



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MUSEO**

**INSTITUTO DE RECURSOS MINERALES**

---

**TESIS DOCTORAL**

**Geología y Mineralizaciones del sector  
sudoccidental del Macizo del Deseado,  
Santa Cruz**

**Lic. REMIGIO RUIZ**

---

**Director:** Dr. Isidoro B. Schalamuk

**Co-Director:** Dr. Diego M. Guido

---

2012



Universidad Nacional de la Plata  
Facultad de Ciencias Naturales y Museo  
Instituto de Recursos Minerales  
2012



*Yo muy rara vez pienso utilizando palabras. Me viene una idea y después tal vez trate de expresarla en palabras.*

Albert Einstein.

---

---

---

---

## ÍNDICE

Índice.....	i
Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vii
Abstract.....	xiii
<b>1. <u>CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</u></b> .....	<b>1</b>
<u>1.1. Introducción al área de estudio</u>	3
<u>1.2. Estructura de la tesis doctoral. Definición de los objetivos generales y plan de trabajo</u>	3
1.2.1. Objetivos.	3
1.2.2. Plan de trabajo.	5
1.2.3. Estructura de la presente Tesis Doctoral.	6
<u>1.3. Área de estudio</u>	7
<u>1.4. Técnicas, metodología y estudios realizados</u>	8
1.4.1. Tareas de gabinete y de campo.	8
<i>Cartografía digital y procesamiento de imágenes satelitales.</i>	8
<i>Mapeo geológico regional y de detalle.</i>	10
1.4.2. Trabajos de laboratorio.	10
<i>Estudios petrográficos y calcográficos.</i>	10
<i>Geoquímica de roca.</i>	10
<i>Geoquímica de las estructuras mineralizadas.</i>	11
<i>Determinaciones geocronológicas.</i>	11
<i>Estudios de inclusiones fluidas.</i>	11
<i>Estudios de isótopos estables.</i>	12
<i>Estudio de microsonda electrónica.</i>	12
<b>2. <u>CAPÍTULO II - GEOLOGÍA</u></b> .....	<b>13</b>
<u>2.1. Introducción</u>	15
<u>2.2. Provincia Volcánica Jurásica Chon Aike (PVJCA)</u>	15
2.2.1. Provincias Ígneas Gigantes (LIP's): definición y características generales.	15

2.2.2. Origen, naturaleza y mecanismos de emplazamiento del magmatismo de la Provincia Volcánica Jurásica Chon Aike (PVJCA).	16
<b><u>2.3. Provincia Geológica Macizo del Deseado (MD)</u></b>	<b>20</b>
2.3.1. Introducción y marco geotectónico.	20
2.3.2. Marco geológico regional del Macizo del Deseado.	21
<b><u>2.4. Distrito Cerro Primero de Abril (DCPA)</u></b>	<b>25</b>
2.4.1. Introducción.	25
2.4.2. Marco geológico distrital.	26
2.4.3. Secuencia estratigráfica del Distrito Cerro Primero de Abril (DCPA).	29
2.4.3.1. Unidades Pre-Jurásicas.	29
2.4.3.2. Unidades Jurásicas.	29
2.4.3.3. Unidades Post-Jurásicas.	46
2.4.4. Caracterización geoquímica del vulcanismo jurásico en el Distrito Cerro Primero de Abril.	48
2.4.4.1. Introducción y metodología.	48
2.4.4.2. Resultados e Interpretación.	49
2.4.5. Geología estructural.	56
2.4.5.1. Marco estructural regional del Macizo del Deseado.	56
2.4.5.2. Marco estructural distrital - Metodología utilizada y resultados obtenidos.	58
2.4.6. Geocronología.	62
2.4.6.1. Introducción.	62
2.4.6.2. Resultados e interpretación.	62
<b>3. <u>CAPÍTULO III - METALOGÉNESIS</u></b> .....	<b>66</b>
<b><u>3.1. Introducción</u></b>	<b>68</b>
<b><u>3.2. Provincia Auroargentífera Deseado (PAD)</u></b>	<b>68</b>
<b><u>3.3. Distrito Cerro Primero de Abril: Distribución y caracterización de los sistemas mineralizados Wendy, Martha, Argenta y Malbec</u></b>	<b>71</b>
3.3.1. Introducción.	
3.3.2. Sistema Wendy.	73
3.3.2.1. Ubicación y características generales.	73
3.3.2.2. Distribución y características de las estructuras en las áreas Wendy Principal y Wendy Oeste.	73

3.3.2.3. Caracterización de la mineralización.	78
<i>a) Mineralogía y secuencia paragenética.</i>	78
<i>b) Microtermometría de minerales transparentes y semitransparentes.</i>	84
<i>c) Caracterización geoquímica.</i>	88
<i>d) Marco estructural: indicadores cinemáticos.</i>	90
<b>3.3.3. Sistema Argenta.</b>	<b>94</b>
3.3.3.1. Ubicación, distribución y características generales de las estructuras.	94
3.3.3.2. Caracterización de la mineralización.	101
<i>a) Mineralogía y secuencia paragenética.</i>	101
<i>b) Microtermometría de minerales transparentes y semitransparentes.</i>	105
<i>c) Caracterización geoquímica.</i>	106
<i>d) Marco estructural: indicadores cinemáticos.</i>	112
<b>3.3.4. Sistema Malbec.</b>	<b>114</b>
3.3.4.1. Ubicación, distribución y características generales de las estructuras.	114
3.3.4.2. Caracterización de la mineralización.	120
<i>a) Mineralogía y secuencia paragenética.</i>	120
<i>b) Microtermometría de minerales transparentes y semitransparentes.</i>	126
<i>c) Caracterización geoquímica.</i>	127
<i>d) Marco estructural: indicadores cinemáticos.</i>	131
<b><u>3.4. Depósitos de Hot Spring</u></b>	<b>135</b>
3.4.1. Generalidades de los depósitos de <i>Hot Spring</i> . Antecedentes en el Macizo del Deseado.	135
3.4.2. Distrito Cerro Primero de Abril. Ubicación y distribución espacial de los depósitos de <i>Hot Spring</i> y caracterización de las facies presentes.	135
<b><u>3.5. Caracterización isotópica de los fluidos hidrotermales en el Distrito Cerro Primero de Abril</u></b>	<b>139</b>
3.5.1. Isótopos estables de Oxígeno, Azufre y Carbono.	140
3.5.2. Isótopos inestables: geocronología $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ .	145
<b>4. <u>CAPÍTULO IV - DISCUSIONES Y CONCLUSIONES</u></b> .....	<b>146</b>
<b><u>Discusiones</u></b>	
<b><u>4.1. Marco geológico distrital</u></b>	<b>148</b>
4.1.1. Origen y naturaleza del magmatismo responsable del Complejo Volcánico Bahía Laura: Estilos eruptivos y edificios volcánicos reconocidos en el Distrito Cerro Primero de Abril.	148

4.1.2. La Caldera Cerro Primero de Abril. Evidencias y características termomecánicas del proceso de mezcla de magmas y sus implicancias en la generación y desarrollo del vulcanismo jurásico en el Distrito.	151
4.1.3. Relación entre el marco estructural regional y la ubicación, dimensiones y características de la caldera Cerro Primero de Abril.	160
<b><u>4.2. Marco metalogénico distrital</u></b>	<b>162</b>
4.2.1. El origen de los fluidos hidrotermales mineralizantes en el Distrito Cerro Primero de Abril: relación espacial, temporal y genética entre el magmatismo bimodal jurásico del CVBL y los diferentes depósitos epitermales reconocidos en el Distrito.	162
4.2.1.1. Localización de los depósitos epitermales y su relación espacio-temporal con el vulcanismo.	162
4.2.1.2. Génesis y evolución de los fluidos hidrotermales.	163
4.2.1.3. Origen y transporte de los metales.	164
4.2.1.4. Caracterización de las texturas minerales reconocidas: Interpretación e implicancia genéticas en las condiciones de precipitación de los fluidos hidrotermales.	166
4.2.2. Clasificación de la tipología y naturaleza de los sistemas mineralizados Wendy, Martha, Argenta y Malbec.	168
<b><u>Conclusiones</u></b>	
<b>5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u></b> .....	<b>180</b>
<b>6. <u>ANEXOS</u></b> .....	<b>198</b>
Anexo I - Mapa Geológico Distrital.	198
Anexo II - Análisis litofacial.	202
Anexo III - Análisis litogeoquímicos.	213
Anexo IV - Geocronología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .	237
Anexo V - Mapas metalogénicos.	273
Anexo VI - Isotopos estables.	281
Anexo VII - Química mineral.	291



## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de esta tesis involucró la invaluable ayuda y el constante apoyo de muchas personas, a las cuales les estaré siempre en deuda:

A mi Familia: mis padres, Mabel y Carlos y mis hermanos Candelaria y Federico, quienes confiaron en mí desde el primer día en que decidí encarar este camino, disfrutando cuando hubo logros y apoyándome en cada traspie. A mis abuelos Remigio, Nélica, Victoria y Cacho, mis Tías Graciela y Ana, mi madrina Carolina y mi ahijada Victoria, quienes siempre me apoyaron y estuvieron cuando los necesite. A Ximena Ríos, mi amor y compañera en estos años, por estar siempre presente compartiendo incondicionalmente las euforias y los altibajos que esta tesis me provocó.

A mi Codirector Diego Guido, quien siempre me motivó para lograr todos los objetivos que nos planteamos, incluso antes de comenzar esta tesis, dándome siempre la confianza que necesité. No solo me ha enseñado mucho sobre geología, también ha sido mi guía en la profesión y un gran amigo con el que conté a lo largo de esta tesis.

A mi Director Abel Schalamuk, quien me abrió afectuosamente las puertas del INREMI y me permitió desarrollarme y crecer como profesional.

A Gerardo N. Páez, con quien a lo largo de estos años fuimos desarrollando cada etapa de nuestras respectivas tesis, compartiendo no solo los viajes de campo y congresos, sino también mañanas y tardes completas en el microscopio, discutiendo y aprendiendo cada día algo nuevo de este brillante colega y amigo.

A mi Tía Elisa Cristina Ruiz, quien me orientó en los primeros momentos de mi carrera, motivando no solo mi interés por las ciencias naturales como profesora desde el colegio, sino también plantando la semilla de la curiosidad en la docencia, con la cual he cosechado tantas alegrías.

A mis amigos y amigas que la vida me ha regalado, con quienes he compartido fructíferas charlas que me han aportado buenas ideas para esta tesis, en especial a Sebastián Jovic, Nicolás Sandoval, Luciano López, Martín Muravchik, Florencia Gordon, María Eugenia Rodríguez y Leandro D'Elia. Muchas muchas gracias amigos!!

A la Universidad Nacional de La Plata quien me permitió seguir formándome de una manera libre, pública y gratuita, otorgándome además dos becas doctorales que fueron fundamentales para comenzar a desarrollar los trabajos de investigación.

Al CONICET, institución que me otorgó una beca doctoral que me permitió llevar adelante la finalización de esta tesis.

A Coeur Argentina S.R.L., empresa que gracias a su apoyo económico y logístico permitió realizar de una manera confortable todo los trabajos de campo; quiero destacar mi enorme gratitud a Alfredo Cruzat, Claudio Romo, Myriam Li, Dante Cussi, Guillermo Romero y Gerónimo Candela, quienes compartieron sus conocimientos del área en valiosas charlas sobre la geología y metalogénesis del Distrito.

A mis compañeros del INREMI, en especial a Miguel del Blanco por su invaluable ayuda en los estudios petro-calcográficos, a Adriana González por su colaboración en la parte gráfica, y a Marcela Penné y María José González, quienes fueron fundamentales en el desarrollo de las tareas administrativas y financieras.

A Francisco Javier Ríos, quien afectuosamente me abrió las puertas de su laboratorio, permitiéndome realizar todos los estudios de inclusiones fluidas. Además, estos análisis fueron posibles gracias al completo y desinteresado apoyo de Lucilia Ramos y Tatiana Lima, quienes además de ayudarme en el laboratorio me hicieron formar parte de sus vidas en mi estadía, disfrutando momentos que atesorare por el resto de mi vida. Muchas gracias también a todo el personal del CDTN en Belo Horizonte por el apoyo logístico.

A Clemente Recio por permitirme, de una manera generosa y desinteresada, realizar los análisis de isótopos estables en el Servicio General de Isótopos Estables de la Universidad de Salamanca, España. Un agradecimiento especial a Raquel Sáez Ayuso, Meggie Sotelo y Félix García por asistirme en la realización de los mismos.

A la *Society of Economic Geologist* (SEG), sociedad que me otorgó apoyo económico y logístico para asistir a conferencias y cursos de campo, permitiéndome además financiar los viajes y estadías en los laboratorios externos.

A Guido Borzi, Lucia Santucci y Érica Gómez por su inmensa colaboración en el procesamiento de la información estructural.

## RESUMEN

El Distrito Cerro Primero de Abril, área de estudio del presente trabajo de tesis doctoral, está localizada en el sector sudoccidental de la provincia geológica Macizo de Deseado. Esta provincia se caracteriza por la presencia de numerosas mineralizaciones de metales preciosos que se encuentran espacial, temporal y genéticamente relacionadas a un extenso magmatismo bimodal Jurásico perteneciente al Complejo Volcánico Bahía Laura (CVBL), no siendo claro el estilo, génesis y la ubicación de sus centros emisores.

La elección de esta región como zona de trabajo fue motivada por la presencia de características atípicas en las unidades geológicas, las cuales permitirían aportar respuestas sobre la naturaleza y características del vulcanismo del CVBL, sumado a la concentración de depósitos minerales y a un acotado conocimiento estratigráfico y estructural del sector sudoccidental del Macizo del Deseado. El objetivo fue construir un modelo geológico-metalogénico regional que pueda ser utilizado como marco de referencia para enfocar los trabajos exploratorios en zonas con características similares.

Los trabajos de investigación se realizaron en tres etapas consecutivas: una primer etapa enfocada en los trabajos de campo, una segunda concentrada en los trabajos gabinete y estudios de laboratorio y una tercer etapa interpretativa. Se realizó un mapeo geológico regional del Distrito a escala 1:20.000 con muestreo de las unidades geológicas, y un mapeo a escala 1:5.000 de las estructuras mineralizadas, con muestreo para los estudios mineralógicos, geoquímicos y de caracterización de los fluidos hidrotermales, compilándose toda la información obtenida en un Sistema de Información Geográfica (SIG), dándole a esta información un marco espacial claro y definido. Se realizaron estudios petrográficos, calcográficos, determinaciones lito-geoquímicas (mayoritarios, trazas y tierras raras), estudios termométricos en inclusiones fluidas, microsonda electrónica, determinaciones geocronológicas y análisis de isótopos estables, permitiendo caracterizar los diferentes pulsos mineralizantes, los minerales de mena y de ganga y las características del fluido hidrotermal.

La geología del Distrito Cerro Primero de Abril tiene como una característica relevante la presencia de abundantes unidades volcánicas pertenecientes al CVBL, las cuales llegan a cubrir un 83% de la superficie total. Este vulcanismo está enmarcado dentro de un gran evento volcánico de escala continental que generó la Provincia Volcánica Jurásica Chon Aike, en donde los procesos corticales de mezcla, asimilación, homogenización y almacenamiento (*MASH*) junto a los de cristalización fraccionada (CF) y asimilación cortical (AC), fueron de relevancia en la generación y evolución de este magmatismo jurásico.

A partir del estudio de las unidades volcánicas jurásicas se definieron siete episodios jurásicos principales (EI a EVII), cada uno de ellos representados por un grupo particular de rocas que reflejan, a su vez, los procesos magmáticos actuantes en el Distrito. Esta secuencia jurásica está conformada por el episodio I, integrado por los flujos lávicos del complejo andesítico (CA), el episodio II conformado por las ignimbritas de cristales riolíticas (ICRinf) y

dacíticas inferiores (ICDinf), el episodio III por las ignimbritas liticas (IL), el episodio IV por un complejo dómico dacítico (CD), seguido por el episodio V conformado nuevamente por ignimbritas de cristales dacíticas (ICDsup) y riolíticas superiores (ICRsup), luego el episodio VI generando un complejo riolítico (CR) conformado por diques, coladas y domos riolíticos con autobrechas asociadas, y finalmente el episodio VII integrado por depósitos de caída y tufitas (DT) junto con depósitos de megabrechas (MB).

Además, se reconoció un área extensa, de más de 130 km<sup>2</sup>, con depósitos de hot spring, muchos de los cuales muestran buenos niveles de preservación de sus texturas y estructuras primarias de composición carbonática (travertinos y estromatolitos), silíceo (sinter), o de reemplazo silíceo (jasperoides). Cinco facies fueron reconocidas en el área, mayormente en los sectores sur y noreste de la misma, y generalmente asociadas a los depósitos de tufitas arenosas de origen fluvio-lacustre.

En su conjunto, y desde el punto de vista geoquímico, las unidades jurásicas del CVBL se caracterizan por un magmatismo homogéneo conformado por rocas de composiciones intermedias a ácidas, perteneciente a una suite volcánica calcoalcalina, de medio a alto potasio y de naturaleza peraluminosa, con algunas unidades afectadas por procesos de metasomatismo potásico. Los resultados de la distribución de los elementos trazas y tierras raras reflejan una coherencia entre las composiciones de todas las unidades, lo que evidencia un magmatismo uniforme en el distrito, vinculado a un ambiente geotectónico de margen continental activo.

Todos estos eventos jurásicos se desarrollaron en un lapso temporal no mayor a los 5 ma, entre los 160,0±1,2 y los 156,3±0,7 ma, correspondiente al piso Oxfordiano del Jurásico superior, en un marco estructural frágil donde el rasgo más sobresaliente es un estilo dominado por bloques rígidos limitados por fallas. Se identificaron cuatro direcciones de fracturación, las dos principales con azimut N100°-120° y N140° (siendo además los lineamientos de mayor extensión) coincidente con las direcciones principales de fallamiento jurásico; y dos direcciones secundarias con azimut E-O y N-S a NNO-SSE.

Asociado a esta secuencia volcánica, se reconocieron cuatro áreas con depósitos hidrotermales mineralizados denominados Wendy, Martha, Argenta y Malbec, dispuestos con rumbo NO-SE y con un fuerte control estructural. Estos depósitos están formados por un conjunto de vetas, vetillas, stockworks y brechas hidrotermales compuestos mayormente por cuarzo, con texturas bandeadas, crustiformes, coliformes, cocardas, texturas en peine y pseudomorfos de calcita laminar, las cuales reflejan una génesis a partir de eventos multi-episódicos con sucesivas etapas de relleno de espacios abiertos.

El sistema Wendy corresponde a un depósito epitermal de naturaleza netamente argentífera, con una leve tendencia hacia los depósitos auro-argentíferos, y posee una mineralogía compleja formada por sulfosales de Ag-Sb-As y sulfuros de metales base. Los fluidos hidrotermales, al momento de su formación, poseían temperaturas en el rango 250°-300°C y salinidades del orden del 2% wt NaCl eq., precipitando en un marco estructural dominado por un régimen transtensivo caracterizado por una cinemática mixta de tipo normal-dextral.

El sistema Martha posee características similares a Wendy, siendo definido por Páez (2012) como un depósito epitermal con una mineralogía compleja de sulfosales de Ag y sulfuros de metales base que lo marcan como un depósito argentífero con oro y metales base asociados, originado a partir de soluciones cloruradas neutras a levemente alcalinas, con temperaturas de entre 215,5 y 316,5 °C, y salinidades de entre 0,53 y 3,55% *wf* NaCl eq., pero generado en un régimen transtensivo caracterizado por una cinemática mixta de tipo normal-sinestral.

Los sistemas Argenta y Malbec poseen una mineralogía sencilla dominada por los sulfuros de metales base, con un perfil geoquímico típico de los depósitos epitermales ricos en metales bases o Zn-Pb-Ag. Los fluidos que los generaron poseen temperaturas similares a los otros dos depósitos, con rangos entre los 190 y los 320 °C pero presentan una salinidad más alta que puede llegar a los 13,5% *wf* NaCl eq., y formados en un marco estructural de tipo transtensivo con una cinemática normal-dextral.

Al evaluar la geoquímica de las rocas que conforman esta secuencia estratigráfica, se observa que existen dos fuentes alimentadoras del vulcanismo jurásico que actuaron al mismo tiempo, e incluso interactuaron frecuentemente entre ellas. De acuerdo al modelo de evolución a través de procesos corticales (*MASH* y *CF+AC*) planteado para las rocas del CVBL, el origen de una de estas fuentes se correspondería con cámaras profundas y de características menos evolucionadas, con una composición química primordial básica a intermedia (basalto-andesita), mientras que la segunda correspondería a una fuente originada a partir de esta última, ascendiendo y generando cámaras más superficiales con magmas de características más evolucionadas (dacitas-riolitas).

Fue posible reconocer que los siete episodios principales jurásicos están reflejando fielmente la historia evolutiva que tuvieron estos dos grandes sistemas magmáticos, los cuales tuvieron, en un momento de su evolución, una gran interconexión que generó un evento volcánico muy particular en el cual se desarrolló una estructura de colapso tipo caldera, de aproximadamente 12 km de diámetro y de tipo *trap-door*, denominada “caldera Cerro Primero de Abril”.

En la etapa pre-caldera, desarrollada mientras los dos sistemas magmáticos funcionaban simultáneamente, se depositaron las rocas del primer episodio (CA), mientras la evolución natural de las cámaras superiores generaban un aumento de las fases gaseosas, en conjunto con los primeros eventos de conexión entre cámaras que producían la mezcla de ambos magmas y depositaban las ICRinf y ICDinf (EII); estas últimas con numerosas texturas de desequilibrio magmático.

La etapa sin-caldera comenzó en el momento que ocurrió una gran conexión entre las cámaras andesítica y riolítica, proceso que desencadenó un potente episodio piroclástico (EIII). Esta conexión entre cámaras permitió el ingreso de una cantidad subordinada de magma andesítico dentro de la cámara magmática ácida, promoviendo una violenta erupción que generó las Ignimbritas Líticas (IL), integradas por facies de intra y extracaldera, seguidas de un episodio lávico efusivo (EIV) que desarrolló un complejo dacítico (CD). Las evidencias petrográficas y geoquímicas encontradas en estas unidades sin-caldera, como la coexistencia en

una misma ignimbrita de dos tipos de fragmentos pumíceos composicional y texturalmente diferentes, y la presencia de abundantes texturas de desequilibrio magmático reflejando los procesos de *mixing* y *mingling* ocurridos, permiten confirmarlas como rocas generadas a partir de un evento volcánico desencadenado como consecuencia de la mezcla de dos magmas de composiciones contrastantes: un magma intermedio y uno ácido.

Culminando con la historia evolutiva de estas cámaras magmáticas, en la etapa post-caldera, se reinstala una actividad ignimbrítica de naturaleza similar a la observada durante la etapa pre-caldera, con la depositación de las ICDsup e ICRsup (EV). Posteriormente, y reflejando los estadios finales de la evolución de la caldera (EVI), se derraman las lavas y domos del complejo riolítico (CR) en la intersección entre el borde anular de la caldera y un lineamiento regional de rumbo N120°. Coronando esta secuencia se depositan unidades sedimentarias retrabajadas, evidenciando un período de calma en el vulcanismo que permitió el desarrollo de ambientes fluvio-lacustres (EVII).

De esta manera, la Caldera Cerro Primero de Abril constituye el primer ejemplo excepcionalmente bien preservado de una estructura de colapso tipo caldera para el Jurásico del Macizo del Deseado, y las características halladas en sus unidades litológicas permiten afirmar que este tipo de aparatos volcánicos jugaron un importante papel durante la evolución del CVBL.

Se reconoce una vinculación espacial, temporal y genética entre los depósitos hidrotermales y la caldera Cerro Primero de Abril, estando Martha y Malbec localizadas sobre el borde anular de la misma, mientras que Argenta está ubicada en su sector central. Además, se reconoció que las cámaras magmáticas que originaron las efusiones volcánicas no solo aportaron fluidos, sino que además contribuyeron con el calor necesario para poner en funcionamiento celdas hidrotermales circulantes a través de los sistemas de fallas y diaclasas regionales.

Por otro lado, se propone como fuente de origen de los metales preciosos (Au-Ag) y base (Pb-Zn-Cu) a los fluidos de derivación magmática provenientes de las cámaras más profundas, de naturaleza menos evolucionada y composiciones intermedias, siendo estos metales transportados en complejos clorurados a través de densas salmueras magmáticas, desde los magmas intermedios hacia los félsicos o directamente hacia el sistema hidrotermal superficial.

Estos fluidos hidrotermales que transportaban los metales sufrieron en su ascenso procesos de descompresión que desencadenaron eventos de ebullición, desestabilizando el equilibrio químico y provocando la precipitación de los minerales en pulsos sucesivos y continuos, desarrollando texturas de relleno de espacios abiertos a partir de fluidos de naturaleza inicialmente carbonáticas seguida de dos etapas, una primera con pulsos silíceos conformados por cuarzo cristalino y una segunda de calcedonia-ópalo.

De acuerdo a las características mineralógicas, texturales, geoquímicas y termométricas de cada depósito, se determinó la tipología hidrotermal a la cual pertenecen cada uno, clasificándose a Wendy y Martha como depósitos epitermales de sulfuración intermedia, de tipo ebullición profunda, mientras que los depósitos Argenta y Malbec corresponden a depósitos epitermales de baja sulfuración, ambos de tipo ebullición somera, presentando Argenta una tendencia al tipo

ebullición profunda.

Los resultados obtenidos en la definición del marco geológico y metalogénico de este sector del Macizo del Deseado no solo representa un valioso avance en el conocimiento de un área de gran interés, sino también en el entendimiento regional del vulcanismo del Complejo Bahía Laura y los procesos mineralizantes jurásicos de la Patagonia austral, permitiendo reconocer la enorme importancia que los mecanismos corticales de *MASH* y *CF+AC*, junto con los procesos de mezcla de magma, tuvieron en la generación, evolución y características petro-geoquímicas de las unidades del CVBL, aumentando no solo el conocimiento científico de esta región y su potencial geológico-metalogénico, sino también, aportando un modelo predictivo para una efectiva exploración de otras áreas del Macizo del Deseado con características similares.





## **ABSTRACT**

The Cerro Primero de Abril District, area of study of this doctoral thesis, is located at the southwestern portion of the Deseado Massif geological province. This province is characterized by the presence of numerous precious metal mineralizations which are spatially, temporally and genetically related to the extended Jurassic bimodal magmatism corresponding to the Bahia Laura volcanic complex (CVBL), even though it is still uncertain the style, origin and location of emission centers.

This region was selected as the PhD area considering the presence of atypical features in the geological units, which would provide answers about the nature and characteristics of CVBL volcanism, together with the concentration of mineral deposits and the limited stratigraphic and structural knowledge of the Deseado Massif southwestern sector. The objective was the development a regional geological metallogenic model that can be used as reference to orientate exploratory works in areas with similar characteristics.

The research works were done in three consecutive stages: a first stage focused on field work, a second one oriented to office works and laboratory studies and a third interpretative stage. The regional geological mapping was performed at scale 1:20,000 with sampling of the geological units, and a detail mapping of the mineralized structures at scale 1:5,000, with sampling for mineralogical and geochemical studies and characterization of hydrothermal fluids, compiling all the information in a Geographic information System (GIS), giving to this information a clearly and defined spatial framework. Petrography, chalcography, lithochemochemistry (major, trace and REE), fluid inclusions, electronic microprobe, geochronology and stable isotopes studies were performed in order to characterize the different mineralizing pulses, the ore and gangue minerals, and the general characteristics of the hydrothermal fluids.

The Cerro Primero de Abril District main geological feature is the presence of abundant volcanoclastic units belonging to CVBL, which cover up to 83% of the total area. This volcanism is part of a continental scale volcanic event that generated the Jurassic Chon Aike Volcanic Province, where the cortical processes of mixing, assimilation, storage and homogenization (MASH) in conjunction with the fractional crystallization (FC) and crustal assimilation (CA) were important in the generation and evolution of the Jurassic magmatism.

Considering the study of the Jurassic volcanoclastic units, seven main Jurassic events (E1 to EVII) were defined, each one of them represented by a particular group of rocks that reflect the magmatic processes that were developing at this District. The Jurassic sequence begins with the E1 episode, composed by lava flows from the andesitic complex (CA), followed by the EII episode which consists of lower crystal-rich dacitic (ICDinf) and rhyolitic (ICRinf) ignimbrites, a third episode (EIII) with development of lithic ignimbrites (IL), a fourth episode (EIV) represented by a dacitic complex (CD), followed again by another pyroclastic episode (EV) that deposited the upper dacitic (ICDsup) and rhyolitic crystal-rich ignimbrites (ICRsup), then the EVI episode generating a rhyolitic complex (CR) composed by dikes, lava flows and domes with

associated autobreccias, and finally the EVII episode composed by tuffites and fall deposits (TD), and megabreccia deposits (MB).

In addition, a big area (over 130 km<sup>2</sup>) with hot spring deposits was identified, many of which show well preserved primary textures and carbonate structures (travertine and stromatolites), silica structures (sinter) or siliceous replacement (jasperoids). Five facies were recognized in the District, mostly in the southern and northeast portion, usually associated with tuffite deposits from fluvio-lacustrine origin.

The Jurassic CVBL units are geochemically and in general characterized by an homogeneous magmatism composed by intermediate to acidic rocks, belonging to a calc-alkaline volcanic suite, medium to high potassium signature and peraluminous nature, with some units affected by potassium metasomatism processes. The distribution of trace and rare earth elements show a consistency between the compositions of all units, which shows an uniform magmatism for the district, linked to a tectonic environment of active continental margin.

All these Jurassic events took place in a period of less than 5 m.y., between  $160.0 \pm 1.2$  and  $156.3 \pm 0.7$  m, corresponding to the Oxfordian stage of the upper Jurassic, in a fragile structural setting where the most outstanding feature is a style dominated by rigid blocks limited by faults. Four fracturing directions were identified, the two main ones with N100°-120 ° and N140 ° azimuth, coincident with the main directions of Jurassic faulting, and two secondary directions: E-W and N-S to NNW-SSE.

Associated with this volcanic sequence, we recognized four areas with mineralized hydrothermal deposits denominated: Wendy, Martha, Argenta and Malbec, with NW-SE strike and a strong structural control. These deposits are formed by veins, veinlets, stockworks and hydrothermal breccias mainly composed by quartz, with banded, crustiform, colloform, comb and pseudomorphic (of original bladed carbonate) textures, which reflect a multi-episodic genesis with infill textures.

The Wendy system corresponds to an epithermal argentiferous deposit, with a slight tendency toward auro-argentiferous deposits, and has a complex mineralogy consisting of Ag-Sb-As sulfosalts and base metal sulfides. The hydrothermal fluids had temperatures in the range 250-300 °C and salinities of about 2% wt NaCl eq., formed in a transtensional structural setting characterized by a mixed normal-dextral kinematics.

The Martha system has similar characteristics to Wendy, it was defined by Páez (2012) as an epithermal deposit with a complex mineralogy of Ag sulfosalts and base metal sulfides that define this deposits like a silver-rich deposit with gold and base metals associated, and originated by a chloride neutral to slightly alkaline solution, with temperatures between 215.5 and 316.5 °C, and salinities between 0.53 and 3.55% wt NaCl eq., but generated in a regime characterized by a transtensional mixed sinistral-normal kinematics.

Argenta and Malbec systems have a simple mineralogy dominated by base metal sulfides with a typical geochemical profile of epithermal base metals-rich deposits or Pb-Zn-Ag. The fluids that generated them have similar temperatures to the other two previous systems, ranging

between 190 to 320 °C but exhibit the highest salinities, that can reach 13.5% wt NaCl eq., and formed in a transtensional structural setting characterized by a mixed normal-dextral kinematics.

Evaluating the geochemistry of the rocks from the Jurassic stratigraphic sequence, two sources were recognized for the Jurassic volcanism, acting at the same time and even frequently interacting between them. According to the evolution model through cortical processes (MASH and CF+AC) proposed for the CVBL rocks, the origin of these sources would correspond to less-evolved deep chambers with a primordial basic to intermediate chemical composition (basalt-andesite), while the other source was originated from the previous chambers, ascending and generating superficial more evolved magmas chambers (dacites-rhyolites).

It was possible to recognize that the seven Jurassic main episodes are related to the evolution history of the two large magmatic systems, which, at an specific moment of their evolution, had an important connection that generated a very particular volcanic event with the development of a 12 km in diameter trap-door caldera collapse structure, called "Cerro Primero de Abril caldera".

In the pre-caldera stage, developed while the two magmatic systems were working simultaneously, the first episode rocks (CA) were deposited, while the natural evolution of the upper chambers were generating an increase of the gas-rich phases, together with the first connection events between the chambers were producing a mixture of both magmas and forming the ICDinf and ICRinf (EII); the last one with numerous magmatic disequilibrium textures.

The syn-caldera stage began with a large connection between the andesitic and rhyolitic magma chambers, a process that triggered a powerful pyroclastic episode (EII). This connection between chambers allowed the injection of a subordinate amount of andesitic magma within the acidic chamber, producing a violent eruption that generated the Lithic Ignimbrites (IL), composed of intra and extracaldera facies, followed by effusive lava episode (EIV) which developed the dacitic complex (CD). The petrographic and geochemical evidences recognized in these syn-caldera units, like the coexistence of two types of compositional and texturally different pumice fragments in the ignimbrites, and the presence of abundant magmatic disequilibrium textures reflecting the occurrence of mixing and mingling processes, are in agreement to confirm that these rocks were generated from a volcanic event triggered by the magma mixture with contrasting compositions: an intermediate and an acidic magma.

In the final stage of the evolution history of these magma chambers, in the post-caldera stage, the ignimbritic activity was reinstated and they have similar characteristics than the pre-caldera stage ones, and with the deposition of the ICDsup and ICRsup (EV). Later, and reflecting the final stages of the evolution of the caldera structures (EVI), the rhyolitic lavas and dome complex (CR) were extruded at the intersection of the caldera ring fault and the N120° regional lineament. At the top of this sequence tuffites units were deposited, showing a quiet period for the volcanism on the region that allowed the development of fluvial-lacustrine environments (EVII).

The Cerro Primero de Abril caldera is the first example of an exceptionally well-preserved caldera collapse structure for the Jurassic of the Deseado Massif, and the characteristics observed in their lithological units are very important to recognize that these volcanic structures had a

relevant role in the evolution of the CVBL.

A spatial, temporal and genetic link between hydrothermal deposits and the Cerro Primero de Abril caldera was recognized, being Martha and Malbec located on the ring fault, while Argenta is located in the central sector. Furthermore, it was recognized that the magma chambers responsible for the volcanic eruption contributed not only with magmatic fluids, but also with the heat required to mobilize the hydrothermal cells that produced the fluid circulation throughout the regional faults and joints systems.

The source of the precious (Au-Ag) and base metals (Pb-Zn-Cu) is proposed to be the magmatic fluids from the deeper chambers, which are less evolved and intermediate composition, being those metals transported by chlorinated complex through dense magmatic brines from intermediate to felsic magmas, or directly to the surface hydrothermal system.

These hydrothermal fluids carrying the metals experienced decompression processes during the ascent that led to boiling, destabilizing the chemical balance and inducing precipitation of ore and gangue minerals in successive and continuous pulses, developing infill open spaces textures initially from carbonate-rich fluids followed by two siliceous-rich stages, the first with crystalline quartz and the second formed by chalcedony-opal.

According to the mineralogical, textural, geochemical and thermometric characteristics recognized in each deposits, their typologies were determined, and Wendy and Martha were classified as intermediate-sulfidation epithermal deposits, belonging to the deep-boiling type, while the Argenta and Malbec deposits correspond to low-sulfidation epithermal deposits, both belonging to the shallow-boiling type, showing Argenta a slight tendency toward deep-boiling type.

The geological and metallogenic framework defined for the southwestern portion of the Deseado Massif not only represents a valuable advance in the understanding of an area of great interest, but also in the regional understanding of the Bahia Laura Complex volcanism and the Jurassic mineralizing processes of southern Patagonia, allowing to recognize the enormous importance of crustal mechanisms of MASH and FC+CA, including the magma mixing process, had in the generation, evolution and the petro-geochemical features in the CVBL units, increasing not only the scientific knowledge and the geological-metallogenic potential of this region, but also providing a predictive model for an effective exploration of other areas with similar characteristics in the Deseado Massif.