

Capítulo 5:

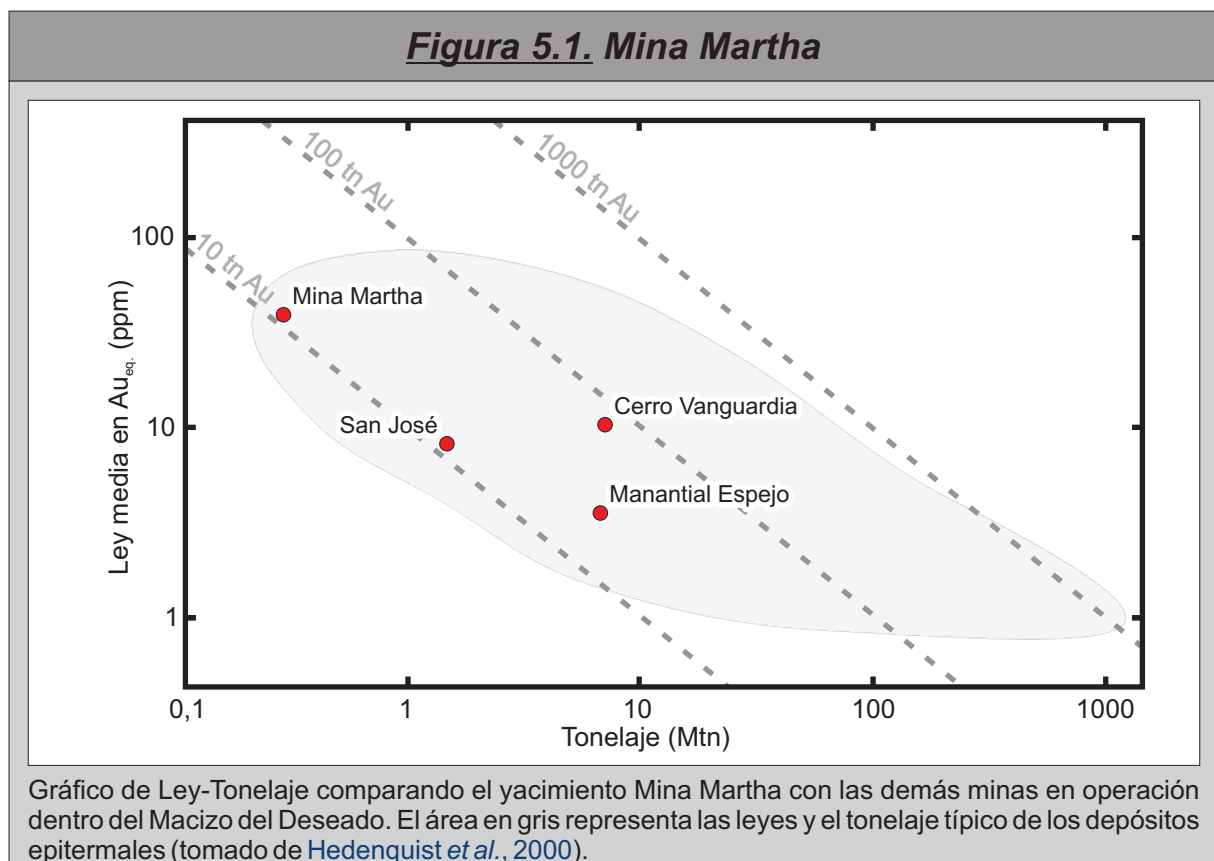
Conclusiones sobre el origen de la mineralización argentífera de Mina Martha, Macizo del Deseado, Argentina.

5.1. Introducción

A partir del descubrimiento de oro en el inicio de los 80' en las vetas de cuarzo del área del Cerro Vanguardia, se desarrolló, en el ámbito del Macizo del Deseado, una intensa actividad prospectiva que ha dado como resultado el descubrimiento de varios distritos vetiformes con presencia de metales preciosos (Schalamuk *et al.*, 2002). Actualmente, esta provincia, es una importante productora de Au-Ag con cuatro minas activas (Cerro Vanguardia, Martha, San José y Manantial Espejo) y es objeto de intensa exploración con más de 50 proyectos en distinto grado de desarrollo (e.g., Guido y Schalamuk, 2003; Echavarría *et al.*, 2005; Fernández *et al.*, 2008). Dentro de este marco, el yacimiento argentífero Mina Martha se ubica en el sector sudoccidental de esta provincia metalogénica, a unos 50 km al NE de la localidad santacruceña de Gobernador Gregores.

El yacimiento es propiedad de la empresa Coeur Argentina SRL, subsidiaria de Coeur d'Alene Mines Corporation, y está en explotación desde el año 2001 (Páez *et al.*, 2008). Desde el inicio de las actividades hasta finales de 2010, la mina produjo un total de 273.752 toneladas de mineral con leyes medias de 1.932 g/t Ag y 2,59 g/t Au, lo que equivale a un promedio de 34,8 g/t Au eq. (Páez *et al.*, 2008; Sims, 2010; Krebs y Wheeler, 2011). El bajo tonelaje y las elevadas leyes características de Mina Martha permiten definirlo como un depósito de tipo bonanza dentro del espectro de yacimientos actualmente en producción en el Macizo del Deseado (Figura 5.1).

En el presente capítulo se resumen y agrupan las principales observaciones que resultaron del



presente trabajo de tesis doctoral, con el fin de realizar una caracterización integral del yacimiento que permita entender los principales controles que se combinaron para dar origen a uno de los yacimientos de plata más ricos de Argentina.

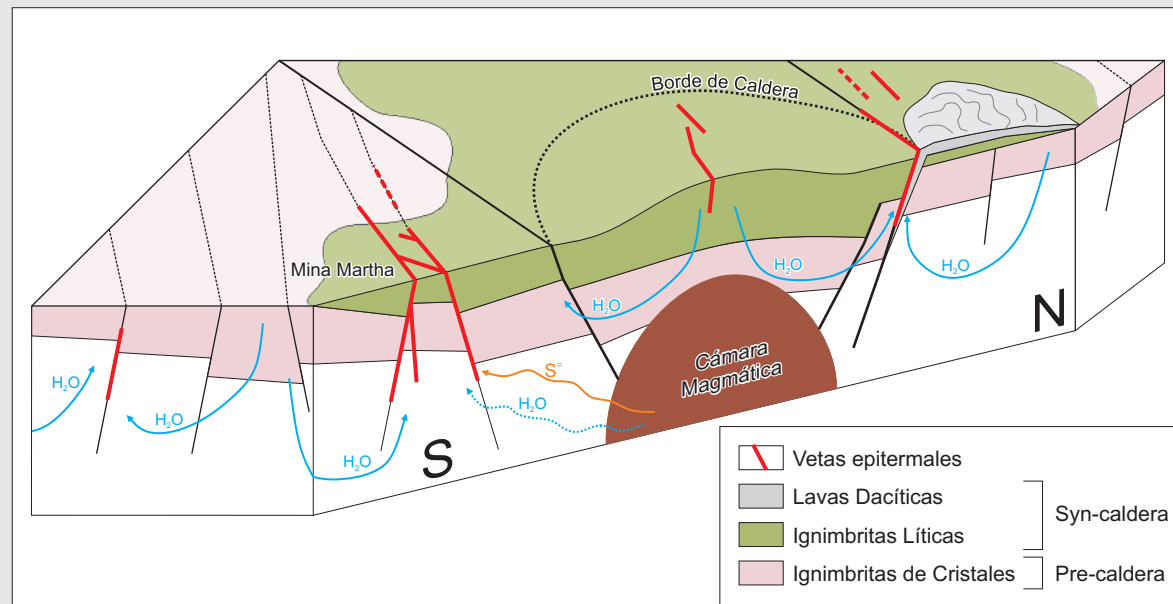
5.2. Características generales del yacimiento

Los principales aspectos que caracterizan al yacimiento Mina Martha son:

- La mineralización forma cuerpos vetiformes de hasta 5 m de espesor y varios cientos de metros de longitud (Figura 3.3), caracterizados por el desarrollo de texturas brechosas, bandeados costriformes, y texturas masivas con tamaños de grano medios a gruesos.
- Las vetas pueden ser divididas en tres sistemas de acuerdo a su orientación general (Figura 3.3): un conjunto de estructuras de orientación NO-SE denominado Sistema Martha-R4; un segundo conjunto paralelo al anterior hacia el norte, denominado Sistema Isabel; y un tercer conjunto de estructuras de orientación general E-O desarrollado entre ambos, y que ha sido denominado Sistema del Medio.
- Las vetas cortan una secuencia piroclástica de más de 500 m de espesor (Figura 2.5), caracterizada por un estilo de vulcanismo de tipo explosivo y naturaleza episódica.
- La signatura geoquímica de las vetas, cuya paragénesis de metales corresponde a Ag-Au-Cu-Pb-Zn-Sb-As, y su relación Ag/Au de alrededor de 900:1, permiten definir al yacimiento como un depósito netamente argentífero, con oro y metales base asociados (Figura 3.5).
- La mena está compuesta por una mineralogía compleja de sulfuros de metales base y sulfosales de plata y cobre, que se presentan en cantidades variables, pero que pueden superar el 20 % en volumen (Figura 3.8). Mientras que la mineralogía de la ganga es relativamente sencilla, está compuesta por adularia, cuarzo, sericita (illita), y que localmente puede presentar cantidades subordinadas de clorita (Figura 3.8).
- Los cuerpos mineralizados están rodeados por un halo de alteración restringido, compuesto principalmente por la asociación adularia, cuarzo, sericita (illita), esmectita y cantidades menores de clorita (Figura 3.30).
- La mineralogía de la ganga y las alteraciones, junto con los estudios de inclusiones fluidas, indican que la mineralización se habría 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 % NaCl eq. (Figura 3.23).
- El sistema geotermal que le dio origen a la mineralización estuvo activo durante el Jurásico Superior (156,5 ± 0,9 Ma, Oxfordiano).

5.3. Conclusiones sobre la evolución del magmatismo

Ruiz *et al.* (2008a y 2011) interpretan al distrito Cerro Primero de Abril como un importante centro volcánico Jurásico caracterizado por un aparato volcánico de colapso de tipo caldera. Dentro de este esquema, el área de Mina Martha se encuentra ubicada en el sector centro sur de este distrito, en las proximidades del borde sur de la fractura anular de la caldera (Figuras 2.3a y 3.2a).

Figura 5.2. Modelo geológico propuesto

Modelo geológico para el Distrito Primero de Abril mostrando la estructura de colapso tipo caldera y su relación con las mineralizaciones presentes en el área al momento del funcionamiento de las celdas hidrotermales. Basado en las observaciones de Ruiz *et al.* (2008a y b) y en los resultados del presente trabajo de tesis doctoral (Fuera de escala).

Todas las unidades volcánicas analizadas en el área de Mina Martha corresponden a rocas subalcalinas pertenecientes a la serie calcoalcalina, con alto potasio y naturaleza peraluminosa (Figura 2.18), características distintivas del volcanismo Jurásico del Grupo Bahía Laura (Pankhurst *et al.*, 1998).

El inicio del magmatismo del área de Mina Martha estuvo caracterizado por flujos ignimbríticos pertenecientes a las ignimbritas cristaloclásticas (Ignimbrita Dacítica Fina y de Cristales). Este vulcanismo inicial fue de naturaleza episódica, ya que luego de cada erupción le seguía una pausa que permitió la instalación de sistemas fluviales y lacustres con ecosistemas asociados (depósitos de Tobas y Tufitas). El vulcanismo pre-caldera ocurrió en el Jurásico Superior, más específicamente en el piso Oxfordiano, alrededor de los $157,6 \pm 1,0$ Ma (Figura 2.19).

En función de las características analizadas en el Capítulo 3, las Ignimbritas Lítica y "Dacítica" se pueden agrupar como pertenecientes a un mismo evento volcánico (el conjunto de las ignimbritas litoclásticas de Ruiz *et al.*, 2008a). El extraordinario volumen de estas unidades y la complejidad de los procesos que llevaron a su formación, evidencian su vinculación con un aparato volcánico de colapso tipo caldera, tal y como fue planteado por Ruiz *et al.* (2008a y 2011). Estas ignimbritas se habrían originado por la mezcla de dos magmas, uno intermedio y otro ácido, pertenecientes a las Formaciones Bajo Pobre y Chon Aike, mezcla que habría gatillado la erupción y la formación de la caldera. La edad del colapso de la caldera se ubica también en el Jurásico Superior, alrededor de los $156,9 \pm 0,7$ Ma, de acuerdo a las dataciones presentadas por Ruiz *et al.* (2011).

Luego de la erupción que originó a las ignimbritas litoclásticas, se vuelve al magmatismo "normal" para el distrito, es decir el desarrollo de otra ignimbrita perteneciente al conjunto de ignimbritas cristaloclásticas (Ignimbrita Morada), pero más evolucionadas. El evento post-caldera finaliza con la intrusión de un conjunto de diques y domos riolíticos que fueron datados alrededor de los $156,3 \pm 0,7$ Ma por Ruiz *et al.* (2011).

La cercana relación observada por Ruiz *et al.* (2008a y b) entre la caldera y los numerosos afloramientos de hot-spring observados en la región (Figura 2.3b), sumada a la similitud entre las edades de la caldera ($156,9 \pm 0,7$ Ma) y la mineralización ($156,5 \pm 0,9$ Ma), permiten interpretar que el motor térmico para los sistemas hidrotermales presentes en la región (incluyendo Mina Martha) habría sido la cámara magmática responsable del colapso de la caldera (Figura 5.2). En función de los resultados de los isótopos estables (Capítulo 3), este cuerpo ígneo habría aportado el azufre, parte de los metales y parte de las aguas que dieron origen a la mineralización argentífera de Mina Martha.

5.4. Conclusiones sobre la evolución del sistema y los fluidos hidrotermales

En función de la mineralogía y las texturas observadas, el esquema paragenético definido para el yacimiento (Capítulo 3) puede ser subdividido en tres grandes etapas que marcaron la evolución del depósito epitermal presente en Mina Martha, una etapa hidrotermal (episodios E1 a E3), una etapa tectónica (episodio E4), y una tercera etapa supergénica postmineral.

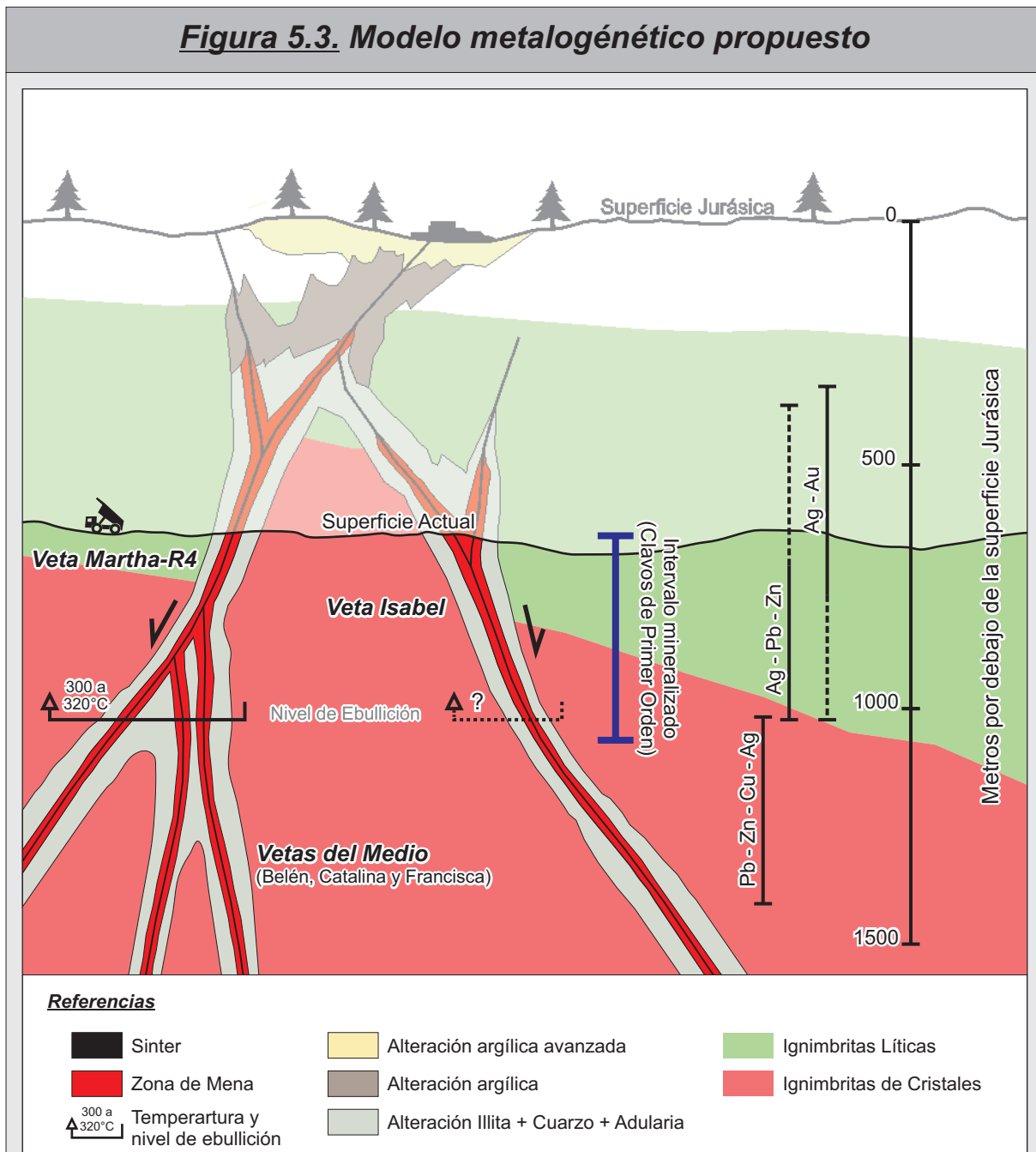
La evolución hidrotermal del yacimiento está dominada por una compleja asociación de sulfuros y sulfosales, a los que se asocian cantidades variables de plata nativa (Capítulo 3). El esquema paragenético de esta etapa se caracteriza por importantes variaciones en las proporciones relativas entre sulfuros y sulfosales (Capítulo 3). En líneas generales puede observarse una disminución progresiva en el contenido de sulfuros de metales base (Figura 3.29), que son reemplazados dentro de la paragénesis por una cantidad cada vez mayor de sulfosales de plata y cobre. Estos cambios en la mineralogía de la mena, son acompañados por un progresivo aumento en la participación del cuarzo y la adularia, que pasan de estar prácticamente ausentes al inicio, hasta hacerse dominantes hacia el final del evento hidrotermal (Figura 3.29).

La mineralización se habría originado a partir del ascenso de soluciones cloruradas reducidas, con pH neutro a levemente alcalino (Capítulo 3), caracterizadas por salinidades que oscilan entre 0,53 y 3,55 % NaCl eq. (Figura 3.24c), y temperaturas que evolucionaron siguiendo un patrón general de enfriamiento progresivo dentro del rango de 315 a 215°C (Figura 3.24b). Los análisis de isótopos estables indican una importante componente de origen meteórico en los fluidos, aunque se puede reconocer también un pequeño aporte de aguas magmáticas, especialmente en las primeras etapas de la evolución del sistema hidrotermal (Figura 5.2).

En Mina Martha (Figura 5.3), la presencia de abundante adularia en la ganga de casi todos los episodios hidrotermales estaría evidenciando un proceso sostenido de ebullición a lo largo de casi toda la evolución del sistema hidrotermal (Capítulo 3). Este proceso sería el responsable de la depositación de los metales y habría ocurrido a una profundidad mínima de alrededor de 800 m por debajo del paleo-nivel freático (Figura 5.3); adicionalmente, la presencia de variaciones en los hábitos de adularia, indican además la presencia de modificaciones en las condiciones de permeabilidad bajo las cuales ocurrió este proceso.

Por último, y en función de las observaciones realizadas en el Capítulo 3, se puede clasificar al yacimiento Mina Martha como un depósito epitermal de sulfuración intermedia (Hedenquist *et al.*, 2000; Einaudi *et al.*, 2003; Simmons *et al.*, 2005), perteneciente al subtipo de “ebullición profunda” (Albinson *et al.*, 2001; Figura 5.3).

Figura 5.3. Modelo metalogénético propuesto



Modelo metalogénético idealizado que explica las principales características observadas en Mina Martha. Basado en el modelo de "ebullición profunda" propuesto por *Albinson et al. (2001)*.

De esta manera, el desarrollo de un nivel de ebullición estable a lo largo de toda la vida del sistema hidrotermal, la profundidad a la que se desarrolló ese nivel (Capítulo 3), un conjunto de sucesivas variaciones en la permeabilidad producto de la dinámica de las fracturas que actuaron como canales para los fluidos (Capítulo 3 y 4), y la disponibilidad de metales en las soluciones, fueron los cuatro factores que se conjugaron para dar lugar a la formación de los sectores hidrotermales del yacimiento. Finalmente, los estudios de $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ permiten acotar el funcionamiento de este sistema al Oxfordiano ($156,5 \pm 0,9$ Ma).

Luego del evento hidrotermal la mineralización sufrió los efectos de un evento de deformación de tipo frágil vinculado a la reactivación tectónica de la zona de falla que contiene al sistema de vetas Martha-R4 (Episodio E4). El resultado de este evento fue el desarrollo de cuerpos irregulares de brechas de falla y cataclasitas foliadas que produjeron la removilización mecánica y química de los sulfuros y sulfosales formados anteriormente (Capítulo 3), contribuyendo de manera significativa en la formación de cuerpos

de alta ley dentro del sistema Martha-R4.

Esta etapa fue acompañada por una limitada circulación de fluidos, que ocurrió en forma concomitante con la deformación frágil (Capítulo 3). Los estudios de inclusiones fluidas muestran que estas soluciones fueron más concentradas que en la etapa hidrotermal (Figura 3.24c), alcanzando salinidades que rondan entre 7,73 y 9,98 % NaCl eq., y con temperaturas menores, que se encuentran entre los 139 y 168°C (Figura 3.24b). La falta de determinaciones de isótopos estables, sumada a la falta de una asociación de alteración propia de este episodio, impide la estimación de parámetros químicos adicionales para estas soluciones.

La edad del evento tectónico es bastante difícil de estimar dada la falta de fases minerales datables en los pulsos que lo constituyen. Sin embargo, el hecho que estas brechas sean previas al principal evento de fracturación post-mineral que disloca los cuerpos mineralizados (Capítulo 4), permite especular sobre una posible edad Jurásica Superior a Cretácica Inferior (post-Oxfordiana y pre-Aptiana; [Giacosa et al., 2010](#)) para este evento tectónico removilizante.

Finalmente, las partes más superficiales del yacimiento están dominadas por el desarrollo de una zona de oxidación de alrededor de 20 m de potencia que es seguida en profundidad por una pequeña zona de enriquecimiento supergénico de alrededor de 20 m de potencia (Figura 3.20a). Si bien el nivel de enriquecimiento tiene un desarrollo restringido dentro del yacimiento, los procesos supergénicos constituyeron un factor económicamente importante al incrementar las leyes de plata en las partes más someras del yacimiento (Capítulo 3).

Esta etapa fue el resultado del descenso de aguas meteóricas frías (menos de 40°C), de naturaleza ácida y oxidante ([Hedenquist et al., 2000](#); [Simmons et al., 2005](#)), que produjeron la destrucción de la mineralización en superficie y dieron origen a una zona de alteración rica en caolinita, plumbogummita y jarosita que se presenta sobreimpuesta al conjunto de alteraciones hipogénicas (Capítulo 3).

Con la etapa supergénica finalizan las modificaciones post-minerales registradas en Mina Martha; y si bien la edad de esta etapa es difícil de estimar, la cercana correlación existente entre la topografía actual y la geometría de la zona de oxidación permiten interpretar una edad Cuaternaria para este evento.

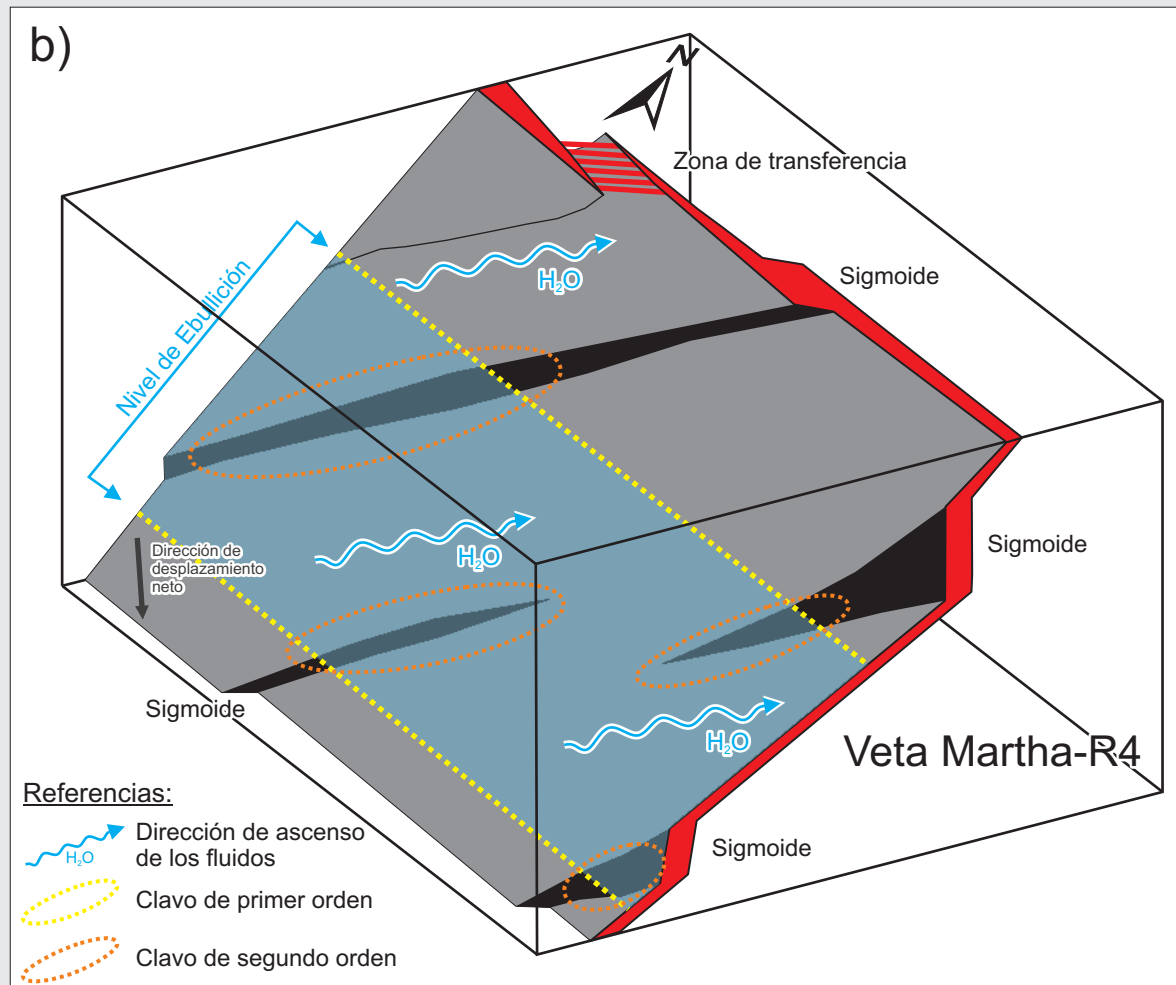
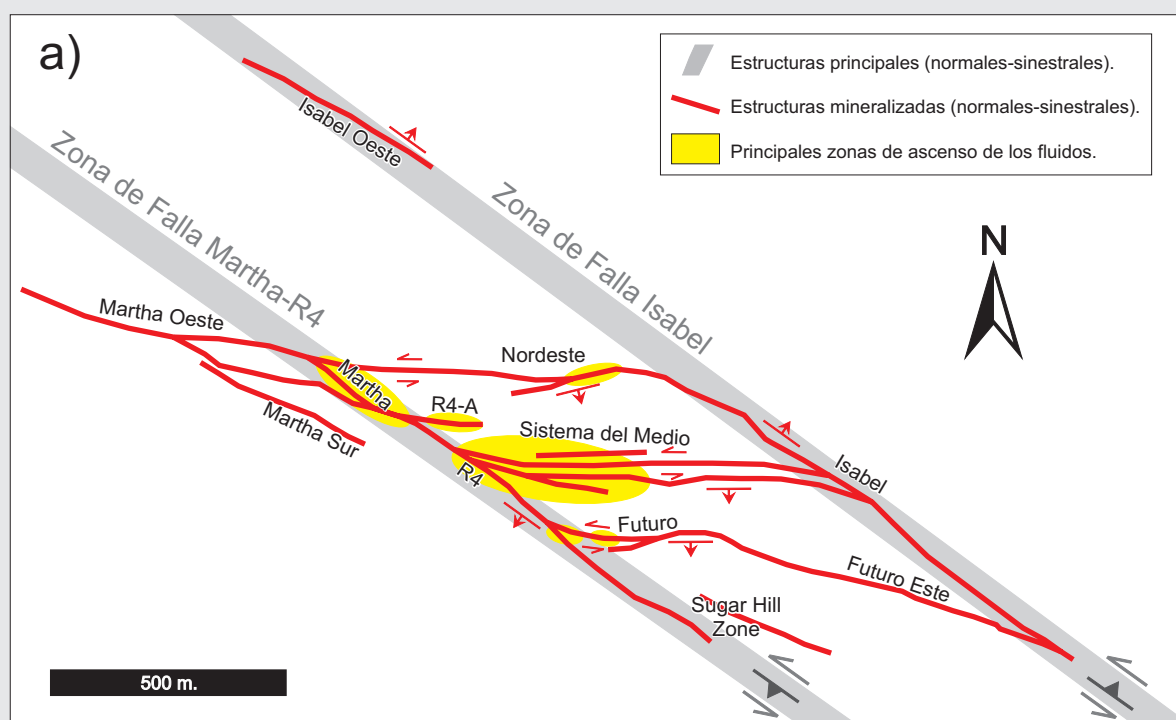
5.5. Conclusiones sobre los controles estructurales en la mineralización

El ambiente tectónico activo al momento del funcionamiento del sistema hidrotermal registrado en Mina Martha corresponde a un régimen transtensivo caracterizado por una cinemática mixta de tipo normal-sinistral (Capítulo 4). Dentro de este esquema, el Sistema del Medio se habría originado como parte de una zona de transferencia "dura" (*hard-linked*) durante la reactivación de dos zonas de falla de orientación NO-SE (Zona de Falla Martha-R4 y Zona de Falla Isabel, ver Figura 5.4a).

La estructuración de la región jugó un papel fundamental en la consolidación de los clavos mineralizados presentes en el yacimiento, controlando la ubicación de las zonas de ascenso de las soluciones hidrotermales (Capítulo 4). De esta manera, los fluidos hidrotermales se concentraron en zonas de transferencia desarrolladas entre fallas de rumbo NO (Sistemas Martha-R4 e Isabel), y dentro de estas zonas aprovecharon las intersecciones entre las diferentes estructuras para canalizar y concentrar el pasaje de los fluidos mineralizantes (Figura 5.4a).

La estructura (Capítulo 4) y las características fisicoquímicas del sistema hidrotermal (Capítulo 3) se

Figura 5.4. Modelo estructural propuesto



Modelo estructural para Mina Martha. a) Esquema idealizado del yacimiento mostrando una integración de las estructuras mineralizadas y su vinculación con los canales de ascenso de los fluidos. b) Modelo idealizado de la veta Martha-R4, mostrando la geometría de la veta, los canales de ascenso de los fluidos, la posición del nivel de ebullición, y su relación con los distintos órdenes de clavos mineralizados reconocidos (ver Figuras 4.17 y 4.18 para su comparación).

combinaron para determinar la geometría final de los clavos mineralizados del yacimiento. De esta manera, el desarrollo de una zona o nivel de ebullición de entre 100 y 150 m de espesor condicionó la formación de los clavos de primer orden (Figura 5.4b). Dentro de este nivel, los fluidos ascendentes aprovecharon zonas de apertura localizada, como los sigmoides, para canalizar y concentrar aún más las soluciones (Figura 5.4b), y dar origen de esa manera a los sectores de mayor ley dentro del yacimiento (clavos de segundo orden). Por último, los eventos post-mineralización de fallamiento produjeron el desplazamiento y la segmentación de los cuerpos mineralizados, dándole el aspecto actual.

5.6. Consideraciones finales

Mina Martha representa un yacimiento de tipo bonanza dentro del espectro de yacimientos epitermales actualmente en explotación en el Macizo del Deseado, y sus características únicas permiten separarlo del resto de los yacimientos que caracterizan a la región.

Desde el punto de vista volcánico, el desarrollo de una caldera de 12 km de diámetro, y su cámara magmática asociada, constituyeron un factor metalogénico fundamental para el desarrollo de la mineralización. Este aparato volcánico no solo aportó la temperatura para poner en funcionamiento las celdas hidrotermales, sino que también contribuyó con el aporte de metales, azufre y parte del agua necesaria para la formación de la mineralización.

Desde el punto de vista estructural, la tectónica extensional activa al momento de la formación de las vetas aportó los canales necesarios para la circulación y el ascenso de las soluciones hidrotermales. La geometría y cinemática de las fallas que canalizaron el ascenso de estos fluidos, llevaron a una efectiva focalización y concentración de las soluciones hidrotermales que favoreció la formación de clavos mineralizados de muy alta ley.

Por último, el desarrollo de un nivel de ebullición profundo y estable a lo largo del tiempo, fue el factor metalogénico principal a la hora de controlar la depositación de la paragénesis argentífera característica del depósito. Finalmente, los procesos posteriores de removilización tectónica y supergénica terminaron de darle forma a los clavos mineralizados de mayor ley dentro del yacimiento.

De esta manera, los elevados contenidos de plata reconocidos en Mina Martha son el resultado de una combinación única de factores volcanológicos, estructurales y metalogénicos que se conjugaron para dar lugar a la formación del primer depósito epitermal de sulfuración intermedia registrado en el Macizo del Deseado.

5.7. Referencias

- ALBINSON, T., NORMAN, D.I., COLE, D., CHOMIAK, B., 2001, Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data. Society of Economic Geologists Special Publication 8: 1–32.
- ECHAVARRÍA, L.E., SCHALAMUK, I.B.A., ETCHEVERRY, R.O., 2005. Geologic and tectonic setting of

Deseado Massif epithermal deposits, Argentina, based on El Dorado-Monserrat. *Journal of South American Earth Sciences* 19: 415-432.

- EINAUDI, M.T., HEDENQUIST, J.W., INAN, E.E., 2003. Sulfidation State of Fluids in Active and Extinct Hydrothermal Systems: Transitions from Porphyry to Epithermal Environments. Special Publication N°10: Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids. Society of Economic Geologists, pp 285-313.

- FERNÁNDEZ, R.R., BLESÁ, A., MOREIRA, P., ECHEVESTE, H., MYKIETIUK, K., ANDRADA DE PALOMERA, P., TESSONE M., 2008. Los depósitos de oro y plata vinculados al magmatismo jurásico de la Patagonia: revisión y perspectivas para la exploración. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63 (4): 665-681.
- GIACOSA, R., ZUBIA, M., SÁNCHEZ, M., ALLARD, J., 2010. Meso-Cenozoic tectonics of the southern Patagonian foreland: Structural evolution and implications for Au–Ag veins in the eastern Deseado Region (Santa Cruz, Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* 30, 134-150.
- GUIDO, D., SCHALAMUK, I., 2003. Genesis and exploration potential of epithermal deposits from the Deseado Massif, Argentinean Patagonia. En: Eliopoulos et al. (editores). *Mineral Exploration and Sustainable Development*. Balkema-Rotterdam, Vol I, 493-496.
- HEDENQUIST, J.W., ARRIBAS, A. R., Y GONZALEZ-URIEN, E., 2000. Exploration for Epithermal Gold Deposits. *Review in Economic Geology* 13: 245-277.
- KREBS, M.J., WHEELER, D.E., 2011. Coeur D'Alene Mines Corporation, Annual Report: Form K-10. 143 p. Available at: <http://www.sedar.com>
- PAEZ, G.N., RUIZ, R., GUIDO, D.M. y SCHALAMUK., I.B., 2008. Historia del Yacimiento Argentífero Mina Martha, Macizo Del Deseado, Santa Cruz. XVII Congreso Geológico Argentino. Actas (II): 661-662. Jujuy, Argentina.
- PANKHURST, R., LEAT, P., SRUOGA, P., RAPELA, C., MÁRQUEZ, M., STOREY, B., RILEY, T., 1998. The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica: a silicic large igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 81: 113-136.
- RUIZ, R., PÁEZ, G.N., GUIDO, D.M., SCHALAMUK., I.B., 2008a. Ambiente Volcánico y Mineralizaciones del Área Cerro 1ro de Abril, Sector Sudoccidental del Macizo del Deseado, Santa Cruz, Argentina. XVII Congreso Geológico Argentino. Actas (II): 897-898. Jujuy, Argentina.
- RUIZ, R., PAEZ, G.N., GUIDO, D.M., SCHALAMUK., I.B., 2008b. Extensas Manifestaciones de Hot Spring Asociadas al Centro Volcánico Jurásico del Área Cerro 1ro De Abril, Sector Sudoccidental del Macizo del Deseado, Santa Cruz, Argentina. XVII Congreso Geológico Argentino. Actas (II): 895-896. Jujuy, Argentina.
- RUIZ, R., PAEZ, G.N., GUIDO, D.M., JOVIC, S.M., SCHALAMUK., I.B., 2011. La caldera Cerro 1ro de Abril: evolución geológica e implicancias en el estilo eruptivo del volcanismo Jurásico del Macizo del Deseado. XVIII Congreso Geológico Argentino. Actas (CD-ROM). Neuquén, Argentina.
- SCHALAMUK I.B., DE BARRIO R., ZUBIA M., GENINI A., VALVANO J., 2002. Mineralizaciones auro-argentíferas del Macizo del Deseado y su encuadre metalogénico. En: Haller MJ (ed.) *Geología y recursos naturales de Santa Cruz*. Relatorio 15° Congreso Geológico Argentino: 679–713.
- SIMMONS, S.F.; WHITE, N.C., JOHN, D.A.; 2005, Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits, *Society of Economic Geologists, Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p. 485-522.
- SIMS, J., 2010. Martha Mine, Santa Cruz, Argentina: Technical Report. Informe técnico según norma NI43-101: 105 p. Disponible en: <http://www.sedar.com>.
- SILLITOE, R.H., HEDENQUIST, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits, in: Simmons, S.F., Graham, I. (Eds.), *Special Publication N°10: Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids*. Society of Economic Geologists, pp. 315-343.

