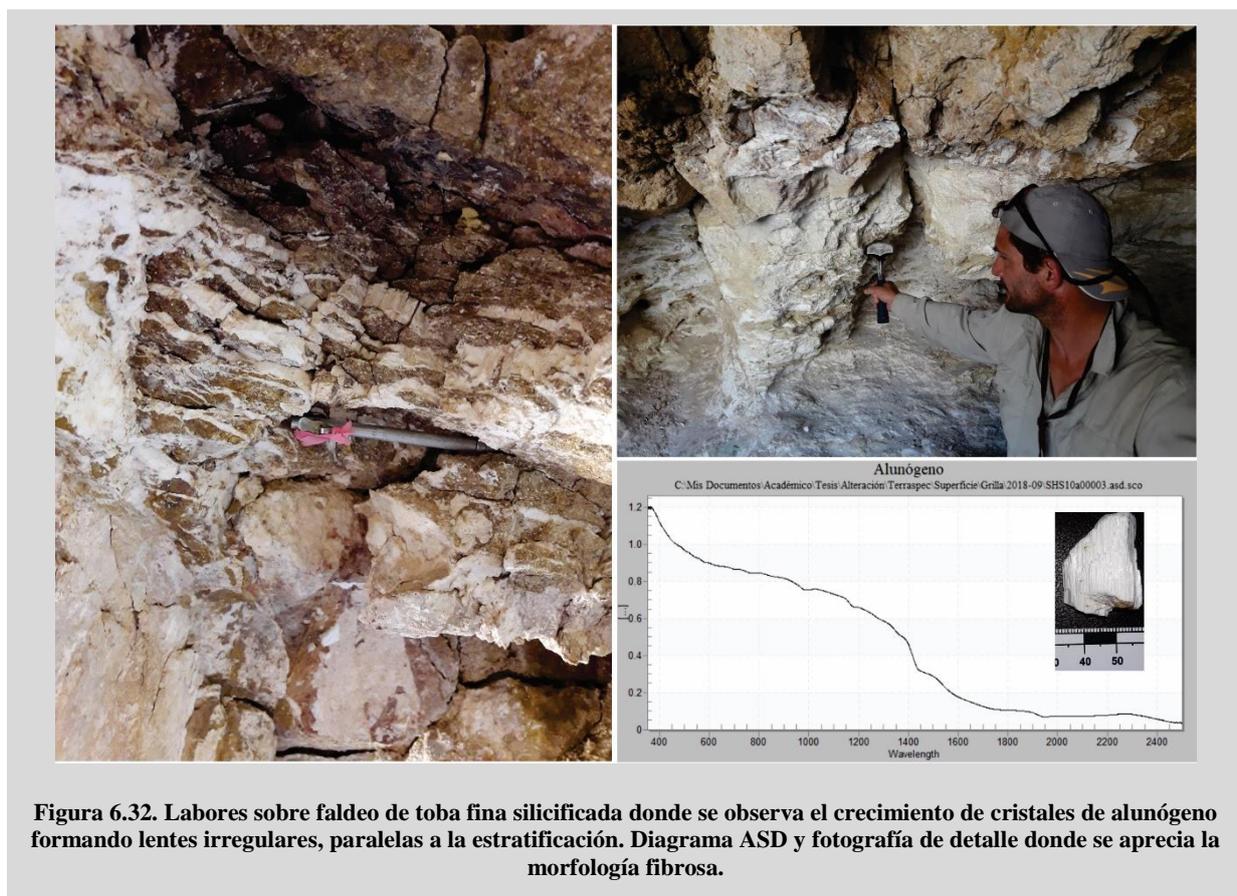


Figura 6.32. Labores sobre faldeo de toba fina silicificada donde se observa el crecimiento de cristales de alunógeno formando lentes irregulares, paralelas a la estratificación. Diagrama ASD y fotografía de detalle donde se aprecia la morfología fibrosa.

Asociación Sílice + Jarosita + Alunita ± Caolinita: esta asociación se limita a sectores fuertemente alteados, con material deleznable blanco y rosa, en menor medida amarillento, asociado a fracturas (Figura 6.33.a). La jarosita es el mineral más común y está presente en todas las muestras (Figura 6.33.b). La presencia de alunita fue confirmada mediante el uso de difracción de rayos X (Figura 6.33.c), ya que en los espectros no es clara su presencia, y debido a las frecuentes mezclas con los demás minerales (Figura 6.33.d), los rasgos diagnósticos se ven enmascarados (1430 nm, 1480nm y 1760 nm). Los minerales se encuentran asociados a fracturas, rellenando las mismas y alterando a las rocas encajantes (Figura 6.33.e).

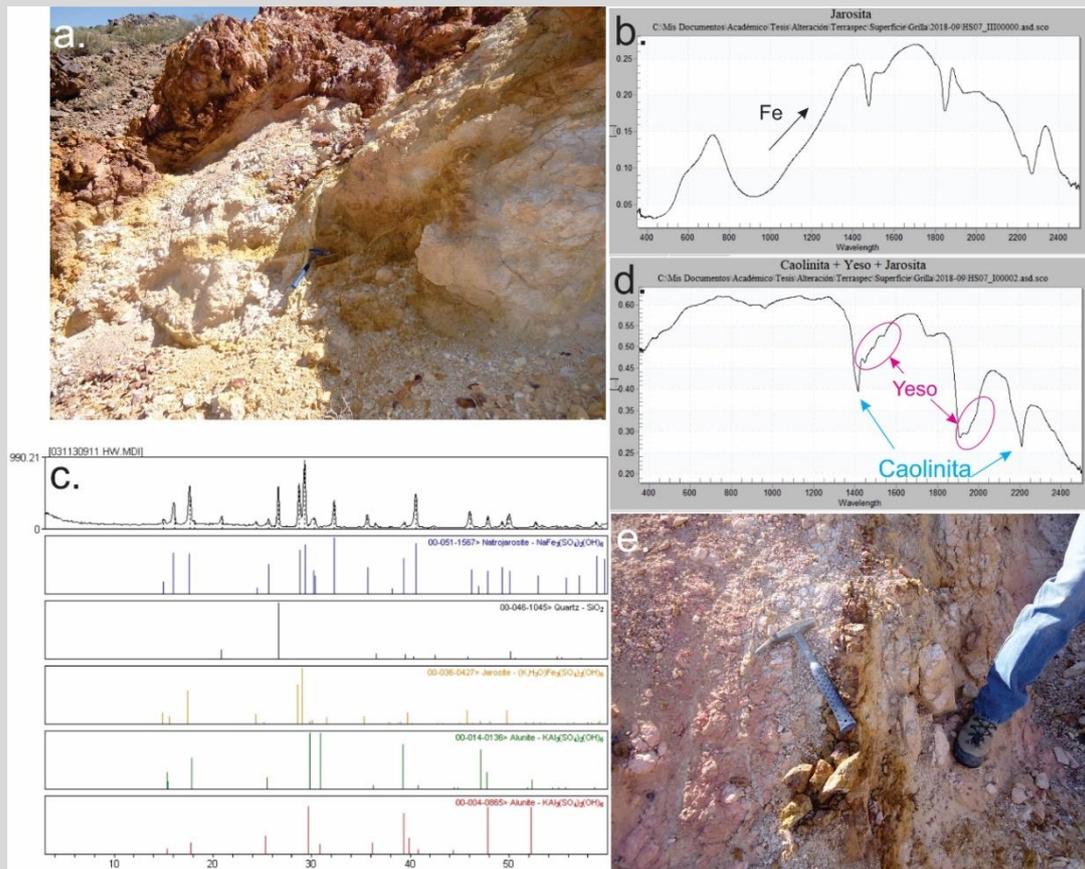
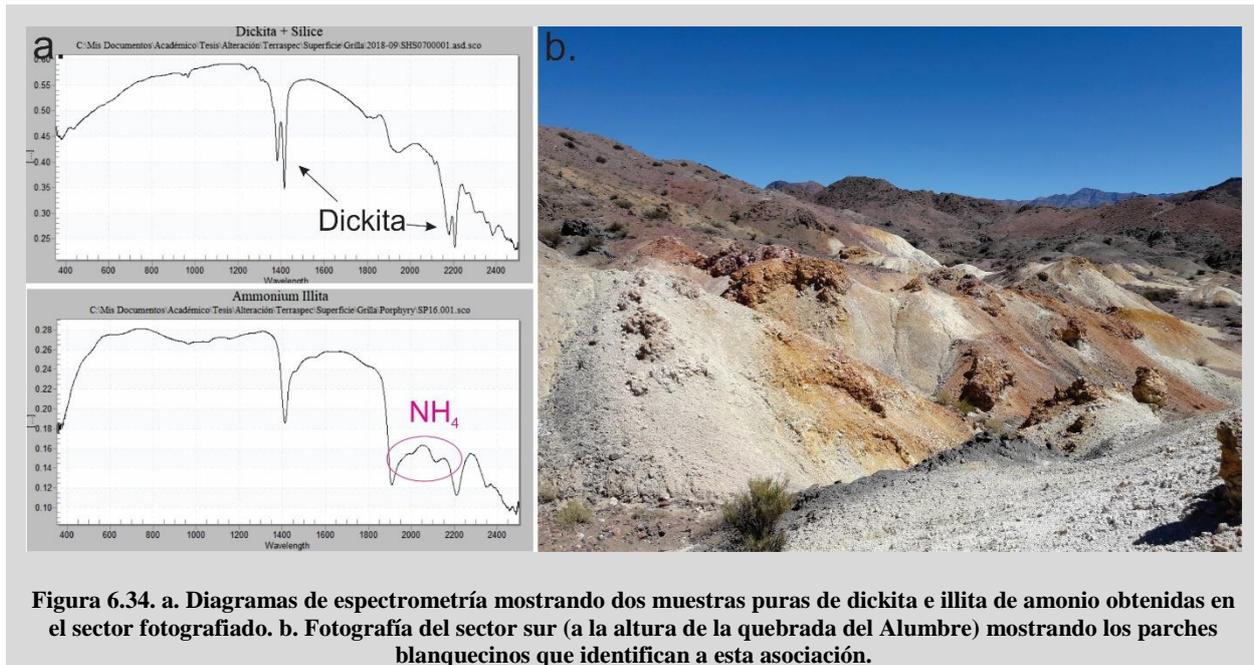


Figura 6.33. a. Afloramiento de rocas tobáceas fuertemente alteradas. b. Curva espectral característica de la jarosita obtenida de muestras provenientes del sector mostrado en a. c. Difractograma de Rayos X donde se observa la asociación Alunita + Jarosita + Sílice. d. Curva espectral mostrando la asociación caolinita + yeso + jarosita obtenida sobre la misma muestra del difractograma de c. e. Fotografía de afloramiento en el sector central del área de estudio, donde se observa una fractura rellena con jarosita y un halo alrededor de la misma conformado por la asociación alunita+jarosita+cuarzo.

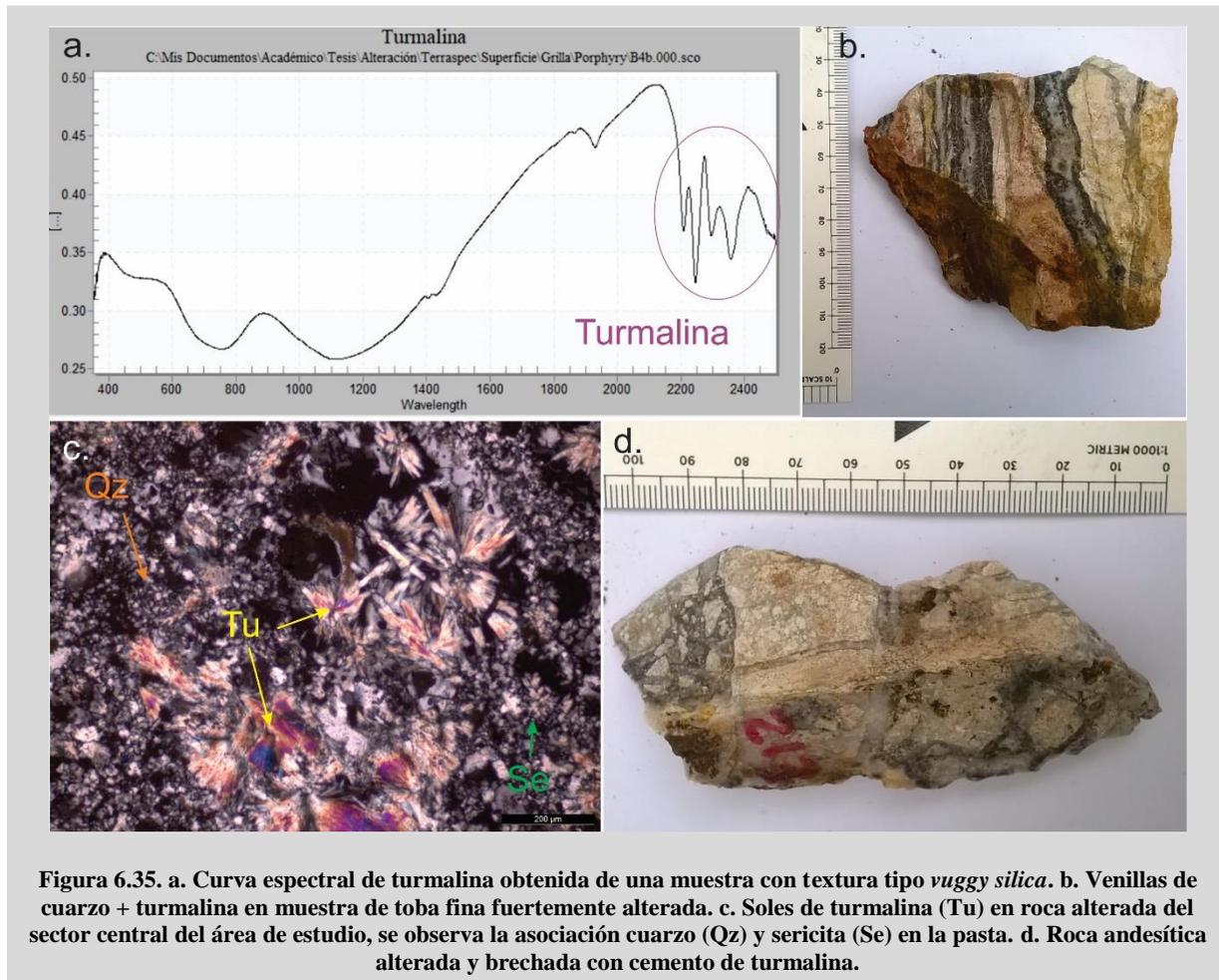
Asociación Dickita + NH_4 Illita + Sílice \pm Óxidos de Hierro: constituye la alteración característica del sector más austral, donde se observen finas tobas y brechas piroclásticas de la Unidad II completamente reemplazadas por esta asociación. Predomina dickita, aunque localmente la NH_4 -illita se vuelve el único mineral presente en los espectros (Figura 6.34.a) También se observan afloramientos de andesitas de la Unidad I cortados por múltiples fracturas por donde circularon los fluidos, dando lugar a una alteración pervasiva intensa y generando parches blanquecinos/amarillentos coincidentes con la disposición de las fracturas (Figura 6.34.b). Los minerales se disponen como masas irregulares y fueron detectados en su totalidad mediante el uso del espectrómetro de reflectancia de infrarrojo. Esta asociación también fue detectada en los afloramientos de las rocas que rodean a los sectores con textura tipo *vuggy quartz* aunque en menor proporción.



Asociación Turmalina + Sílice + Muscovita: esta asociación se dispone en el sector central, al norte de la quebrada de las Mellizas, donde las rocas andesíticas de la Unidad I se hallan fuertemente alteradas, formando un halo alrededor de los afloramientos de *vuggy quartz* (Figura 6.30). Hacia el norte siguiendo el corredor estructural NO-SE establecido previamente, se registran muestras con turmalina (Figura 6.35.a) y cuarzo. Esta alteración se dispone en venillas, con texturas bandeadas que muestran alternancia de bandas con predominio de cuarzo vs. predominio de turmalina (Figura 6.35.b). Por otro lado, al analizar la pasta de las rocas que las contienen se observa un reemplazo fuerte por micas blancas y cuarzo, y la presencia de agregados de turmalina, frecuentemente formando soles (Figura 6.35.c).

Además de venillas aisladas con esta mineralogía, se observan sectores con un fuerte brechamiento, cuyo cemento corresponde a la asociación turmalina-cuarzo (Figura 6.35.d). La distribución de estas brechas es errática, aunque presentan mejor desarrollo hacia el norte, en cercanías de la estructura vetiforme Don Guillermo.

Si bien esta asociación pareciera restringirse al sector centro norte del corredor NO-SE, se detectaron algunas lecturas con estos mismos minerales en venillas de las rocas de la Unidad I en el sector oriental del distrito, en cercanía a los afloramientos de las vetas (principalmente San Pedro y San Agustín). Esas lecturas provienen mayoritariamente de sondajes, en sectores tanto distales como proximales a las estructuras. En los espectros obtenidos, se determinó la presencia de turmalina, también asociada a venillas con características similares a las antes descritas, que frecuentemente se hallan cortadas y desplazadas por delgadas venillas de cuarzo gris medio, similar al descrito para el primer evento de relleno de las vetas epitermales de cuarzo/adularia, aunque no se descarta que puedan ser de un pulso posterior ya que no se encontraron evidencias que vinculen esas venillas al sistema principal de vetas.



Asociación Clorita + Illita + Esmectita ± Jarosita ± Caolinita: corresponde a la asociación de minerales que se encuentran en los halos más distales de los cuerpos de brechas y de los sectores de *vuggy quartz*. El mineral más común es la clorita, frecuentemente acompañado por illita (± esmectitas), y de manera local se acoplan a esta asociación, caolinita y jarosita.

6.5. Discusión e integración de los resultados

Las manifestaciones hidrotermales descritas en el presente capítulo comprenden dos tipos de depósitos con características geológicas particulares que permiten diferenciarlos. El primer depósito presentado constituye el sistema más relevante en términos económicos y es el que identifica al Distrito Minero Castaño Nuevo. Está caracterizado por un sistema de vetas epitermales de cuarzo/adularia, limitadas al sector noreste del área de estudio y formadas a partir de fluidos neutros. El segundo tipo de manifestación identificado está vinculado a la circulación de fluidos ácidos, que generaron cuerpos fuertemente lixiviados, posteriormente silicificados, y afectados por eventos explosivos dando lugar a grandes depósitos de brechas y alteraciones tipo *steam heated* asociadas. Cada uno de estas

manifestaciones presenta fuertes controles estructurales y litológicos, los cuales se resumen y explican a continuación.

6.5.1. Sistema de vetas de cuarzo/adularia

Las vetas de cuarzo/adularia están relacionadas a fracturas extensionales. La veta Dios Protege se emplaza en una falla de rumbo con movimiento siniestral, mientras que las vetas San Pedro y San Agustín se vinculan a dos fallas normales con leve componente de rumbo (siniestral y dextral respectivamente).

El relleno de las mismas es similar y comprende una compleja sucesión de eventos (al menos seis) que marcan velocidades de ascenso vs. apertura de las fracturas fluctuantes. La alternancia de pulsos de cuarzo de variedades cristalinas con otros de variedades criptocristalinas a amorfas da cuenta de este fenómeno y tienen una relación directa con la depositación de los metales. Asimismo, la identificación de brechas con texturas tipo cocardas (Eventos 2 y 4) alternadas con eventos de relleno simple o brechas sin crecimientos concéntricos, también son una evidencia de la fluctuación en las velocidades de ascenso de los fluidos. De acuerdo a Frenzel y Woodcock (2014), la apertura de las fracturas a velocidades mayores que las que puede alcanzar el fluido durante su ascenso genera un desbalance de presiones y consiguiente desarrollo de una fuerza de succión opuesta (Sibson, 1986), generando una implosión hidráulica y el desarrollo de las brechas tipo cocarda (Eventos 2 y 4). En cambio, cuando la velocidad del fluido supera la velocidad de propagación de la fractura, no hay tiempo para el crecimiento ordenado alrededor de un punto, sino que se generan brechas con escasa participación de cemento, y éste se presentan en masas o con texturas groseras (Eventos 1, 3, 5 y 6).

En particular, el Evento 6 podría ser considerado como un evento tardío, producto de una reactivación de las fallas que contienen a las estructuras mineralizadas. De acuerdo a Jovic et al. (2019), estas brechas se denominan tectónico-hidrotermales, comúnmente presentan morfologías irregulares y cortan a los eventos de relleno hidrotermal anteriores, pudiendo generar elevadas leyes de metales producto de procesos de removilización y reprecipitación de los mismos. La presencia de brechas tipo *crackle* con cemento de cuarzo fino con texturas de recristalización indican una fracturación hidráulica (Jébrak, 1997; Chauvet et al. 2006). Por otro lado, las brechas de tipo caóticas con fragmentos de tamaños variados y gran rotación de los mismos pueden considerarse evidencias de procesos tectónicos (Jébrak, 1997). De este modo, el Evento 6 está representando por una brecha tectónico-hidrotermal (Jovic et al. 2019) desarrollada de manera tardía, que removiliza los metales de eventos anteriores.

Las variaciones en las velocidades del sistema junto con los cambios de presión, temperatura y composición del fluido, se ven reflejadas tanto en las diferentes variedades de fases minerales generadas (y texturas que conforman), como en las inclusiones fluidas en cada una de estas fases. Las temperaturas de homogeneización de inclusiones fluidas primarias registradas para el evento 2 arrojan un valor

promedio de 283,89°C para una cota aproximada de 1.680 m.s.n.m., una temperatura de 278,03°C para una cota de 1.750 m.s.n.m. y 273,89°C para la cota 1.830 m.s.n.m. Las salinidades se muestran constantes para las tres altitudes, siendo de 3,9% NaCl eq., 3,34% NaCl eq. y 3,75% NaCl eq., respectivamente. En este evento se constató la coexistencia de IF líquido dominante con vapor dominante que homogenizan a temperaturas similares, pero a diferentes fases. Asimismo, se registraron dos eventos posteriores que reflejan un aumento de temperatura, evidenciado por las temperaturas obtenidas para las FIAs pseudosecundarias medidas en las variedades de sílice recristalizada.

En el caso del evento 3, las inclusiones fluidas primarias pudieron ser evaluadas para cuatro cotas diferentes, siendo las temperaturas de homogeneización promedio para la cota de 1.585 m.s.n.m. de 334,85°C, para la cota 1.650 m.s.n.m. de 313,92°C, para la cota de 1.700 m.s.n.m. de 294,81°C y para la cota 1.830 m.s.n.m. de 250,16°C. Estas variaciones muestran un enfriamiento paulatino a medida que disminuye la profundidad. De igual modo se observa un leve descenso en las salinidades siendo en promedio 1,905% NaCl eq. para los sectores más profundos, y 0,786% NaCl eq. para las cotas más someras. En general las IF pertenecientes a este evento, son líquido dominante, solo se registraron algunas IF con predominio de fase vapor en la cota 1.700 m.s.n.m.

El cuarto evento muestra temperaturas mayores, entre 330°C y 340°C para una cota promedio de 1.680 m.s.n.m. Los cristales de cuarzo y amatista que conforman este evento presentan abundantes IF secundarias, dispuestas en trenes que atraviesan los cristales, y gran parte de estos trenes presentan IF con mayor desarrollo de la fase vapor, evidenciando un evento posterior donde se produjo una fuerte ebullición.

El evento 5, si bien no posee un estudio de inclusiones fluidas en el presente trabajo, presenta evidencias de ebullición, representadas por las texturas en enrejado detectadas en algunos sectores. Estas texturas suelen asociarse a la generación de CO₂ a partir de procesos de ebullición (Henley, 1985; Dong et al., 1995).

Finalmente, el evento 6, pese a la escasa población de inclusiones fluidas, permite apreciar un descenso de la temperatura del sistema evidenciado por una temperatura de homogeneización promedio de 287,88°C para la cota 1.630 m.s.n.m. La totalidad de las IF registradas son vapor dominante, lo que sería consistente con otro evento de ebullición.

El registro de procesos como el de ebullición permite establecer las posibles localizaciones de los clavos mineralizados. Debido al dinamismo característico de los sistemas epitermales, para una determinada profundidad puede haber registro de asociaciones de inclusiones que representan ebullición, alternadas con asociaciones de inclusiones entrampadas durante un momento de “no-ebullición”. La intensidad de la ebullición puede variar en tiempo y espacio dentro de un sistema a medida que éste evoluciona, pasando de estadios de no-ebullición (*non-boiling*), a ebullición sutil (*normal boiling, gentle boiling*) y finalmente ebullición intensa (*intense boiling, flashing boiling*), dando lugar a fluctuaciones en la localización de la base del horizonte de ebullición y, en consecuencia, en la

disposición de los clavos mineralizados (Moncada et al., 2012; Shimizu, 2014).

Este fenómeno estaría presente en las vetas del Distrito Minero Castaño Nuevo (especialmente en Dios Protege), donde las temperaturas y salinidades obtenidas para algunos de los eventos de relleno, evidencian la alternancia de fenómenos de ebullición con fenómenos de enfriamiento del sistema normales (Figura 6.36).

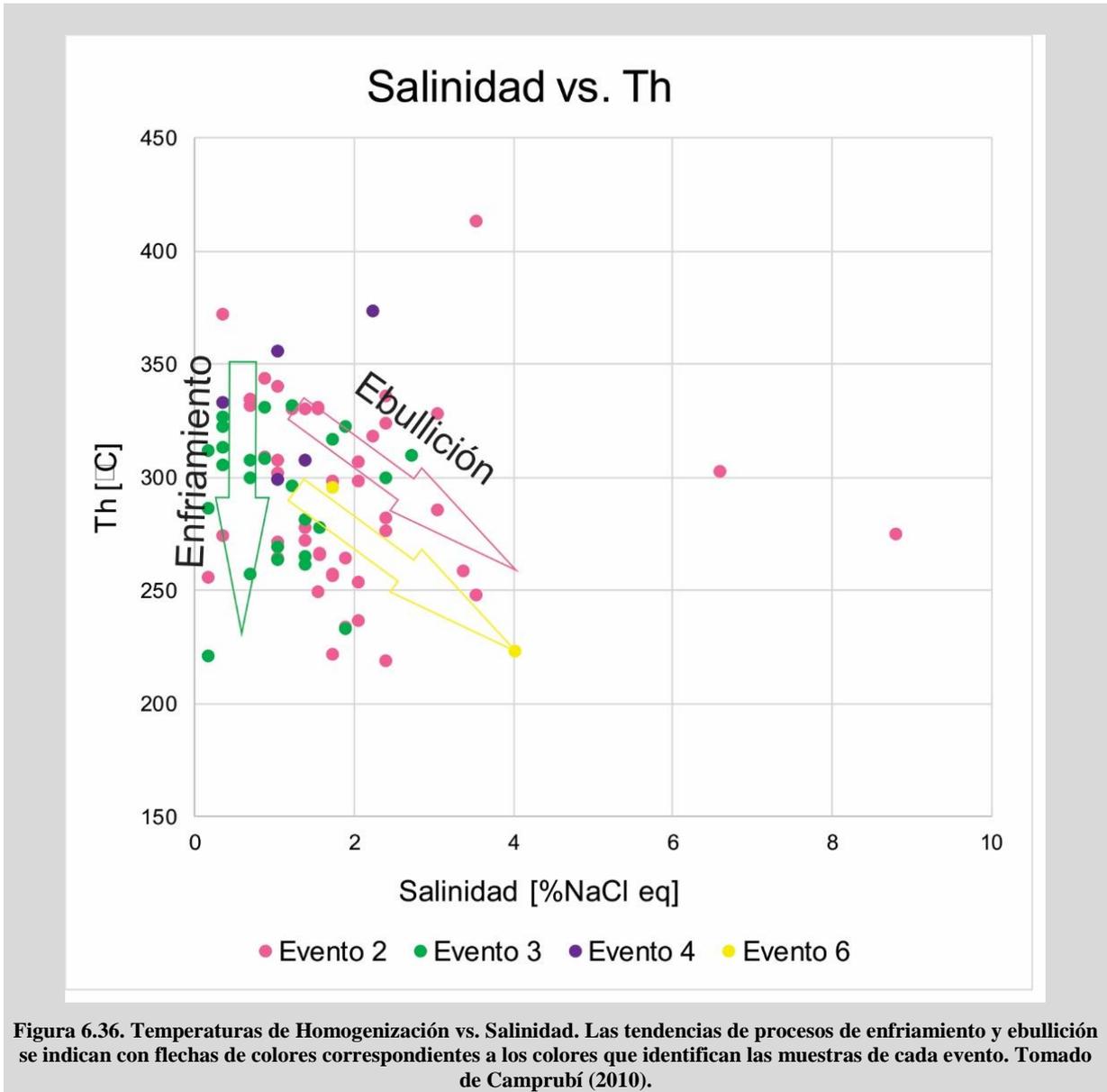


Figura 6.36. Temperaturas de Homogenización vs. Salinidad. Las tendencias de procesos de enfriamiento y ebullición se indican con flechas de colores correspondientes a los colores que identifican las muestras de cada evento. Tomado de Camprubí (2010).

Al analizar las FIAs determinadas para cada evento, en conjunto con la mineralogía asociada, se puede establecer que en el evento 2, se produjo una ebullición sutil, evidenciada por la coexistencia de inclusiones fluidas líquido dominante y vapor dominante, que homogeneizan a temperaturas similares. En el evento 3 las muestras de superficie (cota 1.700 m.s.n.m.) de la veta Dios Protege presentan un mayor predominio de inclusiones fluidas vapor dominante, mientras que en profundidad

solo se registran inclusiones líquido dominante (cota 1.585 m.s.n.m.), mostrando un pasaje desde estadios de no ebullición en profundidad a estadios de ebullición sutil a una cota cercana a superficie. Los valores obtenidos para este evento en las muestras de superficie de la veta San Agustín (1.830 m.s.n.m.) no muestran evidencias de ebullición. El cuarto evento no contiene suficientes elementos que permitan establecer un evento de ebullición, aunque no se descarta una ebullición sutil ya que se constató la presencia de algunas inclusiones fluidas vapor dominante que homogeneizan a temperaturas similares que las inclusiones líquido dominante. Asimismo, los trenes de inclusiones fluidas secundarias vapor dominante y las inclusiones medidas en sectores recristalizados del evento 4, revelan un evento posterior de ebullición. Dicho evento podría ser atribuido tanto al evento 5 como el 6, ya que en ambos existen evidencias de posibles procesos de ebullición. El evento 5 presenta texturas macizas y enrejado de calcita, las cuales pueden atribuirse a eventos de ebullición (Browne, 1978; Henley, 1985; Dong et al., 1995). El evento 6 solo registró unas pocas inclusiones fluidas primarias, mayoritariamente vapor dominante, que sumado al tipo de brecha generada por una rápida velocidad de ascenso y al predominio de sílice de baja temperatura, podrían representar un episodio de ebullición intensa.

A partir de los puntos anteriormente expuestos, puede establecerse que la sucesión de eventos representados en las estructuras vetiformes del sector noreste del Distrito Minero Castaño Nuevo constituyen tres episodios que pueden definirse como pre-, sin- y post-mineralización. El episodio pre-mineralización estaría representando por el evento 1, caracterizado por un pulso de cuarzo gris estéril. El episodio sin-mineralización correspondería a los eventos 2, 3 y 4, de los cuales el primero es el que contiene los mayores valores de Au y Ag, asociados a brechas tipo cocardas y procesos de ebullición sutil a temperaturas promedio de 283,89°C, mientras que los eventos subsecuentes registran una disminución de los contenidos metálicos y un aumento progresivo de las temperaturas. Finalmente, un episodio post-mineralización representado por las brechas tectónico-hidrotermales del evento 6, habría tenido lugar permitiendo la removilización y concentración de los metales, a partir de procesos de ebullición violenta, a una temperatura promedio de 287,88°C.

De acuerdo a Moncada et al. (2012), en los sistemas donde ocurre una ebullición intensa, un sector acotado de alta ley (tipo bonanza) es más probable de encontrarse hacia la base de la zona de ebullición, mientras que en sistemas caracterizados por una ebullición sutil las leyes tenderán a ser más bajas y distribuidas a lo largo de una distancia vertical mayor por encima de la base de la zona de ebullición. De este modo, para los sistemas que presentan una ebullición sutil las mayores leyes podrían localizarse a cierta distancia de la base del horizonte de ebullición (Moncada et al., 2012; Simmons y Browne, 2000). El hecho de que los mejores valores de Au se hayan registrado en el evento 6, el cual presenta evidencias de ebullición intensa, en conjunto con la localización del mismo en los niveles superiores estudiados y en los sectores de mayor apertura tanto en la veta Dios Protege como San Agustín, permiten establecer que el mecanismo más plausible para la depositación de la mineralización sería la ebullición intensa.

En la veta Dios Protege, los procesos de ebullición violenta fueron constatados en cercanías a la superficie, mientras que en San Agustín no fue posible establecer dicho proceso. Esto podría explicarse en parte por la morfología de las estructuras, que favorecieron el ascenso rápido de fluidos en diferentes zonas de apertura, y en parte por diferentes niveles de exposición entre ambas vetas. Esto último también se registra en la distribución de las alteraciones las cuales, si bien son limitadas espacialmente debido a la neutralidad de los fluidos y la escasa reactividad de la roca hospedante, muestran una zonación vertical y horizontal, asociadas a las temperaturas y profundidades del sistema. En particular la asociación epidoto + clorita + calcita fue constatada en superficie en torno a la veta Dios Protege, mientras que, en San Agustín, sólo se registró en los sondajes.

La profundidad para un sistema en ebullición puede ser estimada de acuerdo a las temperaturas de homogeneización y salinidades según el diagrama propuesto por Hass (1971). Para el sistema de vetas del Distrito Minero Castaño Nuevo fueron calculadas entre 800 y 900 m, aproximadamente (Figura 6.37), teniendo en cuenta las temperaturas y salinidades estimadas para los eventos 2 y 6, los cuales presentan evidencias de ebullición y se asocian a los mejores valores de Au (\pm Ag).

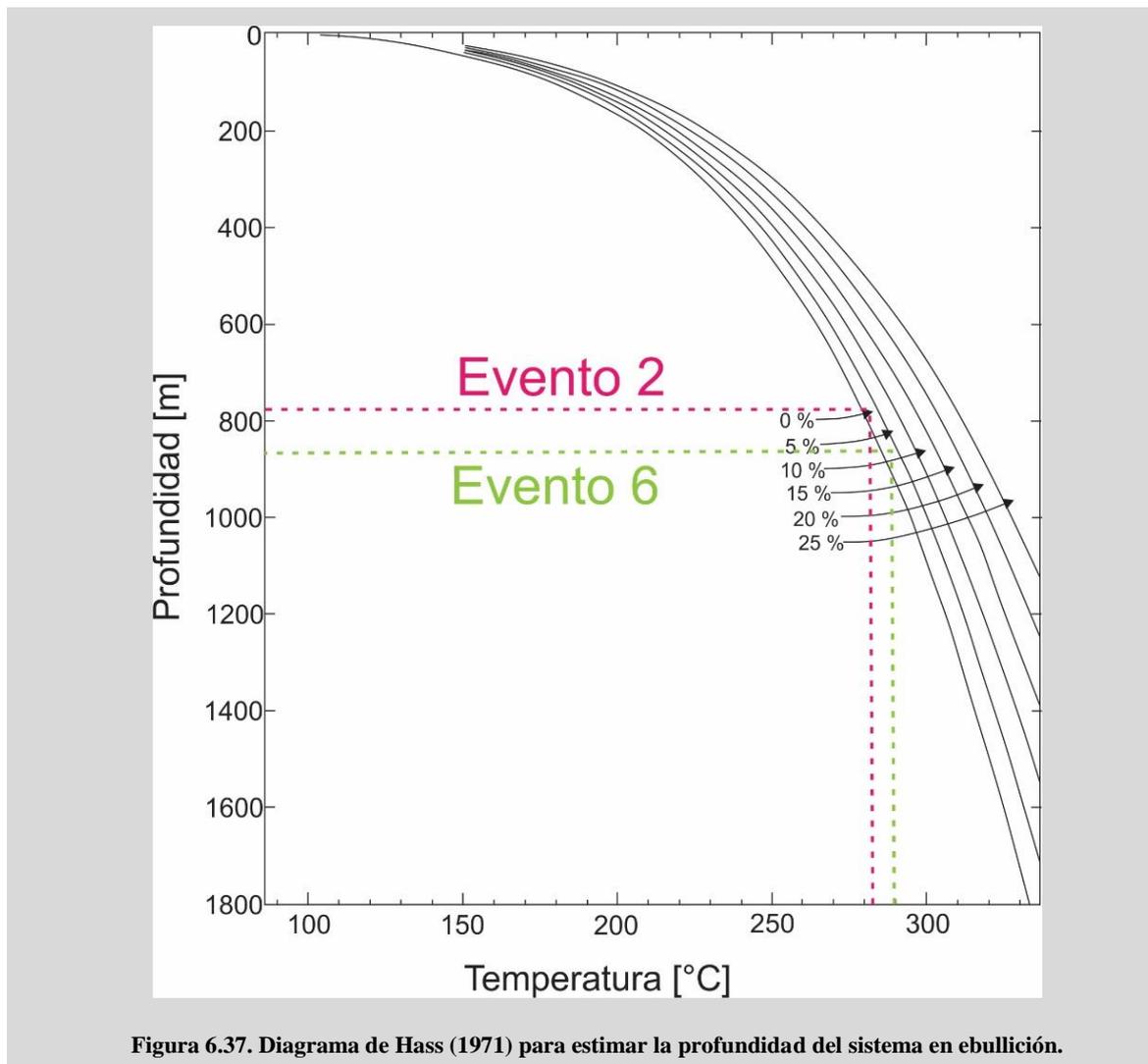


Figura 6.37. Diagrama de Hass (1971) para estimar la profundidad del sistema en ebullición.

Debido a la naturaleza disímil de las fallas que contienen a las vetas estudiadas, la disposición de los horizontes con mayor contenido de metales es diferente para cada una de ellas. Para la veta Dios Protege los clavos estarían dispuestos verticalmente, concordante con el desarrollo de una falla de rumbo, mientras que en las otras dos vetas los clavos tendrían una disposición inclinada, para el caso de San Pedro hacia el sur y para San Agustín hacia el norte, debido a la fuerte componente normal que controla estas estructuras (Sibson, 1996; Nelson, 2006). Esto podría constituir una explicación plausible para la ausencia de interceptos en la mayoría de los sondajes de las vetas del distrito, los cuales fueron direccionados a zonas de cierre de la estructura, tanto lateral como verticalmente.

La edad del sistema de vetas calculada en trabajos anteriores en base a dataciones K/Ar y Ar/Ar en adularias, es consistente con las estimadas para la secuencia volcánico-piroclástica que las contiene. La edad de la veta Dios Protege (267 ± 6 Ma, K/Ar en adularia; Delendatti, 2005) y las edades de la veta San Agustín ($265,9 \pm 2,1$ y $267,0 \pm 2,2$ Ma, Ar/Ar en adularias; Grignola, 2017) son más jóvenes que aquellas calculadas para la Unidad I ($271,2 \pm 1,6$ y $272,6 \pm 2,3$ Ma, U/Pb en circones, ver Capítulo 3). Asimismo, presentan edades similares a la edad de la Unidad III ($267,6 \pm 3,0$ Ma, U/Pb en circones, ver Capítulo 3), la cual no es atravesada por las estructuras y carece de alteración hidrotermal.

6.5.2. Sistemas de brechas y sílice residual

El sistema de vetas en superficie se interrumpe hacia el sur en la Quebrada de las Mellizas (vetas San Pedro y San Agustín), y contra una falla inversa (veta Dios Protege). Allí, afloran rocas con una intensa alteración hidrotermal. Este sistema de alteración contiene una serie de elementos que definen su naturaleza próxima a la superficie y el carácter más ácidos de los fluidos.

La circulación de fluidos estaría controlada por un corredor de disposición NO-SE al que se vinculan las alteraciones hidrotermales de mayor acidez. Las alteraciones identificadas durante el trabajo de campo tienen una correspondencia casi perfecta con las establecidas en el Capítulo 5. En el centro de dicho corredor quedan las evidencias de la circulación de fluidos ácidos vinculados posiblemente a un cuerpo intrusivo en profundidad, que al alcanzar sectores someros permitió la lixiviación y generación de cuerpos de sílice residual y oquerosa (andesitas con textura tipo *vuggy quartz*), y la alteración ácida caracterizada por la asociación dickita + sílice y NH_4 -Illita, la cual se encuentra asociada espacialmente a los cuerpos con textura *vuggy silica* y está limitada al corredor NO-SE identificado previamente, que contiene a dichos cuerpos.

La presencia de brechas monolíticas con fragmentos de *vuggy quartz*, evidencia un evento explosivo posterior al fenómeno de lixiviación y alteración ácida. Un ascenso de la fuente magmática o bien una inyección de material magmático dentro del sistema hidrotermal que estaba funcionando genera un aumento de la temperatura y puede constituir un disparador para una erupción (Lawless et al., 1997). De acuerdo a Nelson y Giles (1985), una intrusión magmática y la actividad sísmica

probablemente asociada puede generar a una erupción hidrotermal, ya que cualquier contribución de calor magmático o volátiles podría generar una gran sobre-presurización. La presión ejercida por el vapor generado a partir del calentamiento de aguas meteóricas da lugar a explosiones en niveles corticales someros, generando brechas freáticas (Corbett y Leach, 1998). Este proceso habría tenido lugar en el sector central del Distrito Minero Castaño Nuevo y habría contribuido a la formación de las brechas con fragmentos de *vuggy quartz*. Trabajos previos, postulan que el origen de estas brechas corresponde a una erupción freatomagmática (Delendatti et al., 2002; Delendatti, 2005), pero de acuerdo a la clasificación utilizada ese tipo de brechas requiere de la presencia de fragmentos juveniles, los cuales no pudieron ser observados en los afloramientos mapeados.

El progresivo ascenso de fluidos magmáticos y su aporte de calor, podría también ser el generador de la asociación de alteración de turmalina + sílice + muscovita, la cual se limita espacialmente al sector norte del corredor NO-SE y se superpone a la alteración ácida previamente generada. Esto se evidencia con la presencia de venillas de cuarzo-turmalina que cortan a las rocas con textura tipo *vuggy silica*, y la presencia de *clusters* y soles de turmalina en dichas rocas.

Los sectores caracterizados por la alteración silíceo con texturas pulverulentas y macizas, con óxidos asociados, representan las expresiones más superficiales del sistema. Espacialmente se encuentran vinculadas a la asociación sílice + jarosita + alunita ± caolinita, la cual se emplaza en fracturas en la periferia de los sectores donde se disponen los niveles silíceos. Estas alteraciones, de naturaleza ácida, se interpretan como el producto de la circulación, por encima del nivel freático, de fluidos ácidos relacionados a la circulación de aguas calentadas por vapor (*steam heated*). Este tipo de alteración se asocia tanto a sistemas epitermales de alta sulfuración, como a sistemas de baja sulfuración y erupciones hidrotermales (Sillitoe, 2015). En este caso podrían ser producto del continuo aporte de calor al sistema por fuentes magmáticas, que generan el ascenso de los fluidos calentados hasta interceptar el nivel freático.

La distribución de los distintos cuerpos identificados y de las respectivas alteraciones que los acompañan, muestran una relación estrecha con la localización de las anomalías de ciertos metales. De este modo, los mayores contenidos de Au se vinculan a los sectores dentro del corredor establecido NO-SE, particularmente donde se encuentran los pequeños afloramientos con textura tipo *vuggy quartz* y las brechas generadas a partir de estos (Figura 6.38a). El Hg (Figura 6.38.b) se asocia principalmente a los sectores donde predominan las brechas y los depósitos de sílice asociados al proceso de *steam heated*. De igual forma, el As (Figura 6.38.c) si bien parece seguir la disposición del corredor NO-SE, muestra valores especialmente anómalos relacionados tanto a los cuerpos de brecha como a los depósitos de sílice pulverulenta. El Bi en cambio se limita a este último sector (Figura 6.38.d).

La edad de este sistema, si bien no pudo establecerse de manera directa, puede acotarse de manera tentativa a partir de las relaciones de campo. Los primeros trabajos en el área establecieron una edad terciaria para estos cuerpos (Alonso, 1982; Serafini, 1982) en base a la estructuración NO-SE que

sería concordante con la de la Faja del Indio (Delendatti, 2002). Posteriormente, Delendatti (2005) asignó una edad pérmica al sistema de brechas estableciendo que las mismas constituyen un sistema de alta sulfuración proximal a un intrusivo no aflorante y que el sistema de vetas formaría parte de las fases distales donde el fluido es neutralizado.

En el presente trabajo, no fue posible establecer con certeza la edad de este sistema, pero de manera tentativa, en base a las relaciones de campo podría ser asignado al Pérmico. Los intrusivos básicos, que fueron datados en $270,6 \pm 3,0$ Ma (U/Pb en circones, Capítulo 3), se encuentran en el medio de los sectores fuertemente alterados, pero no presentan alteración hidrotermal. Por otro lado, la Unidad III cubre a las tobas finas fuertemente alteradas en la quebrada del Alumbre, y la edad de la misma fue estimada en $267,6 \pm 2,6$ Ma (U/Pb en circones, Capítulo 3).

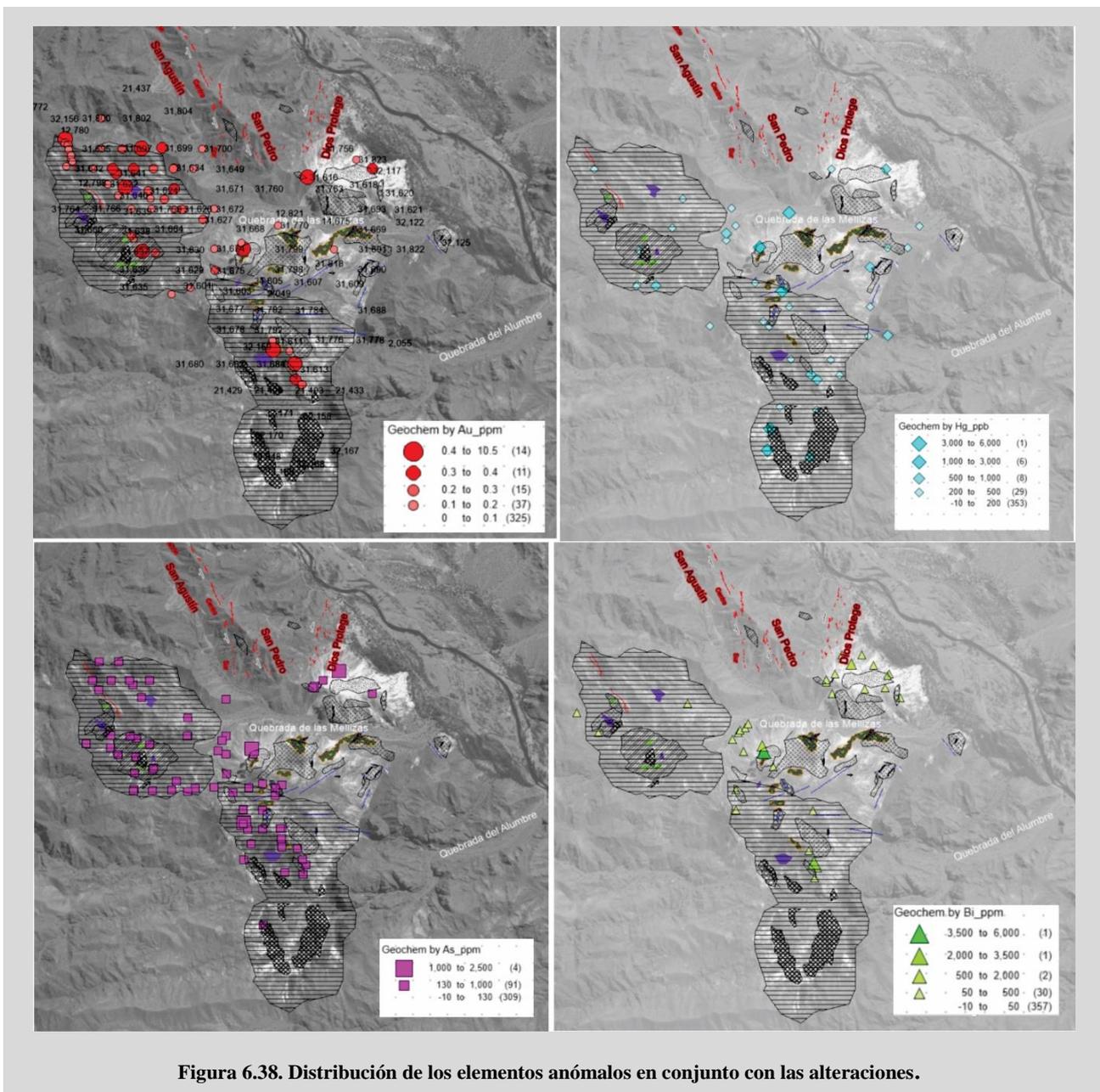


Figura 6.38. Distribución de los elementos anómalos en conjunto con las alteraciones.

6.6. Trabajos citados en el Capítulo 6

- Adams, S.F. 1920. A microscopic study of vein quartz. *Economic Geology* 15: 623-664.
- Albinson, T., Norma, D.I., Cole, D. y Chomiak B. 2001. Controls on Formation of Low-Sulfidation Epithermal Deposits in Mexico: Constraints from Fluid Inclusion and Stable Isotope Data. *Society of Economic Geologist Special Publication* 8: 1-32.
- Allmendinger, R. 2017. FaultKin7 [<http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/pro>].
- Alonso, J. 1982. Prospección geológica y exploración primaria del sector de alteración Castaño Nuevo. Dpto. Calingasta, San Juan. Trabajo Final de Licenciatura (inédito). Universidad Nacional de San Juan. San Juan. 126 p.
- Bodnar, R.J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57: 683-684.
- Bodnar, R.J. 2003. Introduction to Aqueous-electrolyte Fluid Inclusions. En: Samson, I., Anderson, A. y Marshall, D. (ed.) *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Capítulo 4: 81-99. Ontario.
- Browne, P.R.L. 1978. Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Annual Reviews in Earth and Planetary Science* 6: 229-250.
- Browne, P.R.L. y Lawless, J.V. 2001. Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere. *Earth Science Reviews* 52: 299-331.
- Camprubí, A. 2010. Criterios para la exploración minera mediante microtermometría de inclusiones fluidas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 62 (1): 25-42.
- Chauvet, A., Bailly, L., André, A.S., Monié, P., Cassard, D., Llosa Tajada, F., Rosas Vargas, J. y Tuduri, J. 2006. Internal vein texture and vein evolution of the epithermal Shila-Paula district, southern Peru. *Mineralium Deposita* 41: 387-410.
- Clark, L.V. y Gemmel, J.B. 2018. Vein Stratigraphy, Mineralogy, and Metal Zonation of the Kencana Low-Sulfidation Epithermal Au-Ag Deposit, Gosowong Goldfield, Halmahera Island, Indonesia. *Economic Geology* 113: 209-236.
- Cócola, M.A., Mas, G.R., López, N.A. y Bengochea, L. 2011. Adularia de la Veta Dios Protege, Distrito Minero Castaño Nuevo, San Juan. Características ópticas y análisis del estado estructural. 19° Congreso Geológico Argentino, Actas: 1074-1075, Neuquén.
- Cócola, M.A., Strazzere, L., D’Annunzio, M.C. y Guido, D.M. 2019. Estudio estructural, mineralógico y geoquímico de la veta Dios Protege, Distrito Minero Castaño Nuevo, San Juan, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 76 (3): 263-278.
- Connolly, P.T. y Cosgrove, J.W. 1999. Prediction of static and dynamic fluid pathways within around and around dilational jogs. En: McCaffrey, K.J.W., Lonergan, L. y Wilkinson, J.J. (ed.) *Fractures, Fluid Flow and Mineralization*, Geological Society Special Publication 155: 105-121, Londres.
- Corbett, G.J. y Leach, T.M. 1998. Structure of magmatic ore systems. *Society of Economic Geologist, Special Publication* N°6: 31-68.
- Curewitz, D. y Karson, J.A. 1997. Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 79: 149-168.

- Davis, D.W., Lowenstein, T.K. y Spencer, R.J. 1990. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O, and NaCl-CaCl₂-H₂O. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54: 591-601.
- Davis, G.H. y Reynolds, S.J. 1996. *Structural Geology of rocks and regions*. 2nd edition. Wiley.
- Delendatti, G.L., Zangrandi, M. y Bastías, H. 2002. Relaciones entre alteración hidrotermal y estructuras: el caso de las brechas silicificadas del distrito Castaño Nuevo, Cordillera Frontal sanjuanina. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 445-450, El Calafate.
- Delendatti, G.L. 2005. Caracterización genética del complejo mineralizado Castaño Nuevo y su relación con el magmatismo Gondwánico en Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Juan (inérita), 213 p., San Juan.
- Dong, G. y Morrison, G.W. 1995. Adularia in epithermal veins, Queensland: morphology, structural state and origin. *Mineralium Deposita* 30, 11-19.
- Dong, G., Morrison, G.W. y Jaireth, S. 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland-Classification, Origin and Implication. *Economic Geology* 90: 1841-1856.
- Frenzel, M. y Woodcock, N.H. 2014. Cockade breccia: Product of mineralisation along dilational faults. *Journal of Structural Geology* 68: 194-206.
- Gemmell, J.B. 2007. Hydrothermal Alteration Associated with the Gosowong Epithermal Au-Ag Deposit, Halmahera, Indonesia: Mineralogy, Geochemistry, and Exploration Implications. *Economic Geology* 102: 893-922.
- Goldstein, R.H. y Reynolds, T.J. 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. En: *SEPM Short Course Handbook* 31, 199 p., Tulsa.
- Goodell, P.C. y Petersen, U. 1974. Julcani Mining District, Peru: A Study of Metal Ratios. *Economic Geology* 69: 347-361.
- Granier, T. 1985. Origin, damping, and pattern of development of faults in granite. *Tectonics* 4 (7): 721-737.
- Grignola, S. 2017. El Deposito Casposo epitermal de baja sulfuración de oro – plata: Alteración hidrotermal e implicancias geocronológicas en la mineralización de oro – plata, rocas volcánicas, diques y granitoides asociados espacialmente, San Juan – Argentina. Tesis Doctoral (inérita). Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo. 206 p.
- Hanawalt, J.D. 1986. Manual search/match methods for powder diffraction in 1986. *Powder Diffraction* 1: 7-13.
- Hass, J.L.J. 1971. The Effect of Salinity on the Maximum Thermal Gradient of a Hydrothermal System at Hydrostatic Pressure. *Economic Geology* 66: 940-946.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A.R. y González-Urrien, E. 2000. Exploration for Epithermal Gold Deposits. *Economic Geology Reviews* 13: 245-277.
- Henley, R.W. 1985. The geothermal framework of epithermal deposits. *Reviewa in Economic Geology* 2: 1-24.
- Hermitte, E. 1914. La Geología y Minería Argentinas en 1914. En: García E. (ed.), Tercer Censo Nacional. Volúmen 7: Censo de Las Industrias, p. 404-494, Buenos Aires.
- Jébrak, M. 1997. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution. *Ore Geology Reviews* 12 (3): 111-134.
- Jovic, S.M., Paez, G.N., Permuy Vidal, C., López, L. y Guido, D.M. 2019. Brechas tectónico-hidrotermales

- en sistemas epitermales. 13° Congreso de Mineralogía, Petrología Ignea y Metamórfica. Actas: 315-316. Córdoba.
- Lawless, J.V., White, P.J., Bogie, I., Paterson, L.A. y Cartwright, A.J. 1997. Epigenetic magmatic-related mineral deposits: Exploration based on mineralisation models. Unpublished lecture notes for Kingston Morrison seminars, Manila and Jakarta, September 1997.
- Ledoux, H. y Gold, C. 2006. An Efficient Natural Neighbour Interpolation Algorithm for Geoscientific Modelling. *Developments in Spatial Data Handling*: 97-108.
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A., Reynolds, T.J., Rimstidt, J.D. y Bodnar, R.J. 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag–Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 114: 20-35.
- Nelson, C.E. y Giles, D.L. 1985. Hydrothermal eruption mechanisms and hot spring gold deposits. *Economic Geology* 89: 1633-1639.
- Nelson, E.P. 2006. Drill-hole design for dilational ore shoot targets in fault-fill veins. *Economic Geology* 101: 1079-1085.
- Pontual, S. 2010. Spectral reflectance datasets: Processing, interpretation and analysis for mining and exploration applications: AusSpec International Ltd, Spectral Geology Workshop Notes, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, Canada, 49 p.
- Reimann, C. y De Caritat, P. 2016. Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. *Science of Total Environment* 578: 633-648.
- Reimann, C., Filzmoser, P. y Garrett, R.G. 2005. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of Total Environment* 346: 1-16.
- Serafini, R. 1982. Posibilidades de los yacimientos de plata y oro del sector oeste del distrito Castaño Nuevo. Trabajo Final de Licenciatura (inédito). Universidad Nacional de San Juan. 104 p.
- Shimizu, T. 2014. Reinterpretation of quartz textures in terms of hydrothermal fluid evolution at the Koryu Au-Ag deposit, Japan. *Economic Geology* 109: 2051-2065.
- Sibson, R., 1981. A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. En: Barnett, V. (ed.), *Interpreting Multivariate Data*, p. 21-36, Nueva York.
- Sibson, R.H. 1986. Rupture Interaction with Faults Jogs. En: Das, S., Boatwright, J. y Scholz, C.H. (ed.), *Earthquake Source Mechanics* 37: 157-166, Washington D.C.
- Sibson, R.H. 1996. Structural permeability of fluid- driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology* 18(8): 1031-1042.
- Sillitoe, R.H. 2015. Epithermal paleosurfaces. *Mineralium Deposita* 50: 767-793.
- Simmons, S.F. y Browne, P.R.L. 2000. Hydrothermal Minerals and Precious Metals in the Broadlands-Ohaaki Geothermal System: Implications for Understanding Low-Sulfidation Epithermal Environments. *Economic Geology* 95: 971-999.
- Simmons, S.F., White, N.C. y John, D. 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. En Hedenquist, J. Thompson, F.H., Goldgarb, R.J. y Richards, J.P. (Eds). *Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume 1905-2005*: 485-522.
- Sonntag, I., Laukamp, C. y Hagemann, S.G. 2012, Low potassium hydrothermal alteration in low sulfidation epithermal systems as detected by IRS and XRD: An example from the Co-O mine, Eastern Mindanao, Philippines. *Ore Geology Reviews* 45: 47-60.

Verbovšek, T. 2011. A comparison of parameters below the limit of detection in geochemical analyses by substitution methods. *RMZ – Materials and Geoenvironment* 58: 393–404.

Wilkinson, J.J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55: 229-272.

Woodcock, N.H. y Mort, K. 2008. Classification of faults breccias and related fault rocks. *Geological Magazine* 145 (3): 435-440.

Capítulo 7: Evolución del Distrito Minero Castaño Nuevo y Consideraciones Finales

7.1. Evolución del Distrito Minero Castaño Nuevo

7.2. Consideraciones Finales y Conclusiones

Capítulo 7: Evolución del Distrito Minero Castaño Nuevo y Consideraciones Finales

7.1. Evolución del Distrito Minero Castaño Nuevo

La integración de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la presente investigación permite sintetizar la sucesión de episodios acaecidos en el área. En ella se vinculan los eventos magmático-hidrotermales que tuvieron lugar durante la evolución de un arco magmático sobre corteza continental entre el Pérmico inferior (Cisuraliano) y el Pérmico medio (Guadalupiano). Si bien no se establecieron edades absolutas para todos los sistemas, en base a las relaciones de campo observadas y a las características particulares que presentan las rocas asociadas que si cuentan con dataciones absolutas, se propone la siguiente evolución para el Distrito Minero Castaño Nuevo.

Las unidades asociadas al volcanismo pérmico del distrito se apoyan sobre la secuencia sedimentaria asignada a la Formación Cerro Agua Negra. Las primeras unidades atribuidas al evento magmático se vinculan a sedimentitas con intercalaciones de aglomerados volcánicos y volcanitas, desarrolladas en una cuenca de retroarco y asignadas a la Formación Castaño (Figura 7.1).

La evolución del sistema aflorante en el Distrito Minero Castaño Nuevo comenzó con la extrusión de las lavas agrupadas en el presente trabajo bajo la denominación de Unidad I con edades U/Pb en circones de $272,6 \pm 2,3$ Ma y $271,2 \pm 1,6$ Ma. Estas lavas, de composición andesítica, estratificadas y con niveles que incorporan abundantes fragmentos líticos de sedimentitas, fueron sucedidas por depósitos piroclásticos asociados a un evento explosivo y representados por tobas finas intercaladas con brechas heterolíticas, que se disponen concordantemente sobre las volcanitas previas (Figura 7.1).

Al mismo tiempo, en niveles corticales más profundos se produjo la intrusión de cuerpos magmáticos, y consecuente circulación de fluidos asociados a los mismos (Figura 7.1). A partir del desarrollo de fallas y fracturas, se generaron zonas de mayor permeabilidad, como la falla NO-SE en el sector occidental del área de estudio, que facilitaron el ascenso de fluidos de naturaleza ácida (Figura 7.1). De este modo se generaron texturas tipo *vuggy quartz* en las andesitas, y la alteración de estas rocas, así como de la secuencia piroclástica suprayacente. La asociación de dickita + NH₄ illita + sílice estuvo controlada por fracturas asociadas a la falla principal y constituye la asociación proximal a estos canales de circulación. Estos fluidos ácidos fueron también los responsables de transportar metales, algunos de los cuales se asocian a estas texturas y alteraciones. Los contenidos de Au se destacan en el sector del *vuggy quartz*, alcanzando valores anómalos de hasta 1,03 ppm.

Un posterior ascenso de la fuente magmática que originó los fluidos ácidos, generó un evento explosivo vinculado al aumento de temperatura y sobre-presurización del sistema. Este evento dio lugar

a brechas de tipo freáticas (Figura 7.1), cuyos representantes más extendidos espacialmente corresponden a brechas con fragmentos de *vuggy quartz*, con proporciones variables de clastos vs. matrix, pudiendo asociarse a diferentes posiciones dentro del canal de ascenso de los fluidos.

El aporte de calor a los fluidos circundantes en los sectores más superficiales, derivó en una fuerte alteración sílicea, con asociaciones locales de alunita, jarosita y caolinita, que afectó mayoritariamente a la secuencia piroclástica de la Unidad II (en menor proporción a las andesitas de la Unidad I), y fue definida como una alteración tipo *steam heated*. La asociación de sílice pulverulenta + óxidos de hierro, en conjunto con las fracturas rellenas con jarosita + alunita, presenta anomalías de Bi, As y Hg.

El ascenso progresivo de las fuentes magmáticas generó la sobreimposición a las alteraciones ácidas superficiales, de una asociación de cuarzo + turmalina + muscovita vinculada al relleno de fracturas, y localmente brechas, cementadas por dicha asociación. Este evento está relacionado espacialmente a anomalías de Cu y Mo y presenta una disposición coincidente con la estructura NO-SE definida anteriormente.

Posterior a este evento se emplazaron una serie de cuerpos irregulares de composición andesítica, que se encuentran aflorantes tanto en el sector de las rocas piroclásticas, como en el de las andesitas centrales con fuerte alteración (Figura 7.1). La edad de estos cuerpos fue establecida en $270,6 \pm 3,0$ Ma (U/Pb en circones). Dichos cuerpos carecen de alteración y no fue posible establecer su relación con las capas afectadas por la sílice pulverulenta. De todas formas, la ausencia de alteración en los mismos permite suponer que serían posteriores a los eventos explosivos.

En niveles corticales más profundos (por debajo de los 800 m) se originaron fracturas extensionales a través de las cuales circuló un fluido neutro que, frente a cambios repentinos en las condiciones de P y T fueron depositando sucesivos pulsos de sílice cristalina, criptocristalina, adularia y amatista, junto con contenidos variables de Au (\pm Ag, Pb y Cu). Las velocidades de ascenso del fluido vs. las velocidades de propagación de las fracturas, generaron una compleja alternancia de eventos, en los cuales quedaron registrados procesos de enfriamiento, ebullición sutil y ebullición violenta. En términos de mineralización esos eventos corresponden a episodios de pre-, sin- y post-mineralización. A este último episodio se vinculan los mayores valores de Au y constituye un evento posterior de carácter tectónico-hidrotermal con evidencias de ebullición violenta. La edad de estas manifestaciones hidrotermales vetiformes fue calculada en $265,9 \pm 2,1$ Ma y $267,0 \pm 2,0$ Ma (Ar/Ar en adularia de la veta San Agustín) y 267 ± 6 Ma (K/Ar en adularia de la veta Dios Protege). Esta edad sería coincidente con la calculada para la secuencia volcánoclastica denominada Unidad III, la cual arrojó un valor de $267,6 \pm 2,6$ Ma. Esta secuencia está localizada en el sector sur del área de trabajo, carece de alteración y cobre concordantemente a las andesitas y rocas piroclásticas de las Unidades I y II respectivamente (Figura 7.1).

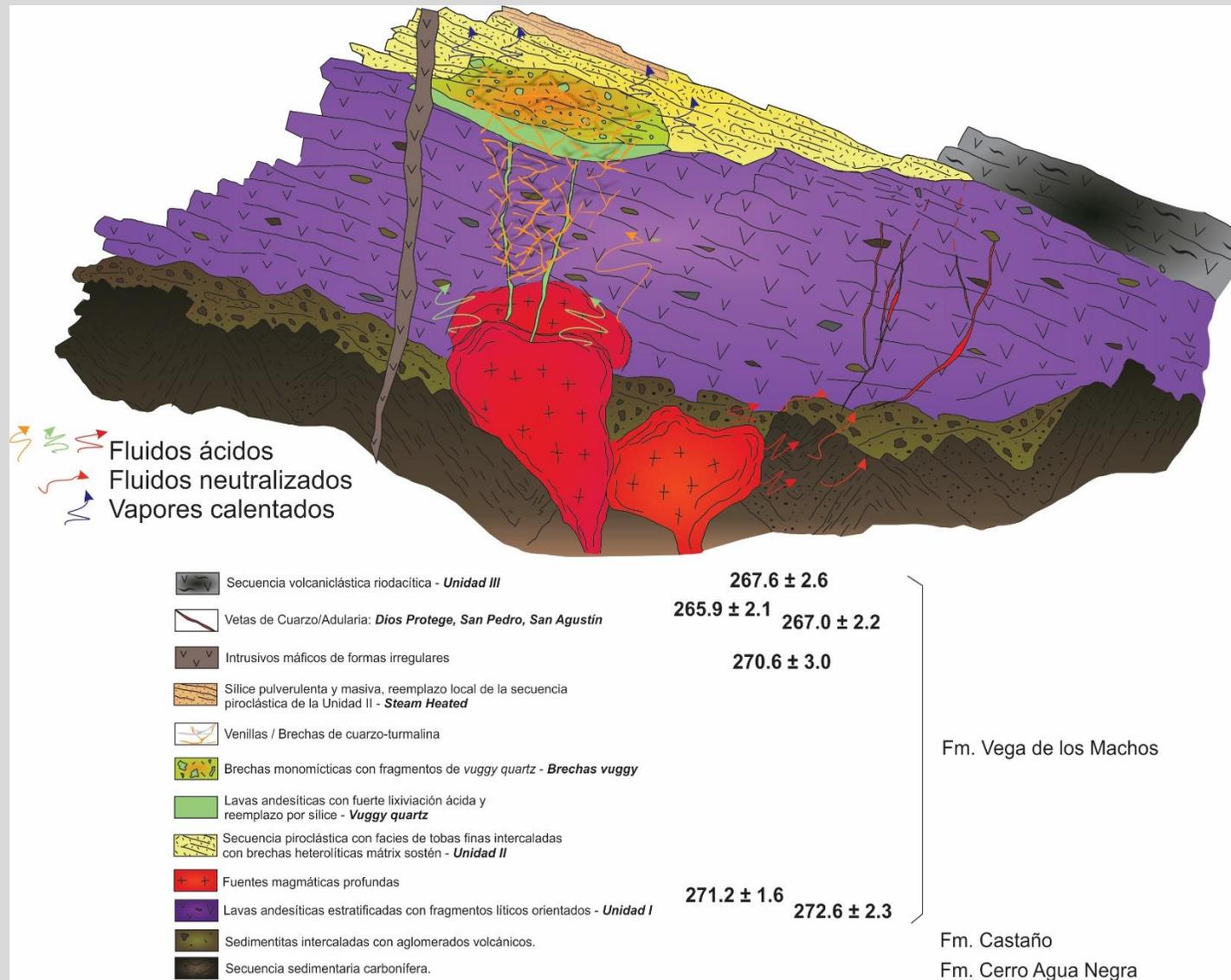


Figura 7.1. Modelo generalizado de la evolución geológica del Distrito Minero Castaño Nuevo.

Procesos tectónicos posteriores permitieron el ascenso del sistema de vetas y lo colocaron al mismo nivel topográfico que el sistema de brechas y alteración silíceas. Si bien podría considerarse a los dos sistemas como parte un mismo evento hidrotermal hoy expuesto a la misma cota, las edades establecidas y acotadas para ambas manifestaciones permiten separarlas en el tiempo y asociarlas a dos eventos hidrotermales diferentes.

7.2. Consideraciones finales y Conclusiones generales

El estudio de las manifestaciones hidrotermales presentes en el área de estudio fue abordado desde diferentes metodologías a fin de establecer los controles geológicos-estructurales que dieron origen a las mismas. En los siguientes puntos se resumen las conclusiones a las que se arribó a lo largo de los diferentes capítulos que abarca el presente trabajo.

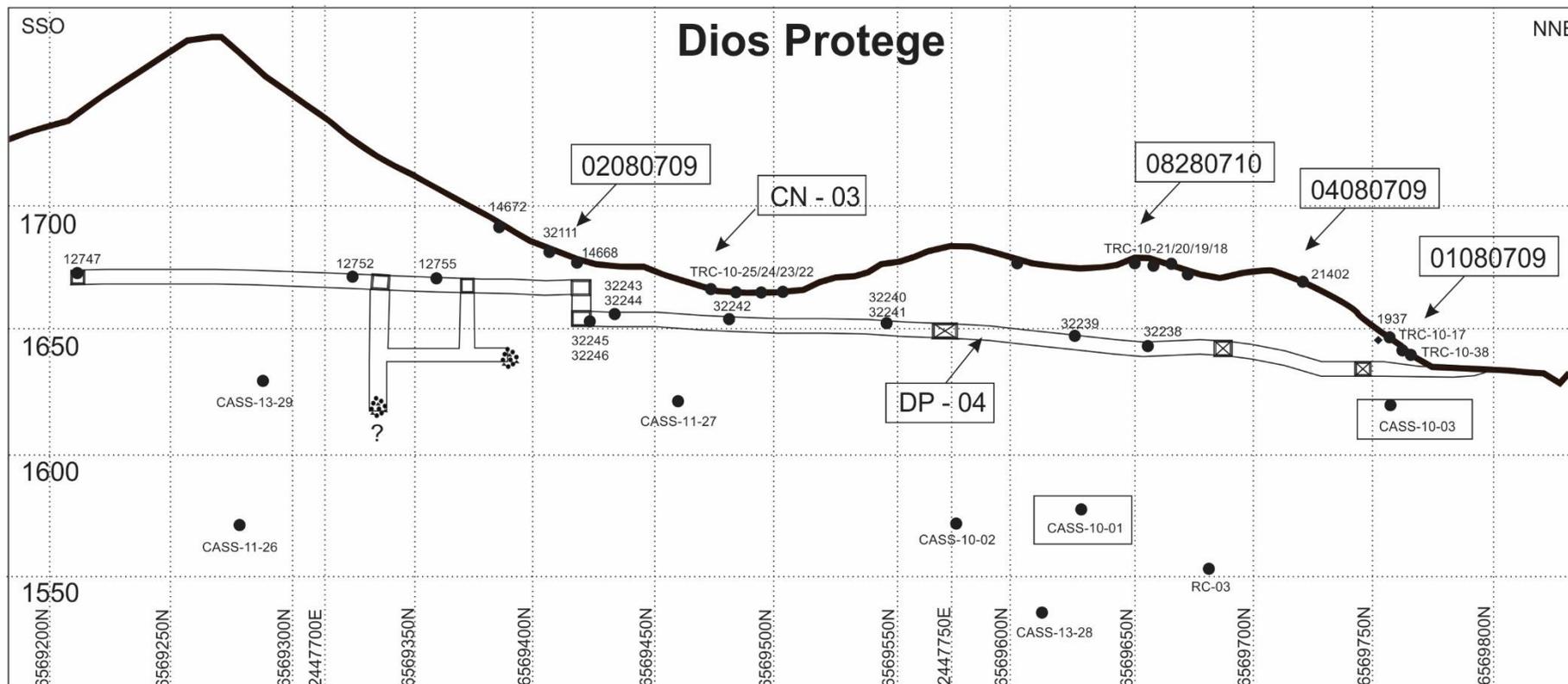
- En un marco geotectónico extensivo, se desarrolló un arco volcánico sobre corteza continental cuya actividad quedó registrada en el Distrito Minero Castaño Nuevo, por una sucesión de rocas volcánico-piroclásticas. Esta secuencia, que evolucionó entre los 272 Ma y los 267 Ma variando su composición desde andesítica a riodacítica, constituye la roca hospedante de las manifestaciones hidrotermales presentes en el distrito.
- Las características geoquímicas y petrológicas de las distintas unidades definidas para el distrito minero, junto con las edades calculadas a partir de U/Pb en circones, permiten asignar la secuencia a la Formación Vega de los Machos, correspondiente a las fases inferiores del Grupo Choyoi.
- El relevamiento del distrito minero con métodos indirectos (geofísica-aeromagnetismo) permitió la discriminación de las unidades establecidas previamente a partir de sus propiedades físicas. Asimismo, los resultados fueron de utilidad para definir lineamientos y estructuras relevantes. La dirección predominante establecida para las estructuras es N-S y en menor proporción NO-SE. Por otro lado, los resultados de la aplicación de métodos radimétricos confirmaron la localización de las estructuras más importantes y permitió discriminar sectores afectados por eventos hidrotermales posteriores.
- Las rocas volcánicas-piroclásticas guardan una estrecha relación con dos sistemas hidrotermales de características particulares que permiten diferenciarlos y discriminarlos.
- Las manifestaciones hidrotermales están condicionadas, a su vez por el desarrollo de estructuras extensionales que generaron un aumento de la permeabilidad facilitando el ascenso de fluidos. Un modelo de Complejidad Estructural, desarrollado a partir de los datos aeromagnéticos definió un sector de mayor permeabilidad estructural asociado a la unidad andesítica localizada en el sector centro norte del área.
- La distribución de las asociaciones de minerales de alteración, vinculadas a los sistemas hidrotermales, pudo ser determinada en una primera instancia mediante el empleo de imágenes

satelitales (ASTER), las cuales constituyen una herramienta de fácil acceso y rápida obtención de información. La aplicación de cocientes y otras operaciones más complejas permitió discriminar la presencia de grandes grupos de minerales. El posterior chequeo con muestras del distrito y la confección de una librería espectral propia para el sector, permitió generar mapas de asociaciones de minerales más ajustados a la geología local.

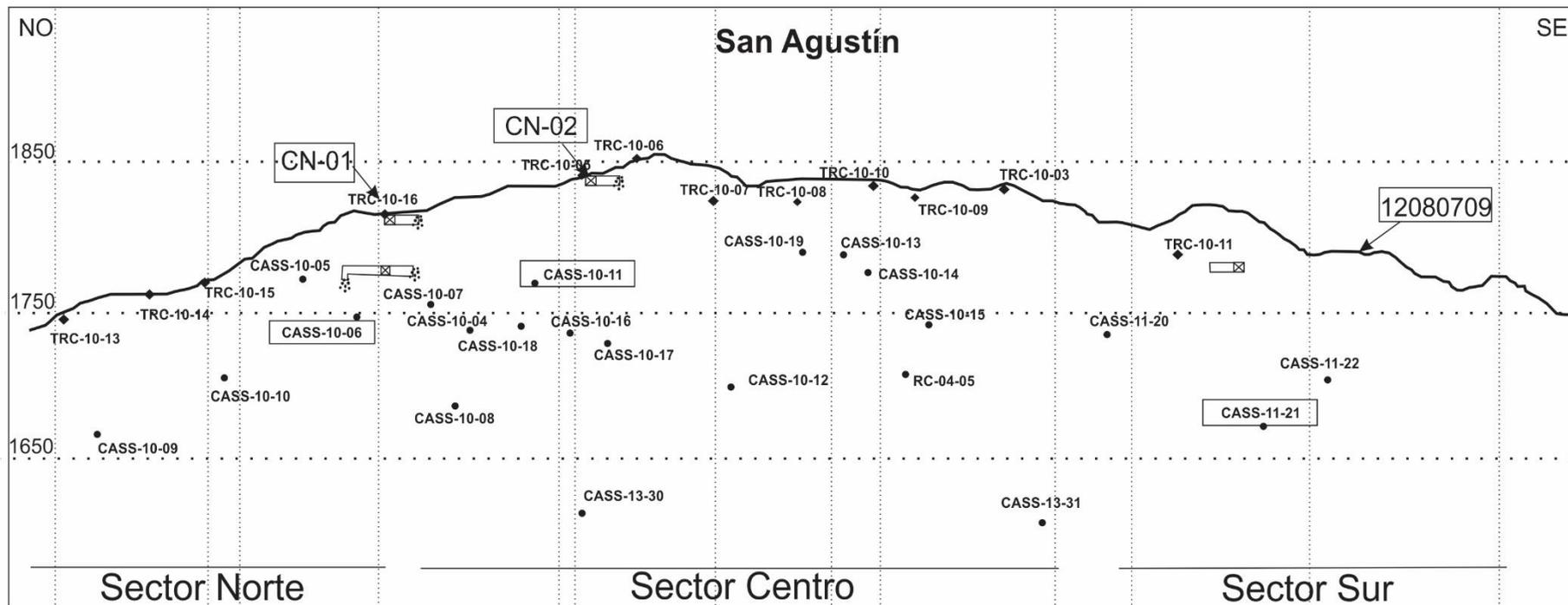
- Las asociaciones de minerales fueron confirmadas y redefinidas mediante el empleo de técnicas de caracterización, que permitieron perfeccionar los resultados y establecer las características diferenciales de los fluidos que dieron origen a los dos sistemas hidrotermales identificados.
- El primer sistema hidrotermal desarrollado guarda una relación estrecha con fluidos ácidos vinculados posiblemente a un sistema intrusivo en profundidad. La generación de texturas de lixiviación y subsecuente silicificación, estuvo acompañada por una alteración ácida conformada por dickita + NH₃ illita + sílice, y anomalías de Au dispuestas de forma diseminada, y asociadas a un corredor estructural con orientación NO-SE, en el sector occidental del distrito minero.
- El ascenso progresivo de la fuente magmática, fluidos asociados y el consecuente aumento de aporte de calor, dio lugar a un evento explosivo que se encuentra representado por brechas con fragmentos de *vuggy quartz* previamente generado. Las fases finales de este evento generaron el ascenso de vapores calentados hasta alcanzar la superficie, generando allí depósitos de sílice pulverulenta con anomalías de Bi, As y Hg, y definidos como parte de una alteración de tipo *steam heated*.
- La identificación de venillas y brechas, con relleno/cemento de cuarzo-turmalina, cortando al sistema hidrotermal caracterizado anteriormente, evidencian un posible ascenso de la fuente magmática. El venilleo está acompañado por la alteración pervasiva de la roca que atraviesa, caracterizado por la asociación turmalina + muscovita. La disposición de los afloramientos que contienen a este venilleo coincide también con el corredor estructural NO-SE definido anteriormente. Junto con el desarrollo de venillas y brechas se registran anomalías de Mo y Cu (\pm Zn), en muestras de superficie.
- El sistema vinculado a la circulación de fluidos ácidos, se encuentra acotado temporalmente por la intrusión de cuerpos irregulares de composición andesítica, los cuales carecen de alteración y fueron datados. La edad de estos cuerpos es de $270,6 \pm 3,0$ Ma (U/Pb en circones).
- Esfuerzos extensionales provocaron la apertura de fallas a través de las cuales circularon fluidos neutralizados que dieron lugar al relleno de cuarzo/adularia. Una sucesión de eventos de re-apertura y brechamiento generó una compleja historia de relleno de estas fallas.
- Se identificaron al menos seis eventos de relleno, los cuales presentan proporciones variables de cuarzo cristalino, cuarzo recristalizado, adularia, amatista, carbonatos y arcillas. La distribución de los mismos guarda una estrecha relación con la morfología y cinemática de la fractura en la que se emplazan.
- Las principales estructuras se relacionan a fallas normales, con leve componente de rumbo (San Agustín y San Pedro), y fallas de rumbo con movimiento sinistral (Dios Protege).

- Los eventos identificados que rellenan las estructuras pueden agruparse en episodios de acuerdo a su relación con la mineralización. Un episodio pre-mineralización está representado por el cuarzo gris estéril del Evento 1. El episodio sin-mineralización abarca los eventos 2, 3 y 4, siendo el evento 2 el de mayor importancia en cuanto al contenido de metales. Finalmente, tuvo lugar un episodio post-mineralización que incluye a los eventos 5 y 6. El evento 6 en particular resulta de gran interés debido a la naturaleza tectónico-hidrotermal de las brechas que lo conforman, las cuales remobilizan y concentran metales del sistema hidrotermal previo.
- A lo largo de la evolución de los diferentes eventos de relleno discriminados en cada una de las vetas, se registran evidencias de procesos de ebullición. El mecanismo de precipitación de los metales establecido corresponde a una ebullición violenta, que tuvo lugar en el último evento identificado. Las temperaturas de homogeneización promedio para este evento corresponden a $287,88^{\circ}\text{C}$ y salinidades de 2,88% NaCl eq.
- La alteración asociada a estas estructuras tiene escaso desarrollo areal, con respecto al sistema vinculado a fluidos ácidos. Esto se vincula a la escasa reactividad de la roca y al carácter neutro de los fluidos que circularon por las estructuras.
- Todas las estructuras vetiformes presentan mineralización de Au (\pm Ag, Pb, Cu). La relación Ag/Au calculada para las tres estructuras principales arrojó valores inferiores a 10, permitiendo clasificarlos como Depósitos Epitermales de Oro-Plata.
- La edad de las vetas de cuarzo/adularia calculada en trabajos anteriores arrojó resultados que varían entre $267,0 \pm 2,2$ y $265,9 \pm 2,1$ Ma. Esta edad es similar a la calculada para las rocas volcánicas dispuestas al sur del distrito minero (Unidad III), las cuales cubren al sistema de alteración ácida y no se encuentran intruidas por el conjunto de vetas.
- La confección de una columna estratigráfica para el área y la datación de las unidades principales constituye la clave fundamental para el correcto ordenamiento de eventos. Asimismo, las relaciones entre las diferentes asociaciones de alteración hidrotermal, así como las relaciones de corte entre las estructuras a las que se asocia, permiten ajustar la cronología de eventos. Si bien no fue posible establecer edades absolutas de algunas unidades/cuerpos, se propone una posible evolución geológica para el Distrito Minero Castaño Nuevo, la cual se habría desarrollado completamente durante el Pérmico inferior a medio.
- El Distrito Minero Castaño Nuevo forma parte del Cinturón Metalogenético Gondwánico asociado al magmatismo del Grupo Choiyoi, y comparte características con depósitos cercanos, pertenecientes al mismo cinturón. Hacia el norte se registran depósitos con edades entre 270 y 260 Ma como las brechas de cuarzo-turmalina del yacimiento San Francisco de los Andes. Hacia el sur, el Distrito Minero Casposo constituye un sistema de vetas epitermales de cuarzo/adularia emplazado en rocas volcánicas pertenecientes al Grupo Choiyoi, y cuyo rango de edades calculadas para la mineralización incluye al calculado para las vetas del presente trabajo.

Anexo I
Localización de
muestras en vetas Dios
Protege y San Agustín



Sección Longitudinal de la veta Dios Protege. Con puntos negros se marcan los sectores muestreados para análisis químicos. En recuadros negros se identifican las muestras seleccionadas para cortes bípulidos para estudios microtermométricos.



Sección Longitudinal de la veta San Agustín. Con puntos negros se marcan los sectores muestreados para análisis químicos. En recuadros negros se identifican las muestras seleccionadas para cortes bipulidos para estudios microtermométricos.

Anexo II

Matrices de Pearson

“Caracterización geológica-estructural de las manifestaciones hidrotermales del Distrito Minero Castaño Nuevo, y su relación con el Magmatismo Gondwánico. Cordillera Frontal de San Juan, Argentina.” Lic. María Agustina Cocola

Matriz de Pearson Veta Dios Protege

	Au ppm	Hg ppb	Ag ppm	Al %	As ppm	Ba ppm	Be ppm	Bi ppm	Ca %	Cd ppm	Co ppm	Cu ppm	Cu ppm	Fe %	K %	Mg %	Mn ppm	Mo ppm	Ni ppm	P ppm	Pb ppm	S %	Sb ppm	Sr ppm	Ti %	V ppm	W ppm	Zn ppm	
Au ppm	1	0.10408555	0.73160477	0.31583539	-0.1148459	-0.27763135	-0.16134511	-0.06421368	-0.14276142	0.45906723	0.29644806	-0.07313794	0.70213899	-0.36931479	-0.20793024	-0.28077586	0.17129673	0.06756378	-0.37583268	-0.35525569	-0.32044639	0.70993448	0.00461715	0.66605844	-0.35731203	-0.40879339	-0.3451664	-0.12509093	0.06078816
Hg ppb	0.10408555	1	-0.01165874	-0.00421865	-0.19586453	0.031345	-0.041489	-0.16789996	-0.06113645	-0.10445371	0.00091658	0.04898187	-0.21994522	-0.29059899	-0.25303803	-0.183205	-0.07320595	-0.09616506	-0.30226112	-0.22633138	-0.1775351	-0.02014087	0.37429175	-0.2064324	-0.23793879	-0.24686734	-0.38609692	-0.09490907	
Ag ppm	0.73160477	-0.01165874	1	-0.07796323	-0.03666934	-0.13050672	-0.02121462	-0.03061031	-0.12311823	0.78432441	-0.1911072	-0.03827377	0.35422735	-0.14149613	-0.06530265	-0.08363308	-0.06008009	-0.02936658	-0.19433939	-0.22851925	-0.13238344	0.7556395	0.15160871	0.60755855	-0.17645522	-0.20321074	-0.10278581	-0.03708178	0.32533723
Al %	-0.31583539	-0.22976414	-0.07796323	1	0.36037215	0.49261608	0.25201305	0.1697899	0.38978035	0.14365228	0.56147177	0.50486851	-0.26643503	0.76393583	0.69055328	0.73761039	0.49011635	0.39917529	0.83440455	0.53999169	0.80137654	0.0150667	0.3487199	-0.46212426	0.79660017	0.86705655	0.91755651	0.26538946	0.54205581
As ppm	-0.1148459	-0.00421865	-0.03666934	0.36037215	1	0.15575214	0.14748276	0.33011836	0.18936638	-0.02280655	0.41588988	0.19239503	-0.13946818	0.56862711	0.19498989	0.29755653	0.11167412	0.26905329	0.15351406	0.3509237	0.30073087	0.05142406	0.34194096	-0.13736192	0.25159592	0.29410583	0.33318167	0.04894094	0.29844774
Ba ppm	-0.27763135	-0.19586453	-0.13050672	0.49261608	0.15575214	1	0.10368617	0.13742741	0.06537901	-0.08559869	0.40260938	0.2193326	-0.20860992	0.39999069	0.44906925	0.2885412	0.22075553	0.17927748	0.38961516	0.35002974	0.4073851	-0.1189826	0.17859539	-0.41765164	0.51763734	0.48265925	0.47692985	0.20715963	0.12860291
Be ppm	-0.16134511	0.031345	-0.02121462	0.25201305	0.14748276	0.10368617	1	0.39612616	0.0630362	0.21588098	0.35060128	0.57078954	-0.13024169	0.35132076	-0.28039767	-0.05205742	0.41957708	0.03907397	0.3012832	0.09087315	0.65494585	0.16783006	0.2326788	-0.02548082	0.44173103	0.5124995	0.45238047	-0.515213	0.35155974
Bi ppm	-0.06421368	-0.041489	-0.03061031	0.1697899	0.33011836	0.13742741	0.39612616	1	0.0830622	-0.00618904	0.30127854	0.25533851	-0.02426073	0.16405252	-0.03495514	0.01126877	0.30271024	-0.06297347	0.0777138	0.17712897	0.30338047	0.35031523	0.29128952	-0.07921519	0.41001801	0.28836068	0.29044427	0.02188619	0.10331989
Ca %	-0.14276142	-0.16789996	-0.12311823	0.38978035	0.18936638	0.06537901	0.0630362	0.0830622	1	-0.07294079	0.24234631	0.1094898	-0.12959081	0.35458699	0.23411777	0.37295967	0.48844207	0.11118429	0.34153436	0.31113162	0.28258721	-0.12838401	0.05991047	-0.30784668	0.30861574	0.3317418	0.36184988	0.19042009	0.18539376
Cd ppm	0.45906723	-0.06113645	0.78432441	0.14365228	-0.02280655	-0.08559869	0.21588098	-0.00618904	-0.07294079	1	0.01251645	0.14456035	0.14266915	0.04236246	-0.06873225	0.01221188	0.13875015	-0.02483289	0.023911	-0.11997011	0.11465343	0.68765594	0.35438227	0.46674221	-0.02683032	0.05880574	0.1418849	-0.06122017	0.4866441
Co ppm	-0.29644806	-0.10445371	-0.1911072	0.56147177	0.41588988	0.40260938	0.35060128	0.30127854	0.24234631	0.01251645	1	0.46447768	-0.15328988	0.43996719	0.09492604	0.16946965	0.34663328	-0.1571011	0.51210158	0.29150521	0.6187714	0.15075967	0.255068	-0.00623682	0.56702075	0.58441798	0.59891818	-0.2836345	0.34524124
Cr ppm	0.07313794	0.00091658	-0.03827377	0.50486851	0.19239503	0.2193326	0.57078954	0.25533851	0.1094898	0.14456035	0.46447768	1	-0.15328988	0.43996719	0.09492604	0.16946965	0.34663328	-0.1571011	0.51210158	0.29150521	0.6187714	0.15075967	0.255068	-0.00623682	0.56702075	0.58441798	0.59891818	-0.2836345	0.34524124
Cu ppm	0.70213899	0.04898187	0.35422735	-0.26643503	-0.13946818	-0.20860992	-0.13024169	-0.02426073	-0.12959081	0.14266915	-0.15328988	-0.15328988	1	-0.28455872	-0.16593405	-0.25979972	-0.09967968	-0.01108902	-0.30872339	-0.23396242	-0.24802384	0.61674256	0.00045286	0.30023842	-0.24950159	-0.30719954	-0.28206215	-0.05389954	0.01638859
Fe %	-0.36931479	-0.21994522	-0.14149613	0.76393583	0.56862711	0.39999069	0.35132076	0.16405252	0.35458699	0.04236246	0.187256	0.43996719	-0.28455872	1	0.50341611	0.71786697	0.57233174	0.26881419	0.63802143	0.57212244	0.76786964	-0.06146525	0.39726087	0.44729703	0.65425968	0.82397359	0.82123265	0.13953585	0.54699284
K %	-0.20793024	-0.29059899	-0.06530265	0.69053228	0.19498989	0.44906925	0.28039767	0.03495514	0.23411777	-0.06873225	0.3740235	0.09492604	0.16593405	0.50341611	1	0.65258353	0.2571374	0.33482927	0.46398515	0.48829983	0.38211888	-0.12509119	0.17512166	0.48196523	0.49040422	0.5364295	0.60818568	0.57780522	0.24266975
Mg %	-0.28077586	-0.25303803	-0.08363308	0.73761039	0.29755653	0.2885412	-0.05205742	0.01126877	0.37295967	0.01221188	0.1788697	0.65258353	-0.25979972	0.50341611	0.65258353	1	0.54933147	0.29863068	0.64913302	0.55418972	0.53658432	-0.1091836	0.12022016	0.44031413	0.55362063	0.67525569	0.66950221	0.38638239	0.48353738
Mn ppm	-0.17129673	-0.18320595	-0.06008009	0.49011635	0.11167412	0.22075553	0.41957708	0.30271024	0.48841207	0.13875015	0.4545441	0.34663328	-0.09967968	0.57233174	0.2571374	0.54933147	1	0.05527634	0.48643604	0.56631292	0.54482915	0.8108966	0.12315928	-0.31894755	0.50165954	0.67973846	0.59309487	0.0263731	0.47713034
Mo ppm	-0.07563678	-0.02320595	-0.02936658	0.39917529	0.26905329	0.17927748	-0.03907397	-0.06297347	0.1118429	-0.02438289	0.1726421	-0.1571011	-0.0108902	0.26881419	0.33428297	0.29863068	0.05527634	1	0.29073076	0.11608518	0.27405051	0.06239447	0.3578284	-0.17777884	0.2850196	0.19259947	0.30209276	0.0796423	0.21202479
Na %	-0.37583268	-0.09616506	-0.19433939	0.83440455	0.15351406	0.38961516	0.3012832	0.0777138	0.34153436	0.023911	0.43265747	0.51210158	-0.30872339	0.63802143	0.46398515	0.64913302	0.48643604	0.29073076	1	0.44684839	0.71605057	-0.12791089	0.1581672	-0.41472002	0.71776482	0.5985551	0.77710129	0.1399951	0.43736092
Ni ppm	-0.35525569	-0.30226112	-0.22851925	0.53999169	0.2859327	0.35002974	0.09087315	0.17712897	0.31113162	-0.11997011	0.67472815	-0.2396242	0.57212244	0.48829983	0.55418972	0.56331292	0.11608518	0.44684839	1	0.44427634	-0.18627291	0.0314515	-0.52245631	0.49253217	0.59825448	0.58214322	0.28817938	0.39721725	
P ppm	-0.32044639	-0.22633138	-0.13238344	0.80137654	0.30073087	0.4073851	0.65494585	0.3038047	0.28258721	0.11456343	0.64956392	0.6187714	-0.24082304	0.76786964	0.38211888	0.53658432	0.54482915	0.27405051	0.71605057	0.44427634	1	0.05199776	0.30298296	0.38631806	0.83859679	0.88029195	0.87869911	-0.04367155	0.5778942
Pb ppm	0.70993448	-0.01775351	0.7556395	0.0150667	0.05142406	-0.1189826	0.16783006	0.35031523	-0.12838401	0.68765594	0.02431125	0.15075967	0.61674256	-0.06146525	-0.12509119	0.1091836	0.08158066	0.06239447	-0.12791089	-0.18627291	0.05199776	1	0.38449408	0.47970622	0.02675634	-0.03963251	-0.07016139	0.0649876	0.56303188
S %	0.00461715	-0.02014087	0.15160871	0.3487199	0.34194096	0.17895939	0.2326788	0.29128952	0.05991047	0.35438227	0.29663293	0.255068	0.00045286	0.39726087	0.17512166	0.12022016	0.12315928	0.3578284	0.1581762	0.0314515	0.30298296	0.38449408	1	-0.08562889	0.47970622	-0.08562889	0.47970622	-0.08562889	0.47970622
Sb ppm	0.66605844	0.37429175	0.60755855	-0.46212426	-0.13736192	-0.41765164	-0.02548082	-0.07921519	-0.30784668	0.46674221	-0.3708483	-0.00623682	0.30023842	-0.44729703	-0.48190523	-0.44031413	-0.31894755	-0.17777884	-0.41472002	-0.52245631	-0.38631806	0.47970622	-0.08562889	1	-0.45334556	-0.50900107	-0.45655875	-0.49788337	-0.01637777
Sr ppm	-0.35731203	-0.2064324	-0.17645522	0.79660017	0.25159592	0.51763734	0.44173103	0.41001801	0.30861574	-0.02868302	0.62317528	0.56702075	-0.2495109	0.65425968	0.49040422	0.55362063	0.50165954	0.2850196	0.77716482	0.49253217	0.83859679	0.02675634	0.2730611	-0.45334556	1	0.81324679	0.84865347	0.1593331	0.44785847
Ti %	-0.40979339	-0.23793879	-0.20321074	0.86705655	0.29410583	0.48265925	0.5124995	0.28836068	0.3317418	0.05880574	0.65894284	0.58441798	-0.30179054	0.82397359	0.5364295	0.57525569	0.67973846	0.1925947	0.7855551	0.59825448	0.88902195	-0.0396325							

“Caracterización geológica-estructural de las manifestaciones hidrotermales del Distrito Minero Castaño Nuevo, y su relación con el Magmatismo Gondwánico. Cordillera Frontal de San Juan, Argentina.” Lic. María Agustina Cocola

Matriz de Pearson Veta San Agustín

	Au ppm	Hg ppb	Ag ppm	Al %	As ppm	Ba ppm	Be ppm	Bi ppm	Ca %	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Fe %	K %	Mg %	Mn ppm	Mo ppm	Na %	Ni ppm	P ppm	Pb ppm	S %	Sb ppm	Sr ppm	Ti %	V ppm	W ppm	Zn ppm
Au ppm	1	-0.14195611	0.64337097	-0.36814819	-0.18399718	-0.28010025	-0.4881741	-0.12271608	-0.30174724	-0.0022404	-0.38546477	-0.33719112	0.43266272	-0.42074838	-0.11784805	-0.39925996	-0.34112348	-0.19306524	-0.33440791	-0.39106114	-0.42487152	0.42299597	0.00325118	-0.12135988	-0.35688587	-0.44892632	-0.38008003	0.00918548	-0.14104566
Hg ppb	-0.14601048	1	-0.25598832	0.47909193	0.4325154	0.21325677	0.37168294	0.14515137	0.48190527	0.341886	0.52659317	-0.16298977	0.46377229	0.52089499	0.76001194	0.11147465	0.23871696	0.68206254	0.76001249	-0.11653666	0.1254202	0.08284122	-0.31139491	0.95219681	0.93602522	-0.16626207	-0.19630306	-0.42628348	
Ag ppm	0.64410236	-0.1213627	1	-0.25598832	-0.05138828	-0.24636014	-0.51579963	-0.07581896	-0.21388604	0.08478576	-0.25372075	-0.28064152	0.08810606	-0.26612865	-0.02861794	-0.25056055	-0.20178443	-0.29246846	0.26217958	-0.27369193	-0.27812759	0.83456395	0.00911063	-0.02443065	-0.16601458	-0.28307838	-0.1611671	0.04291619	0.14511787
Al %	-0.36797481	-0.10973182	-0.25598832	1	0.47909193	0.80469027	0.75723787	0.18917709	0.49702919	0.17019808	0.83939548	0.41395587	-0.16462513	0.941581	0.56217062	0.78618986	0.28157947	0.85523568	0.8505205	0.91280839	-0.12701384	0.00591808	-0.38524451	0.90724779	0.964888	0.92130881	-0.09700178	0.72078146	
As ppm	-0.18259313	0.03678448	-0.05338285	0.47909193	1	0.4325154	0.50848207	0.33035848	0.01228169	0.20276096	0.32872508	0.30976232	0.09639094	0.53806398	0.12993293	0.38909685	0.12171337	0.54113424	0.27016942	0.51086578	0.42599676	0.13874528	0.4974132	-0.1805157	0.3394776	0.42666536	0.55489682	0.22225584	0.46095059
Ba ppm	-0.28144089	-0.08589495	-0.24536014	0.80469027	0.4325154	1	0.21325677	0.03155539	0.32940614	0.00318476	0.57005124	0.14210504	-0.16227105	0.73985045	0.62928557	0.73032139	0.58030297	0.38070579	0.69187528	0.51695883	0.67267066	-0.3199749	-0.11890995	-0.39032387	0.70734602	0.74127671	0.6705302	-0.17535349	0.61580976
Be ppm	-0.48677687	-0.28239695	-0.51579961	0.75723787	0.50848207	0.21325677	1	0.37168294	0.32381864	0.57753218	0.45109623	0.65314381	-0.18897339	0.80895571	-0.19028566	0.83797667	0.41746995	0.08404466	0.4062675	0.76887514	0.67321784	0.39900394	0.49069827	-0.64429288	0.63887753	0.75134962	0.77509433	0.06716485	0.11612823
Bi ppm	-0.1129754	0.18114645	-0.07581896	0.18917709	0.33035848	0.03155539	0.37168294	1	0.14515137	0.06930868	0.24511788	0.41113063	-0.04025263	0.32975283	-0.13083481	0.13387383	0.06539258	0.06077536	0.07995616	0.25036443	0.27240735	-0.02622631	0.46547012	-0.03717189	0.24281872	0.25921273	0.30303276	0.36716485	0.0150438
Ca %	-0.30156681	0.11294785	-0.21388604	0.49702919	0.01228169	0.32940614	0.32381864	0.14515137	1	0.48190527	0.58686962	0.48130574	-0.1453801	0.53151033	0.11622725	0.42960541	0.5841646	-0.00940961	0.62882385	0.41300654	0.6065671	-0.10023538	-0.08605956	-0.09718051	0.65983814	0.58196221	0.55278594	-0.43784607	0.36669002
Cd ppm	0.00462225	0.08187532	-0.08478576	0.17019808	0.20276096	0.00318476	0.57753218	0.06930868	0.48190527	1	0.341886	0.58024532	0.11931758	0.23268143	-0.24247141	0.02968862	0.27085743	-0.00430368	0.23451781	0.31300176	0.37370186	0.15155099	0.07037168	0.05241537	0.35645046	0.27771615	0.33800286	-0.26768639	0.14305208
Co ppm	-0.38469857	0.68426202	-0.25272073	0.83939544	0.32872508	0.57005124	0.45109623	0.24551788	0.58686962	0.341886	1	0.52659317	-0.14575346	0.87359552	0.46089393	0.7605671	0.82514677	0.29188725	0.78039632	0.63992688	0.87134138	-0.1025951	-0.12197593	-0.18105303	0.84510099	0.89844424	0.78356652	-0.33218771	0.69901313
Cr ppm	-0.33827968	0.41890447	-0.28064252	0.41395587	0.30976232	0.14210504	0.65314381	0.41113063	0.48130574	0.58024532	0.52659317	1	-0.21191882	0.51335768	-0.28334891	0.32218856	0.41760784	0.01386296	0.40485445	0.43290088	0.51780773	-0.16919458	0.31172345	0.23424223	0.54035835	0.56150454	0.47039702	-0.2224104	0.18408823
Cu ppm	0.4333818	-0.0959089	0.88610606	-0.16462513	0.09639094	-0.16227105	-0.18897339	-0.04025263	-0.1453801	0.11931758	-0.14575346	-0.21191882	1	-0.16298977	-0.00547329	-0.16451557	-0.1192995	-0.12044887	-0.16535629	-0.14446248	-0.16301294	0.96553188	0.11895528	-0.11710191	-0.16071017	-0.18921017	0.01264954	0.02533074	0.26589223
Fe %	-0.42077185	-0.02649099	0.28661285	0.941581	0.53806398	0.73985045	0.80895571	0.32975283	0.53151033	0.23268143	0.87359552	0.51335768	1	-0.16298977	-0.00547329	0.88824948	0.78572186	0.3083666	0.7859451	0.86446382	0.93697312	-0.11650347	0.14749519	0.37384346	0.91945434	0.93914221	0.93280111	-0.14849388	0.64658352
K %	-0.11597825	-0.3788849	-0.02861794	0.56270602	0.12993293	0.62928557	-0.19028566	-0.13083481	0.11622725	-0.24247141	0.46089393	-0.28334891	-0.00547329	0.44327729	1	0.52089499	0.47725997	0.34782927	0.40796392	0.35970445	0.43771637	-0.01917089	-0.32096436	-0.43724878	0.39384906	0.44611605	0.46151121	-0.13126214	0.55828285
Mg %	-0.39229912	-0.14828179	-0.25056055	0.94037979	0.38909685	0.73053219	0.83797667	0.13387383	0.42960541	0.02968862	0.7605671	0.32218856	-0.16451557	0.8827848	0.52089499	1	0.76001194	0.1836473	0.78278865	0.79108217	0.83245149	-0.13292945	0.04016959	0.30002715	0.83117226	0.89724874	0.83742298	-0.0210965	0.71966447
Mn ppm	-0.34295667	0.13998869	-0.20178443	0.78618986	0.12171337	0.58030297	0.41746995	0.06539258	0.5841646	0.27085743	0.82514677	0.1192995	0.78572186	0.47725997	0.101104765	1	0.01104765	0.74173434	0.29883892	0.31094318	0.8113302	-0.08888533	-0.20036306	-0.21673383	0.85789359	0.812852423	0.3720266	-0.35752633	0.65228365
Mo ppm	-0.19018644	0.00354832	-0.23246846	0.28157847	0.54113424	0.38030297	-0.08404466	0.06077536	-0.00940961	-0.00430368	0.29187528	0.01386296	0.3083666	0.3083666	0.3083666	0.18369473	0.01104765	1	0.23871696	0.29883892	0.31094318	-0.09182281	0.02207152	-0.16113731	0.17426566	0.24252425	0.3568592	-0.04136213	0.38616952
Na %	-0.33657573	-0.04302159	-0.26217958	0.85523568	0.27016942	0.69187528	0.4062675	0.07995616	0.62882385	0.23415781	0.78039632	0.40485445	-0.1653629	0.87288865	0.74173434	0.29883892	1	0.68206254	0.28225509	-0.1190221	-0.18574111	-0.296848	0.87132741	0.86111981	0.7932496	-0.2598731	0.70935743		
Ni ppm	-0.38586872	0.06663267	-0.27369193	0.8505205	0.51086578	0.51695883	0.76887514	0.25036443	0.41300654	0.31300176	0.63992688	0.43290088	-0.1446248	0.86443812	0.35970445	0.79108217	0.59795173	0.68206254	1	0.76001249	-0.0957565	0.20144732	-0.27837378	0.72500914	0.82209779	0.80748304	0.16966283	0.51209939	
P ppm	-0.42471386	0.02041623	-0.27817259	0.91280839	0.42599676	0.67267066	0.67321784	0.27407435	0.6065671	0.37370186	0.87134138	0.51780773	-0.16301294	0.93697312	0.43771637	0.83245149	0.8113302	0.31094318	1	-0.11653666	0.00395544	0.00395544	-0.37781849	0.946888073	0.96782026	0.92251207	-0.32269709	0.68420243	
Pb ppm	0.42345171	-0.0958913	0.83456395	-0.12701384	0.13874528	-0.13199749	0.39900394	-0.02622631	-0.10023538	0.15155099	-0.1025951	-0.16919458	0.96553188	-0.11650347	-0.01917089	-0.13292945	-0.08888533	-0.09182281	-0.1190221	-0.0957565	-0.11653666	1	0.1234202	-0.1229592	-0.10583074	-0.14065427	0.04873687	0.01089654	0.32482789
S %	0.00708879	0.25811214	0.09191063	0.00591808	0.4974132	-0.11890995	0.49696827	0.46547012	-0.08605956	0.07037168	-0.12197593	0.31172345	0.14749519	-0.32096436	0.04016959	-0.20036306	-0.0207152	0.18574111	0.20144732	0.00395544	0.1234202	1	0.08284122	-0.01103596	0.92725297	0.1140394	0.20748135	-0.17163906	
Sb ppm	0.12225757	0.44829383	-0.02443065	-0.38524451	-0.1805157	-0.39032387	-0.64429288	-0.03717189	-0.09718051	0.06241537	-0.18105303	0.23424223	-0.11710191	-0.3784346	-0.43724878	-0.30007715	-0.21673383	-0.16113731	-0.296848	-0.27837378	-0.37781849	-0.1229592	0.08284122	1	-0.31133491	-0.32468874	0.38061241	0.11552586	-0.27151758
Sr ppm	-0.3583406	0.01036227	-0.2601458	0.90724779	0.3394776	0.0734602	0.63887753	0.24281872	0.65983814	0.35645046	0.84510099	0.54035835	-0.16071017	0.91945434	0.38384906	0.83117226	0.85789359	0.17426566	0.87132741	0.72500914	0.94688773	-0.10583074	0.01103596	-0.31133491	1	0.95219681	0.88263044	-0.32225997	0.6578722
Ti %	-0.44382327	-0.03432157	-0.28307838	0.964888	0.42666536	0.74127671	0.75134962	0.25217373	0.58196221	0.27771615	0.8944424	0.56150454	-0.18932017	0.59914221	0.446511605	0.8974874	0.812852423	0.24252425	0.86111981	0.82209779	0.96782026	-0.14065427	0.02725297	0.32466874	0.95219				

“Caracterización geológica-estructural de las manifestaciones hidrotermales del Distrito Minero Castaño Nuevo, y su relación con el Magmatismo Gondwánico. Cordillera Frontal de San Juan, Argentina.” Lic. María Agustina Cócola

Matriz de Pearson Veta San Pedro

	Au ppm	Hg ppb	Ag ppm	Al %	As ppm	Ba ppm	Be ppm	Bi ppm	Ca %	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Fe %	K %	Mg %	Mn ppm	Mo ppm	Na %	Ni ppm	P ppm	Pb ppm	S %	Sb ppm	Sr ppm	Ti %	V ppm	Zn ppm
Au ppm	1	-0.1627663	0.71552714	-0.34074023	0.26635082	-0.05872505	-0.19554402	-0.16072277	-0.42656522	0.01792285	0.19794645	-0.19934892	0.58646671	0.12698354	-0.19885952	0.17558779	0.35560029	0.10150155	-0.37785299	-0.0837761	-0.2846779	0.64059974	-0.090183	-0.21631292	-0.3385466	-0.06481451	-0.11504555	0.25951181
Hg ppb	-0.1627663	1	-0.1451783	0.00975164	-0.03352097	-0.09745897	0.78686041	0.36107167	0.32518158	0.4330127	-0.19188225	0.77932561	0.12314638	0.15315925	-0.54497076	-0.0869039	-0.30569272	-0.17298698	-0.0698207	0.09786284	-0.02552338	-0.09082675	-0.13358658	0.33210419	-0.14839989	0.04142858	-0.13289524	-0.25811753
Ag ppm	0.71552714	-0.1451783	1	-0.2142676	0.54404901	-0.26928722	-0.1451783	-0.17773481	0.40112893	0.49620763	-0.24087054	0.60304745	0.31251145	-0.23848426	0.12460392	0.66932543	0.54886683	-0.4010215	0.2667271	-0.41141844	0.84024623	-0.06623594	-0.15135733	-0.4408314	-0.25615901	-0.05731439	0.43311984	
Al %	-0.34074023	0.00975164	-0.2142676	1	0.31446557	0.76149636	0.00975164	0.00975164	0.63420432	0.19563052	0.6052438	0.55482427	-0.3047603	0.75798568	0.18479691	0.74338738	0.39675492	0.36294597	0.73149257	0.72287271	0.78165005	-0.23283282	0.66226461	-0.21792684	0.91670737	0.88749534	0.78704237	0.51056727
As ppm	0.26635082	-0.03352097	0.54404901	0.31446557	1	0.05973529	0.13751406	0.13751406	0.05973529	0.13751406	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529	0.05973529
Ba ppm	-0.05872505	-0.09745897	-0.26928722	0.76149636	0.05973529	1	-0.12959532	-0.1151393	0.28637305	-0.19706347	0.27317348	0.29090413	-0.13367862	0.47331283	0.45721108	0.61258172	0.09472777	0.18668299	0.40641256	0.35383121	0.63100622	-0.17462602	0.48530285	-0.20198553	0.79771658	0.82564553	0.56584281	0.35506534
Be ppm	-0.19554402	0.78686041	-0.1451783	0.00975164	0.13751406	-0.12959532	1	0.85961117	0.32518158	0.4330127	-0.13100038	0.79249095	-0.09126455	0.15315925	-0.54497076	-0.0869039	-0.17447915	-0.14695181	-0.0698207	0.34792399	0.31752095	-0.09947919	-0.13358658	0.26999399	-0.12234073	0.04142858	0.14660025	-0.17104363
Bi ppm	-0.16072277	0.36107167	-0.1451783	0.00975164	0.235549	-0.1151393	0.85961117	1	0.32518158	0.4330127	-0.03908545	0.55228552	-0.23986666	0.15315925	-0.54497076	-0.0869039	-0.1055713	-0.07883363	-0.0698207	0.44471831	0.50093335	-0.07512233	-0.13358658	0.13302111	-0.06200085	0.04142858	0.33155516	-0.04475527
Ca %	-0.42656522	0.32518158	-0.17773481	0.63420432	0.53552197	0.28637305	0.32518158	0.32518158	1	0.64194143	0.28783895	0.60560319	-0.46547497	0.68829579	0.21124357	0.57381881	0.29502231	0.31899048	0.33659001	0.65513272	0.75009298	-0.11450505	0.39626234	-0.12813517	0.43643786	0.53594927	0.78625932	0.58035999
Cd ppm	0.01792285	0.4330127	0.40112893	0.19563052	0.79156144	-0.19706347	0.4330127	0.4330127	0.64194143	1	0.35238935	0.46697466	-0.0101147	0.63762231	-0.17300859	0.3428556	0.47934165	0.44053468	-0.02427822	0.64249531	0.28690758	0.44829928	0.14884012	-0.07214302	-0.09510318	0.11048209	0.42223686	0.63531795
Co ppm	0.19794645	-0.19934892	0.49620763	0.6052438	0.43728612	0.77317348	-0.13100038	-0.03908545	0.28783895	0.35238935	1	0.14175838	-0.04997341	0.27268224	0.51452971	0.93204854	0.78375153	0.27597867	0.76190935	0.29304545	0.17123585	0.35258178	-0.28442041	0.374812	0.44903386	0.54180388	0.46973388	
Cr ppm	-0.19934892	0.77932561	-0.24087054	0.55482427	0.24297602	0.29090413	0.79249095	0.55228552	0.60560319	0.46697466	0.14175838	1	-0.06977011	0.61794289	-0.30237046	0.44067493	-0.00998116	-0.02095983	0.35733581	0.112274	0.54946128	-0.15600847	0.24139619	0.1807035	0.31257389	0.61897776	0.4277248	0.07939631
Cu ppm	0.58646671	0.12314638	0.60304745	-0.3047603	0.30967056	-0.13367862	-0.09126455	-0.23986666	0.46547497	-0.0101147	-0.04997341	-0.06977011	1	-0.05181284	-0.13118137	-0.02055192	-0.03060719	-0.13078603	-0.18611238	-0.14625122	-0.45048192	0.73182159	-0.17028531	0.13913062	-0.33795044	-0.25176403	-0.24195025	0.08998763
Fe %	0.12698354	0.15315925	0.31251145	0.75798568	0.74476181	0.47331283	0.15315925	0.15315925	0.68829579	0.63762231	0.77161884	0.61794289	-0.05181284	1	-0.01467344	0.83366942	0.73894664	0.58158689	0.39895669	0.85196074	0.66768348	0.25649401	0.50386331	-0.2124017	0.5281931	0.73644176	0.83962572	0.78230815
K %	-0.19885952	-0.54497076	-0.23848426	0.18479691	-0.04632503	0.45721108	-0.54497076	-0.54497076	0.1124357	-0.17300859	-0.27268224	0.30237046	-0.13118137	-0.01467344	1	0.20355631	-0.26055919	0.06220027	-0.02793035	-0.24210819	0.07558597	0.21058556	0.15127695	0.12165326	0.22037999	0.19058847	0.09085403	0.29004079
Mg %	0.17558779	-0.0869039	0.12460392	0.74338738	0.53953945	0.61258172	-0.0869039	-0.0869039	0.57381881	0.3428556	0.51452971	0.44067493	-0.02055192	0.83266942	0.20355631	1	0.48733542	0.22829598	0.57058888	0.58921039	0.64173599	0.18397874	0.80209803	0.23390205	0.70082689	0.83624614	0.66975231	0.84499786
Mn ppm	0.35560029	-0.30569272	0.66932543	0.39675492	0.49847033	0.09472777	-0.17447915	-0.1055713	0.2902231	0.47934165	0.93204854	0.00998116	-0.03060719	0.73894664	-0.26055919	0.48733542	1	0.81588736	0.03192423	0.69753247	0.19596691	0.33948944	0.30557925	-0.3016665	0.14562921	0.27314709	0.47195977	0.56303055
Mo ppm	0.10150155	-0.17298698	0.54886683	0.36294597	0.36569793	0.18668299	-0.14695181	-0.07883363	0.31899048	0.44053468	0.78375153	0.58158689	0.06220027	0.22829598	0.81588736	1	-0.22277375	0.62292113	0.08596637	0.2719205	0.08795883	0.17875601	0.12829271	0.37768962	0.42606479			
Na %	-0.37785299	-0.0698207	-0.4010215	0.73149257	0.14264748	0.40641256	-0.0698207	-0.0698207	0.6359001	0.02427822	0.27597867	0.35733581	-0.18611238	0.39895669	-0.02793035	0.57058888	0.03192423	-0.22277375	1	0.3312385	0.5578348	-0.34817794	0.62603195	0.1968552	0.85200017	0.69929418	0.44152896	0.24641104
Ni ppm	-0.0837761	0.09786284	0.2667211	0.72287271	0.62483902	0.35383121	0.34792399	0.44471831	0.65513272	0.76190935	0.5121274	-0.14625122	0.85196074	-0.24210819	0.58921039	0.69753247	0.62292113	0.3312385	1	0.64043164	0.17916805	0.46837701	0.18042776	0.45751265	0.56516504	0.73958687	0.6001615	
P ppm	-0.2846779	-0.02552338	-0.41141844	0.78165005	0.37669747	0.63100622	0.31752095	0.50093335	0.75009298	0.28690758	0.29304545	0.54964128	-0.45048192	0.66768348	0.02158556	0.81973799	0.19596691	0.0859637	0.5578348	1	-0.26412963	0.43113991	-0.0979502	0.73145027	0.8417672	0.88312071	0.42285853	
Pb ppm	0.64059974	-0.09082675	0.84024623	-0.2328282	0.66337004	-0.17462602	-0.09947919	-0.07512233	-0.11450505	0.44829928	0.17123585	0.24600847	0.73182159	0.25649401	0.02158556	0.81973799	0.33948944	0.2719205	-0.34817794	0.17916805	-0.26412963	1	-0.02527629	-0.39381944	-0.21538088	-0.00875335	0.55399745	
S %	-0.090183	-0.13358658	-0.06623594	0.66226461	0.14476818	0.48530285	-0.13358658	-0.13358658	0.39626234	0.14884012	0.35258178	0.24600847	-0.17028531	0.50386331	0.15127695	0.80209803	0.30557925	0.08795883	0.62603195	0.46837701	0.43113991	-0.02527629	1	-0.16787746	-0.71398406	0.63909401	0.2839815	0.65840683
Sr ppm	-0.21631292	0.33210419	-0.15135733	-0.21792684	-0.22192946	-0.20198553	0.26999399	0.13302111	-0.12813517	-0.07214302	-0.28412041	0.2419635	-0.13913062	-0.2124017	0.12165326	-0.23292005	-0.3016665	-0.17875601	-0.11968552	-0.18042776	-0.0979502	-0.01534657	-0.16787746	1	-0.21083056	-0.2006456	-0.25671069	-0.27193989
Sr ppm	-0.3385466	-0.14839989	-0.4408314	0.91670737	0.084622	0.79771658	-0.12234073	-0.06200085	0.43643786	-0.09510318	0.374812	0.31257389	-0.3395044	0.5281931	0.22037999	0.70082689	0.1456292	0.0399271	0.85200017	0.45751265	0.73145027	-0.39381944	0.71398406	-0.21083056	1	0.89952347	0.60516443	0.36419282
Ti %	-0.06481451	0.04142858	-0.25615901	0.88749534	0.29519974	0.82564553	0.04142858	0.04142858	0.53594927	0.11048209	0.44903386	0.61897776	-0.25176403	0.19058847	0.83624614	0.27314709	0.12829271	0.69929418	0.56516504	0.8417672	-0.21538088	0.63909401	-0.2006456	0.89952347	1	0.76862869	0.51626261	
V ppm	-0.11504555	-0.13289524	-0.05731439	0.78704237	0.63097551	0.56584281	0.14660025	0.33155516	0.78625932	0.42223686	0.54180388	0.4277348	-0.24195025	0.83962572	0.09085403	0.66975231	0.47195977	0.37768962	0.44152896	0.73958687	0.88312071	-0.00875335	0.28398145	-0.25671069	0.60516443			

Matriz de Pearson Brechas

	Au ppm	Hg ppb	Ag ppm	Al %	As ppm	Ba ppm	Be ppm	Bi ppm	Cs %	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Fe %	K %	Mg %	Mn ppm	Mo ppm	Na %	Ni ppm	P ppm	Pb ppm	S %	Sb ppm	Se ppm	Ti %	V ppm	W ppm	Zn ppm
Au ppm	0.130705243	-0.0723606	0.51203381	-0.14811655	-0.10228867	-0.1307238	0.65758715	-0.09472589	0.0053825	0.01261814	0.10370471	0.1527114	-0.00710047	-0.08497974	-0.14647007	-0.14118393	0.17398818	-0.10435125	0.06130187	0.04273719	0.21195464	0.00251151	0.13208429	-0.19675347	0.01917276	0.06976518	-0.02004359		
Hg ppb	0.130705243	1	0.002353	-0.05780866	0.04290301	0.0810448	-0.11590902	0.21751834	-0.07761827	-0.02032112	-0.08734961	-0.02842916	-0.03827446	-0.09121168	-0.08701757	-0.12781502	-0.16423144	0.02826344	-0.17808219	-0.04938608	-0.1446359	0.01634455	0.01644142	0.12555659	-0.12047658	-0.03559622	-0.06728074	-0.02215967	-0.13808357
Ag ppm	0.51203381	0.002353	1	-0.12716034	-0.06599014	-0.05476842	-0.07871101	0.0236387	-0.12407372	-0.01705861	-0.08076751	-0.13787262	0.06686808	-0.14216815	-0.04455239	-0.09190666	0.08123317	-0.01290707	-0.08067771	-0.08586939	-0.11832281	0.16988612	-0.1723115	0.16988612	-0.1663837	-0.1635368	-0.0035292	0.00139645	
Al %	-0.07236058	-0.05780866	-0.12716034	1	0.05042193	0.4960599	0.76451586	0.0161822	-0.40838079	0.1413645	0.466213	0.47043093	0.19115855	0.35233723	-0.78122299	0.74066991	0.62133377	-0.17536916	0.73027225	0.30255188	0.76604936	0.17548967	0.36733905	-0.01561089	0.60189529	0.29187959	0.78156423	0.15641757	0.58795586
As ppm	0.148116545	0.042903007	-0.06599014	0.05042193	1	-0.03789181	-0.20108314	0.33225879	-0.10416137	0.1406609	-0.03455546	0.48223527	0.16852217	0.50582022	-0.19035064	-0.22353329	-0.23152821	0.48878984	-0.22096633	0.26127486	0.19260344	0.48956493	0.04247805	0.48036914	0.28161518	-0.03631697	0.39525513	0.35289714	-0.14744671
Ba ppm	-0.10228867	0.081044799	-0.05476842	0.4960599	-0.03789181	1	0.54613388	-0.02504936	0.23752507	-0.02886608	0.25951371	0.27164916	0.29415217	0.22726932	0.56314801	0.52180165	0.50598863	-0.0011493	0.60763292	0.24857115	0.41168459	-0.04272552	0.00010941	0.03723662	0.35024583	0.21504429	0.38454922	-0.03205936	0.45788571
Be ppm	-0.130732799	-0.115909919	-0.07871101	0.76451586	-0.20108314	0.54613388	1	-0.11234176	0.47596513	0.10455026	0.57314017	0.18808663	0.14448321	0.34167225	0.91761787	0.92175848	0.842348	-0.23242331	0.90110602	0.31161112	0.65160786	-0.06498414	0.27893676	0.16521736	0.39098555	0.27166249	0.582966	0.08487918	0.80318402
Bi ppm	0.657587147	0.21751834	0.0236387	0.0161822	0.33225879	-0.02504936	-0.11234176	1	-0.07106811	-0.0502669	0.06218121	0.23312278	0.15859053	0.11307992	-0.0769516	-0.11231213	-0.1999385	0.23188035	-0.05873488	0.09754171	0.15290001	0.37563923	0.04347253	0.52936786	0.22447149	-0.04655632	0.15125298	0.10517168	-0.06660573
Ca %	-0.094725894	-0.077618273	0.40838079	-0.10416137	0.23752507	0.47596513	-0.07106811	1	-0.0599871	0.24176458	0.03858402	0.06822935	0.17534666	0.49085949	0.50735916	0.63656175	-0.10177195	0.54752138	0.32915857	-0.10116796	0.41058352	-0.12336107	0.25378514	0.08133613	0.27296424	0.05854197	0.41151289		
Cd ppm	0.00538247	-0.02032115	-0.01705861	0.1413645	0.1406609	-0.02886608	0.10455026	0.1502669	1	0.5098007	0.14279841	0.03150156	0.12833983	0.0947003	0.08411002	-0.0206788	0.0383027	-0.03944356	0.27887347	0.14373592	0.45998644	0.06869395	0.03481542	0.05739875	-0.00021947	0.17952778	-0.03278979	0.05211828	
Co ppm	0.012618144	-0.087349615	-0.08076751	0.466213	-0.03455546	0.23951371	0.57314017	0.06211821	0.24176458	1	0.5989007	0.17504208	0.22726932	0.24849053	0.49531811	0.59358756	0.58455796	-0.06995939	0.59321182	0.43980855	0.44195475	0.1180468	0.25136055	-0.03052397	0.20727418	0.1034294	0.39140851	0.1843263	0.64393704
Cr ppm	0.103704714	-0.028429164	-0.13787262	0.47043093	0.48223527	0.27164916	0.18805863	0.23312278	0.03585402	0.14279841	1	0.14999975	0.17504208	0.14999975	0.17398857	0.19678732	0.15782022	0.09516742	0.1692001	0.44153622	0.5119984	0.31737568	0.08655212	0.34658433	0.40275276	0.19494175	0.7078746	0.14169338	0.17541494
Cu ppm	0.1527114	-0.038274456	0.06686808	0.19115855	0.16852217	0.29415217	0.14448321	0.15859053	0.06822935	0.03150156	0.22738846	0.14999975	1	0.23692026	0.24387293	0.11152648	0.10144769	0.12154619	0.3274006	0.16348114	0.26338216	0.1263822	0.04770062	0.14655512	0.2181099	0.11236189	0.19239908	0.1081872	0.18418664
Fe %	-0.007100475	-0.091121683	-0.14216815	0.35232723	0.50582022	0.22726932	0.34167225	0.11307992	0.17534666	0.12833983	0.24849053	0.46633856	0.23692026	1	0.33878134	0.31509986	0.27429993	0.31197278	0.28023265	0.47198828	0.56606419	0.23794595	0.23479754	0.22509225	0.36976283	0.17830998	0.65785586	0.25262782	0.29183736
K %	-0.084979738	-0.087071567	-0.04455379	0.78122299	-0.19035064	0.56314801	0.91761787	-0.0769516	0.49085949	0.0947003	0.49551811	0.17398857	0.24387293	0.33878134	1	0.84790023	-0.21376729	0.86839907	-0.21376729	0.86839907	0.63447493	0.02473677	0.40659012	-0.09356094	0.40529194	0.2879196	0.5853017	0.09251433	0.73850735
Mg %	-0.146470073	-0.127815023	-0.09190666	0.74066991	-0.22353329	0.52180165	0.92175848	-0.11231213	0.50735916	0.08431002	0.59258756	0.19678732	0.11152648	0.31509986	0.84790023	1	0.91173426	-0.26100966	0.88415265	0.32840221	0.616198	-0.08776079	0.21452191	-0.18076218	0.36655006	0.28495772	0.5481058	0.05391314	0.76155589
Mn ppm	-0.141189298	-0.164231436	-0.08123317	0.62133707	-0.23152821	0.50598863	0.842348	-0.11999383	0.63656175	-0.0205788	0.58455796	0.15782022	0.10144769	0.27429993	0.73489593	0.91173426	1	-0.24150099	0.8704651	0.30101106	0.53393864	-0.18241796	0.07443108	-0.20443265	0.32599554	0.23685531	0.43886789	0.05323835	0.77510757
Mo ppm	0.173988177	0.028263442	-0.01290707	0.17536916	0.48878984	-0.0011493	-0.23242331	0.23188035	0.0177195	0.0383027	-0.06995979	0.09516742	0.11254619	0.31197278	-0.21376729	-0.26100966	-0.24150099	1	-0.22431603	0.08754779	0.03661793	0.3036198	0.07854403	0.39191389	0.11158201	-0.07497722	0.08070111	0.26008608	-0.07041837
Na %	-0.104351247	-0.178082186	-0.08067771	0.73027225	-0.22209633	0.60673292	0.90110602	-0.05873488	0.54752138	0.03944356	0.50321182	0.1692001	0.3274006	0.28023265	0.86839907	0.88415265	0.8704651	-0.22431603	1	0.22699993	0.6460888	-0.11878532	0.1992475	-0.16199707	0.46019582	0.27970056	0.52255128	0.0822225	0.74208733
Ni ppm	0.061301868	-0.049386084	-0.08586939	0.30325188	0.26127486	0.24857115	0.31161112	0.09754171	0.05898918	0.43980856	0.44153622	0.16348114	0.47198828	0.22370288	0.32840221	0.30101106	0.08754779	0.22699993	0.6460888	1	0.3325087	0.0598032	0.00354324	0.1956126	0.15295804	0.33238325	0.41692458	0.23901974	0.27801378
P ppm	0.04273719	-0.344635897	-0.11832281	0.76699898	0.19260344	0.41168459	0.65160786	0.15290001	0.32915857	0.14373592	0.44195475	0.5119984	0.26338216	0.56606419	0.63447493	0.616198	0.53393864	0.3661793	0.6460888	0.3325087	1	0.25612368	0.14021017	0.73103867	0.23796763	0.04880858	0.17963582	0.55143224	
Pb ppm	0.211954635	0.016344553	0.00598581	0.17548967	0.48956493	0.04272552	-0.06498414	0.37533923	-0.10116796	0.4598544	0.1809468	0.11737568	0.1263822	0.23794595	0.02473677	-0.08776079	0.18241798	0.3036198	-0.11878532	0.0598032	0.25612368	1	0.26535201	0.25664063	0.28039873	-0.0306747	0.31779325	0.08152312	0.03605058
S %	0.002511511	0.016441417	-0.1723115	-0.1635368	0.04247805	0.00010941	0.04347253	0.41058352	0.06869395	0.25126055	0.08655212	0.04770062	0.23479754	0.40659012	0.21452191	0.07443108	0.07854403	0.1992475	0.00354324	0.36331958	0.2635201	1	-0.00276695	0.19889297	0.09419299	0.36834676	0.22885155	0.28488779	
Sb ppm	0.550024096	0.125556593	0.16988612	-0.01561089	0.48036914	0.03723662	-0.16521736	0.52936786	-0.12336107	0.03481642	-0.03052397	0.34658433	0.14655512	0.22509225	-0.09356094	-0.18076218	-0.20443265	0.39191389	-0.16199707	0.1956126	0.14021017	0.25664063	-0.00266695	1	0.27306025	0.00944987	0.24926049	0.17873557	-0.11374312
Se ppm	-0.13072487	-0.12047658	-0.11662872	0.60189529	0.28161518	0.35024583	0.39098555	0.22447149	0.25378514	0.05739875	0.20727418	0.40275276	0.1181099	0.36976283	0.40529194	0.36655006	0.32695551	0.11158201	0.46019582	0.15295804	0.73103867	0.28039873	0.19889297	0.27306025	1	0.16230337	0.65790829	0.10809965	0.30624058
Ti %	-0.196755472	-0.035596224	-0.16188337	0.29187959	-0.03631697	0.21504429	0.27166249	-0.04655632	0.08133613	0.00021947	0.10184294	0.19494175	0.11236189	0.1730998	0.2879196	0.2845772	0.43886789	0.08070111	0.52255128	0.41692458	0.84368053	-0.02066747	0.09419299	0.00944987					

“Caracterización geológica-estructural de las manifestaciones hidrotermales del Distrito Minero Castaño Nuevo, y su relación con el Magmatismo Gondwánico. Cordillera Frontal de San Juan, Argentina.” Lic. María Agustina Cocola

Matriz de Pearson Alteración Central

	Au ppm	Hg ppb	Ag ppm	Al %	As ppm	Ba ppm	Be ppm	Bi ppm	Ca %	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Fe %	K %	Mg %	Mn ppm	Mo ppm	Na %	Ni ppm	P ppm	Pb ppm	S %	Sb ppm	Sr ppm	Ti %	V ppm	W ppm	Zn ppm	
Au ppm	1																													
Hg ppb	0.06454035	1																												
Ag ppm	0.117405647	-0.100235443	1																											
Al %	-0.03266701	0.28489127	-0.27843561	1																										
As ppm	0.28489127	-0.27843561	1	0.18839432	1																									
Ba ppm	-0.087836913	0.081134974	0.18839432	-0.26952952	0.08045984	1																								
Be ppm	-0.033232465	0.286241053	-0.18497244	0.60478677	-0.26952952	0.69807204	1																							
Bi ppm	-0.005984032	0.288422715	-0.18700198	0.72180586	-0.08045984	0.69807204	0.09175034	1																						
Ca %	0.009633072	0.064068591	-0.1078477	0.1413711	-0.00191161	0.18325733	0.09175034	-0.00094454	1																					
Cd ppm	0.484188344	0.149730334	-0.16630151	0.37747902	-0.07619139	0.21374527	0.33442118	0.1338787	0.67671743	1																				
Co ppm	0.195173103	-0.112818967	0.05152828	-0.08265644	-0.13544778	0.11639465	0.18025389	0.02160133	-0.338787	0.26671324	1																			
Cr ppm	0.335448921	0.167654815	-0.04915019	0.39783391	0.00022069	0.32437425	0.5019532	-0.00557701	0.67671743	0.26671324	0.45563384	1																		
Cu ppm	0.297351024	0.206464661	-0.23726677	0.53136464	0.50058996	0.52030795	0.31232702	0.44228596	0.6061262	0.45563384	0.33957089	0.6828284	1																	
Fe %	0.197695942	0.146939472	0.52586697	0.25989679	-0.08789354	0.28481404	0.3851683	0.14147047	0.12515138	0.0023564	0.28227704	0.33957089	0.6828284	1																
K %	0.439895864	0.157202979	-0.3177833	0.43324108	0.09816101	0.35629848	0.42340796	0.17448887	0.59137836	0.10212845	0.55890672	0.6208824	0.22795185	0.43470789	1															
Mg %	-0.047649845	0.285110686	-0.18595026	0.75171918	-0.20452592	0.76124898	0.77201209	0.24865032	0.26478595	0.03387877	0.33714413	0.47948067	0.41680222	0.43470789	0.21353294	1														
Mn ppm	0.477570242	0.1402564879	-0.1068345	0.44190093	0.2312875	0.22647267	0.31311823	-0.02169752	0.47454362	0.23105371	0.39254558	0.505935	0.0066289	0.44453661	0.21353294	0.6026342	1													
Mo ppm	0.58630081	0.00837337	0.30142945	0.02865781	0.10244613	0.08795025	0.13977332	0.03362161	0.14716848	-0.03256805	0.19550892	0.62025745	0.13977332	0.0141038	0.24320588	0.22283831	0.28493276	1												
Na %	-0.00952927	0.23392199	0.2307443	0.23035574	0.09292626	0.23392199	0.2307443	0.23035574	0.09292626	0.23392199	0.2307443	0.23035574	0.09292626	0.23392199	0.2307443	0.23035574	0.09292626	0.23392199	1											
Ni ppm	0.03819793	-0.17289148	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	0.33897854	1										
P ppm	0.009633072	0.064068591	-0.1078477	0.1413711	-0.00191161	0.18325733	0.09175034	-0.00094454	0.1338787	0.26671324	0.45563384	0.33957089	0.6828284	0.22795185	0.43470789	0.21353294	0.6026342	0.53913447	0.3557622	0.47695421	0.28736318	-0.04330669	0.07390229	-0.18285231	0.25334674	0.6040335	0.53644325	0.367339	0.60811462	
Pb ppm	0.229752742	-0.011348081	0.03819793	0.11523862	-0.21299408	0.2322735	0.05197381	0.62025745	0.21519942	0.21285867	0.18803879	0.29587904	0.22905405	0.27854538	0.23028991	-0.04330669	0.31213966	0.20236424	0.2753395	0.25111832	0.36633516	0.31526045	0.07888258	0.2449064	0.17013804	0.26938033	0.08451095	0.31414742		
S %	0.25096698	0.08795026	-0.17289148	0.24063361	0.19066845	-0.09130371	0.04265901	0.13977332	0.02290409	-0.17644629	0.47467065	0.37575045	0.20299596	0.5832275	0.17152591	0.07390229	0.23810811	0.17454999	0.1769091	0.27915351	0.39944847	0.31526045	0.07888258	0.2449064	0.17013804	0.26938033	0.08451095	0.31414742		
Sb ppm	-0.00952927	0.23392199	0.2307443	0.23035574	0.09292626	0.23392199	0.2307443	0.23035574	0.09292626	0.23392199	0.2307443	0.23035574	0.09292626	0.23392199	0.2307443	0.23035574	0.09292626	0.23392199	0.2307443	0.23035574	0.09292626	0.23392199	0.2307443	0.23035574	0.09292626	0.23392199	0.2307443	0.23035574	0.09292626	
Sr ppm	0.066106345	0.13669215	-0.3001221	0.4955188	-0.04892006	0.43794671	0.55704932	0.27451162	0.25307486	0.14302865	0.30593185	0.38511017	0.16987892	0.29817366	0.52190742	0.14101616	0.23897826	0.09018568	0.46873762	0.08287274	0.38816945	0.15161807	0.09219172	-0.11605618	0.66185659	0.56088837	0.50651107	0.19159797	0.27764733	
Ti %	0.219343968	0.230674435	-0.35393036	0.77217895	-0.07105675	0.72622785	0.7355755	0.22283831	0.45199614	0.15094838	0.44089533	0.70122535	0.19584127	0.653928	0.72237428	0.6040335	0.53400205	0.2526683	0.78679243	0.40745578	0.5797437	0.17013804	0.16252971	-0.13959018	0.73762962	1	0.88855178	0.41507451		
V ppm	0.211637	0.23035574	-0.37073067	0.77593912	0.21484507	0.59358367	0.64423194	0.28493276	0.51229743	0.4072931	0.51683714	0.80523836	0.2822372	0.77780245	0.67234608	0.53644325	0.50856931	0.30880978	0.68243837	0.40669567	0.69261438	0.26930833	0.41673378	-0.3147578	0.59390339	0.88855178	1	0.54766055		
W ppm	0.028772208	0.09926408	-0.06319489	0.66646843	0.29044536	0.29309393	0.32235575	0.15359135	0.24862835	-0.22944626	0.39181172	0.46296136	0.30580074	0.32030874	0.39210575	0.363739	0.23636972	0.14881502	0.31251422	0.26690885	0.36696676	0.08451095	0.30885653	-0.08724279	0.26350939	0.41507451	0.54766055	1		
Zn ppm	0.67546698	0.075702588	-0.10436431	0.31823083	-0.07418644	0.36426925	0.42992703	0.05034914	0.5971326	0.46077209	0.70367511	0.47946271	0.17857385	0.61688252	0.28437789	0.60981462	0.85187938	0.7071318	0.46664593	0.60999945	0.48113695	0.31414742	0.24270217	-0.16410892	0.40034201	0.56785466	0.53638442	0.26784817	1	