



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DOCTORAL

El Prospecto de Cu-(Au-Mo) ALTAR
(31° 29'LS, 70°28'LO), San Juan:

- I. Fertilidad de los Intrusivos Miocenos en el área
- II. Secuencia y Abundancia de las Paragénesis Hidrotermales, Pasajes de Flujos de Fluidos
- III. Evolución Geoquímica del Sistema Hidrotermal

Laura Maydagán

Dirección: Marta B. Franchini

Graciela R. Mas

TOMO I

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2012



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

ACTA DE LA DEFENSA ORAL DE TESIS DOCTORAL

-----En la ciudad de Bahía Blanca, a los 28 días del mes de marzo de 2012, siendo las 14 hs., en la Sala de Conferencias del Dpto. de Geología de la Universidad Nacional del Sur, se reúne el jurado designado por la Secretaría de Estudios de Postgrado y Educación Continua, para dictaminar sobre la defensa oral del trabajo de Tesis Doctoral realizado por la Licenciada en Ciencias Geológicas, Laura Maydagán, bajo la dirección de la Dras. Marta Franchini y Graciela Raquel Mas sobre el tema "El prospecto de Cu-(Au-Mo) Altar (31° 29'LS y 70° 28'LO), San Juan: I. Fertilidad de los intrusivos Miocenos en el área . II. Secuencia y Abundancia de las paragénesis hidrotermales, pasajes de flujos de fluidos. III. Evolución Geoquímica del Sistema Hidrotermal"-----

-----El jurado integrado por el Dr. Eduardo Llambías, Dr. Isidoro Schalamuk y Dr. Eduardo Domínguez considera que la tesis presenta una organización interna adecuada al tema. Las ideas están expresadas con mucha precisión y claridad. La investigación revela una gran profundidad y originalidad, atacando todos los temas relacionados a los depósitos de cobre porfídicos que necesitan de diferentes disciplinas geológicas. El trabajo de tesis se desarrolló haciendo uso de las metodologías tradicionales y de las de última generación existentes en centros de investigación de excelencia del extranjero. Se destacan todas las ilustraciones en el material impreso y en la defensa oral. La bibliografía consultada es completa y está muy actualizada. Las conclusiones obtenidas constituyen aportes significativos al conocimiento de un área geográfica poco estudiada hasta el momento y representan una contribución importante para la comprensión de la génesis de este tipo de yacimientos.

-----La defensa oral fue efectuada en forma muy amena y comprensible para todo el auditorio con adecuada claridad expositiva apoyada por material gráfico de excelente calidad.

-----Por estas razones, los miembros del jurado por unanimidad coinciden en calificar a este trabajo de Tesis Doctoral con 10 (SOBRESALIENTE) y recomendación de su publicación, encomendando a la Secretaría de Estudios de Postgrado y Educación Continua se expida el título académico de Doctor en Geología de la Universidad Nacional del Sur, a la Licenciada Laura Maydagán (DNI: 28.823.890)-----

-----Siendo las 15 horas, se da por finalizada la labor del jurado.-----

Dr. Eduardo Llambías

Dr. Isidoro Schalamuk

Dr. Eduardo Domínguez

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 otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur y en la Facultad de Geología y Petróleo de la Universidad Nacional del Comahue durante el período comprendido entre el 15 de mayo de 2007 al 20 de noviembre de 2011, bajo la dirección de la **Dra. Marta B. Franchini** (CONICET, CPEM Centro Patagónico de Estudios Metalogénéticos, Universidad Nacional del Comahue) y la **Dra. Graciela R. Mas** (CONICET, Universidad Nacional del Sur).

Laura Maydagán



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

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

A Coco Maydagán y Lily Brignole

A Martin Di Luca

A Marta Franchini

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecerle a mi directora de tesis, la Dra. Marta B. Franchini por haberme dado la oportunidad de trabajar con ella. Por enseñarme a trabajar en el área de geología económica y ofrecerme con generosidad su conocimiento y experiencia sobre los estudios metalogenéticos. Quiero subrayar su capacidad de brindarse, su dedicación, su tiempo y su actitud positiva frente a las dificultades. Quiero agradecerle por haberme guiado y acompañado en las distintas etapas de este trabajo, transmitiéndome en todo momento su entusiasmo y su apoyo.

A la Dra. Agnes Impiccini por ser mi co-directora de beca doctoral de CONICET, por su ayuda y colaboración durante el desarrollo de este trabajo de tesis y durante mis viajes y estadías en Neuquén, por enseñarme técnicas para trabajar con DRX, por las charlas compartidas y su amabilidad de siempre.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por haberme otorgado dos becas de postgrado internas desde el 01/04/2007 al 01/04/2011 y haber financiado los subsidios PIP N° 6043 y más reciente PIP N° 1083 que ayudaron en el desarrollo de la tesis.

A la Dra. Graciela R. Mas por sus buenos consejos y su apoyo que me permitió llevar adelante esta tesis.

A los geólogos Jeff Toohey y Roger Rey de la empresa minera Peregrine Metals Ltd. por estar siempre dispuestos a ayudar, poniendo a disponibilidad los vehículos para acceder al prospecto y la infraestructura del campamento para permanecer en el área de trabajo. Asimismo quisiera agradecerles por su colaboración con el costo de 5 dataciones U-Pb y una datación Ar-Ar, el costo de los análisis de microsonda electrónica realizados en U.S.A y el costo del viaje a los laboratorios de la UFMG, Belo Horizonte, Brasil. También por ayudarme con los gastos de estadía durante las campañas de campo y de muestreo de los sondajes en la ciudad de Mendoza y por las charlas sobre la geología de Altar.

A los geólogos Jorge Bengochea, Santiago Gigola, Guillermo Almandoz de la empresa minera Río Tinto Mining & Exploration por permitirme el acceso al distrito de estudio y ayuda logística en los trabajos de campo y el costo del alojamiento durante el muestreo de los sondajes en la ciudad de Mendoza.

Un agradecimiento especial quiero destinar a la Dra. Ana María Sato del Instituto de Investigaciones Geológicas (CIG) por su hospitalidad durante mis estadías en La Plata, su ayuda en el análisis de las muestras macroscópicas y cortes petrográficos de Altar, por sus

consejos y muy valiosas discusiones sobre la geología de Altar. También por haberme enseñado la técnica de elutriación para separar los circones de las muestras del proyecto.

Quiero agradecerle al Dr. Massimo Chiaradia (Departamento de Mineralogía, Universidad de Ginebra, Suiza) por su ayuda en la obtención de los análisis de Isótopos Radiogénicos, por sus interesantes comentarios y discusiones sobre la geología de Altar.

A los Directores del Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur, Dra. Graciela Mas y del instituto CIMAR de la Universidad del Comahue, Dr. Jorge Vallés por haberme brindado lugares de trabajo.

A la Fundación de la Society of Economic Geologists (SEG) por haberme otorgado el subsidio “SEG Student Grants 2008” que permitió financiar parte de los trabajos de campo y confección de secciones delgadas petro-calcográficas, y luego otorgarme dos becas para poder asistir a un curso en la ciudad de México y a un congreso en Keystone, Colorado (USA), que fueron muy importantes para la realización de esta tesis.

Al Lic. Juan Carlos Gómez (UNLP) por su hospitalidad, su guía en el tratamiento de imágenes satelitales y por su generosidad para capacitarme en el uso de herramientas de procesamiento digital de imágenes como los programas ER Mapper y MapInfo.

A la Dra. María Josefina Pons por su ayuda en la interpretación de los análisis químicos de las muestras de Altar, por su muy valiosa colaboración en los trabajos de campo en la Alta Cordillera de San Juan, por las charlas compartidas y por su amistad.

Al Dr. Javier Ríos (CDTN, Universidad Federal de Minas Gerais) y su equipo de investigación por la amabilidad y hospitalidad con la que me recibieron durante mi estadía en Brasil, y su muy importante ayuda y colaboración para lograr la obtención de análisis de IF de alta temperatura y análisis de Raman.

A la Facultad de Ingeniería, de la UN del Comahue, por permitirme el alojamiento en la Residencia Universitaria de esta unidad académica.

A los geólogos de la empresa minera Stillwater por su colaboración con el costo de análisis de microsonda electrónica realizados en U.S.A, Oregon State University.

A la Dra. Marta Franchini otro agradecimiento muy especial por haberme acompañado a todas las campañas a la Alta Cordillera de San Juan.

A la Dra. Agnes Impiccini (CIMAR), por su ayuda en todas las campañas de muestreo de testigos en la ciudad de Mendoza, en la realización de análisis e informes de DRX y en la interpretación de los análisis químicos de microsonda de electrones.

A la Dra. Graciela R. Mas y al Dr. Leandro Bengochea por su colaboración en los análisis de inclusiones fluidas y análisis de difracción de rayos X.

A IO Global y Acme Analytical Laboratories por el subsidio otorgado que consistió en trabajos analíticos en muestras de la tesis.

Al Dr. Erich Peterson y familia por su hospitalidad durante mi estadía en Salt Lake City (USA) y también por su ayuda en la obtención de análisis puntuales de minerales en la Microsonda de electrones de la Universidad de Utah, U.S.A.

A David Lentz y Douglas Hall por haber realizado fotografías de Cátodoluminiscencia en muestras de venillas de cuarzo del Proyecto Altar, que fueron de gran utilidad para la tesis.

A la geóloga Melisse Henry por su amistad y por la ayuda que me brindo durante las tareas de muestreo de testigos de perforación.

A los Dres. Víctor Valencia y George Gehrels (Universidad de Arizona, U.S.A) y Richard Friedman (Universidad de British Columbia, Canadá) por su colaboración con la preparación de muestras y análisis de LA-ICP-MS en circones para obtener edades U-Pb.

Al Dr. Luis Dimieri por sus consejos en el análisis de las estructuras del Proyecto.

Al geólogo Luiz García por su ayuda y por hacerme escuchar buena música durante la obtención de los análisis de microsonda electrónica de la UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

A Martín Di Luca por su ayuda con el envío y traslado de muestras de roca a laboratorios en el exterior, y entre Bahía Blanca y Neuquén. Por la colaboración con tareas de escaneo de testigos de los sondajes y ayuda con la impresión final de la tesis.

A mis colegas y amigos del Grupo Patagónico de Estudios Metalogenéticos y del CIMAR de la Universidad Nacional del Comahue, que desde un primer momento me recibieron con los brazos abiertos y me hicieron sentir como en casa.

A mis colegas y amigos de la Universidad Nacional del Sur por las charlas compartidas, mates y consejos.

Un agradecimiento muy especial a mis padres Coco y Lily por darme todo su apoyo en cada cosa que hago, por comprenderme y por quererme hasta el infinito.

A mis amigas geológicas Meli, Flor, Noe, Tay, Brendust y Belu por las charlas filosóficas, salidas, mates y música compartida y a mis amigas Julita, Marian, Flor, Maris, Caro y Sabi por su apoyo y cariño.

Especialmente a mi novio Martín por estar siempre y ser mi compañero en todo, por darme fuerzas para seguir adelante en los momentos difíciles y por ayudarme a ver siempre el lado positivo de las cosas.

A todos gracias !!

RESUMEN

Altar (31° 29'S, 70° 28'O) es un pórfido de Cu-(Au-Mo) con vetas epitermales de Au-(Ag-Cu) (802 mT, 0,42% Cu y 0,059 g/t Au “*cutt-off*” 0,30% Cu equivalente) ubicado en la Cordillera Principal de la provincia de San Juan.

Las zonas de alteración y mineralización están centradas en una serie de intrusivos subvolcánicos, agrupados en la Suite Subvolcánica Superior (SSS), que intruyen a las rocas volcánicas del Complejo Volcánico Inferior (CVI). El CVI forma parte de un arco magmático del Mioceno temprano (21,6-20,8 Ma) emplazado sobre una zona de subducción normal cuyos magmas experimentaron procesos de cristalización fraccionada y contaminación cortical. La SSS representa un arco magmático del Mioceno medio-tardío (11,75-8,9 Ma) emplazado sobre una zona de subducción somera. La ausencia de magmatismo entre ~20 y 12 Ma se correlaciona con un período de aumento de compresión en la corteza en el que magmas, oxidados y con alto contenido de agua, evolucionaron mediante procesos tipo MASH en cámaras magmáticas profundas. El desarrollo y ascenso de los magmas de la SSS coincidió con la subducción de la dorsal de Juan Fernández por debajo de esta zona.

Una cámara magmática de larga vida (~3 Ma) alimentó a un pórfido pre-mineral (pórfido 1), tres pórfidos mineralizados (pórfidos 2, 3 y 4) asociados a brechas magmáticas e hidrotermales, y dos pórfidos y una brecha magmática post-minerales. Los tres intrusivos mineralizados aportaron fluidos hidrotermales en un intervalo de ~1,27 Ma y cada uno produjo una secuencia de alteraciones, mineralizaciones diseminada y en venillas que se repitió en el tiempo.

Las venillas más tempranas de biotita (1) fueron cortadas por venillas de cuarzo (2a) en la transición dúctil-frágil de las rocas. Éstas últimas fueron reabiertas y cortadas por venillas finas de calcopirita ± pirita ± Au (2b) que, junto con la mineralización diseminada en la alteración potásica, se correlacionan con el primer pulso de mineralización de Cu-Au. Un pulso posterior, en la transición potásica-fílica, introdujo Mo ± Cu en venillas de cuarzo ± molibdenita (3). Con el enfriamiento progresivo de los fluidos, las rocas fueron afectadas por las alteraciones clorítica y fílica. Venillas de paredes rectas y halos fílicos (5) cortaron a las previas y entre ellas, sólo la variedad más profunda (5a con calcopirita) introdujo un débil pulso de Cu. Brechas magmática e hidrotermal con cemento de turmalina también se formaron durante la alteración fílica. Debido al alzamiento y denudación del terreno, venillas tardías con sulfosales de Cu + Au y salbandas de alteración argílica avanzada (6) (pulso de Cu-Au) cortaron a las mineralizaciones profundas e intermedias en el filo central (“*telescoping*”). Luego, esfalerita y galena (venillas 7) (pulso de Zn-Pb) rellenaron fracturas

tardías. El sexto estadio de mineralización de Cu consiste en el enriquecimiento supergénico de los sulfuros y sulfosales hipogénicos.

Las fluctuaciones de la presión y la temperatura, varios episodios de desmezcla de los fluidos y la disolución-precipitación de cuarzo en las venillas, son los procesos asociados a la precipitación de los sulfuros y sulfosales de Cu-Mo y Au.

ABSTRACT

Altar (31° 29' S, 70° 28' W) is a porphyry Cu-(Au-Mo) with epithermal Au-(Ag-Cu) veins (802 mT, 0.42% Cu and 0.059 g/t Au, “cutt-off” 0.30% Cu equivalent) located in the Cordillera Principal of San Juan Province.

The alteration and mineralization zones are centered on a series of subvolcanic intrusives, grouped in the Upper Subvolcanic Suite (USS), that intrude the volcanic rocks of the Lower Volcanic Complex (LVC). The LVC is part of an early Miocene magmatic arc (21.6 to 20.8 Ma) formed above a normal subduction zone whose magmas underwent fractional crystallization and crustal contamination. The USS represent a late-middle Miocene magmatic arc (11.75 to 8.9 Ma) formed above a shallow subduction zone. The lack of magmatism between ~20 and 12 Ma correlates with a period of increased compression in the crust where magmas, oxidised and with high water contents, evolved through MASH processes in deep magma chambers. The subduction of the Juan Fernández ridge below this area coincides with the development and rise of the magmas of the USS.

A long-lived magma chamber (~3 Ma) fed a pre-mineral porphyry (porphyry 1), three mineralized porphyries (porphyries 2, 3 and 4) associated with magmatic and hydrothermal breccias, and two post-mineral porphyries and a magmatic breccia. The three mineralized intrusives provided hydrothermal fluids in a period of ~1.27 Ma and each produced a sequence of alteration, disseminated mineralization and veinlets that were repeated in the time.

The earliest veinlets of biotite (1) were cut by quartz veins (2a) in the ductile-brittle transition of the rocks. The latter were reopened and cut by thin veinlets of chalcopyrite ± pyrite ± Au (2b) which, together with disseminated mineralization in the potassic alteration correlate with the first pulse of Cu-Au mineralization. A subsequent pulse, in the potassic-phyllitic transition, introduced Cu ± Mo in quartz ± molybdenite veinlets (3). With progressive cooling of the fluids, rocks were affected by chloritic and phyllic alterations. Straight-walled veins with phyllic halos (5) cut the previous veins and among them, only the deepest ones (5a with chalcopyrite) introduced a weak pulse of Cu. Magmatic breccias and hydrothermal tourmaline-cemented breccias were formed during phyllic alteration. Due to the uplift and denudation of the land, late veinlets with Cu + Au and advanced argillic alteration halos (6) (Cu-Au pulse) cut the deep and intermediate mineralization in the central ridge (“telescoping”). Then, sphalerite and galena (veins 7) (Zn-Pb pulse) filled late fractures. The sixth stage of Cu mineralization consists of the supergene enrichment of hypogene sulfides and sulfosalts.

Fluctuations in pressure and temperature, several episodes of fluid unmixing and dissolution-precipitation of quartz in the veins, are the processes associated with the precipitation of the Cu-Mo and Au sulfides and sulfosalts.

ÍNDICE

	Páginas
TOMO I	
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	6
ABSTRACT	8
CAPÍTULO I	
Presentación, Antecedentes y Objetivos	13
Introducción	14
Ubicación	14
Historia de la Exploración del Proyecto	15
Objetivo General	16
Objetivos Específicos	16
CAPÍTULO II	
Geología Regional y Procesamiento Digital de Imágenes Satelitales	19
Introducción	20
Metodología	20
Geología Regional	21
Resultados	22
Conclusiones	26
CAPÍTULO III	
Geología y Petrología de las Rocas Ígneas Miocenas en la región de Altar, Cordillera Principal del suroeste de San Juan. Modelo Geodinámico en el Contexto del Segmento Andino de Subducción Horizontal y Metalogénesis	28
Introducción	29
Contexto Tectónico	30
Metodología	32
Modo de Yacencia y Petrografía de Rocas Ígneas	35
Geocronología	44
Geoquímica de Rocas Ígneas	45
Discusión	58
Conclusiones	69
CAPÍTULO IV	

Geoquímica, Isótopos de Sr-Nd-Pb y Edades U-Pb de los Intrusivos asociados al Pórfido de Cu-(Au-Mo) y a las Vetas Epitermales de Au-(Ag-Cu) en Altar. Evolución Magmática y Mineralización	82
Introducción	83
Metodología	84
Contexto Tectónico	86
Geología Local	87
Descripción de los Cuerpos Ígneos	89
Geocronología	98
Geoquímica	99
Isótopos de Sr-Nd-Pb	102
Discusión	102
Conclusiones	117

TOMO II

CAPÍTULO V

Alteraciones, Mineralizaciones y Geoquímica del Pórfido de Cu (Au-Mo) y de las Vetas Epitermales de Au (Ag-Cu) en el Distrito Altar	140
Introducción	141
Metodología	142
Geología de las Secciones Analizadas	146
Alteración Hidrotermal, Mineralización y Tipos de Venillas	150
Geoquímica de Cobre, Molibdeno, Oro, Arsénico, Zinc y Plomo	189
Discusión	196
Conclusiones	217

CAPÍTULO VI

Química Mineral. Asociaciones Minerales en Equilibrio	232
Introducción	233
Metodología	233
Composición Química de los Minerales Hidrotermales	234
Discusión	260
Conclusiones	272

CAPÍTULO VII

Estudio de las Inclusiones Fluidas	296
Introducción	297
Metodología	297
Resultados	300
Discusión	312
Conclusiones	317

CAPÍTULO VIII

Conclusiones	333
---------------------	-----