



Modelado geológico y geoquímico tridimensional de la veta Marta Norte, depósito Pingüino, Macizo del Deseado

Luciano LÓPEZ^{1,2}, Sebastián JOVIC^{1,2}, Bárbara LAPCAK³, Gerardo PÁEZ^{1,2} y Diego GUIDO^{1,2}

¹ Instituto de Recursos Minerales, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

³ Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata.

Email: lopezluciano@hotmail.com

Editor: lopezluciano@hotmail.com

Recibido: 30 de marzo de 2020

Aceptado: 17 de junio de 2020

RESUMEN

Marta Norte es una veta del depósito epitermal Pingüino ubicado en el Macizo del Deseado. Se generó un modelo implícito tridimensional de la litología, de las fallas y de la veta. Esta última se encuentra emplazada en unidades sedimentarias y piroclásticas de las Formaciones El Tranquilo y Roca Blanca de edad triásica tardía - jurásica temprana. En perforaciones se reconoció un cuerpo intrusivo de composición andesítica-basáltica. La veta tiene una orientación NNO, con una extensión en superficie de 700 m y está conformada por tres pulsos de relleno hidrotermal. Anomalías de Ag se presentan en tres clavos mineralizados donde los mayores tenores se encuentran en la zona de oxidación. Los valores de Au son bajos y exhiben una distribución espacial similar a la Ag. Los mayores contenidos de Cu se localizan al SE de la veta, próximos al intrusivo y zona de oxidación. El Pb y el Zn se presentan en las zonas más profundas y en las proximidades del cuerpo intrusivo. Los elementos rastreadores se distribuyen en la zona de oxidación; el Tl y el Hg muestran una amplia extensión lateral, mientras que el As y el Sb exhiben concentraciones anómalas por debajo del nivel de oxidación, en contacto con el sector norte del intrusivo. Los clavos mineralizados coinciden con las zonas de mayor apertura de la veta y con las menores inclinaciones. Las estructuras constituyeron el principal control geológico de los clavos mineralizados. Se propone al intrusivo andesítico-basáltico como la fuente de calor y metales de la veta Marta Norte.

Palabras clave: sulfuración intermedia, modelado implícito, distribución geoquímica, leapfrog.

ABSTRACT

Tridimensional geology and geochemistry model of Marta Norte vein, Pingüino deposit, Deseado Massif.

Marta Norte vein of the Pingüino epithermal deposit is located in the Deseado Massif of Argentina. In order to identify the main controls on the Ag concentration in the vein, a three-dimensional implicit model of the lithology, faults and the vein was generated. This vein is hosted in sedimentary and pyroclastic units of the Upper Triassic - Lower Jurassic El Tranquilo and Roca Blanca Formations. An intrusive body of basaltic-andesitic composition was recognized at depth. The vein has a NNW orientation, a surface extension of 700 m and was formed by three hydrothermal pulses. Silver anomalies are present in three ore shoots where the highest values are in the oxidation zone. The Au values are low and exhibit a spatial distribution similar to Ag. Copper shows its highest concentrations towards the SE sector of the vein, close to the intrusive and the oxidation zone. Lead and Zn are present in the deepest zones and close to the intrusive. The pathfinder elements are distributed within the oxidation zone, Tl and Hg show a wide lateral extension, while As and Sb show anomalous concentrations below the oxidation zone, in contact with the northern sector of the intrusive. Silver ore shoots corresponds to the zones with the greatest vein thicknesses and with the lowest slopes. Based on the geometries, relationships between the geologic bodies and the three-dimensional geochemical modeling of the vein, the main geologic control of the ore-shoots was structural. The basaltic-andesite intrusive is proposed as the source of heat and metals.

Keywords: intermediate sulfidation, implicit modelling, geochemical distribution, leapfrog

INTRODUCCIÓN

La visualización y el análisis de la información geológica, geofísica y geoquímica en 3D posibilita identificar relaciones entre estas fuentes de información que pueden ser difícilmente reconocidas en representaciones 2D, tales como mapas y perfiles geológicos (Apel 2006, Jackson 2010, Wang y Huang 2012). La generación de modelos tridimensionales de cuerpos mineralizados a partir de información de subsuelo ha sido siempre un desafío. Tradicionalmente, para resolver la geometría tridimensional de los cuerpos geológicos, se interpretaba la información de secciones bidimensionales y se asignaba a cada sección un área de influencia donde se integraba la información geológica disponible de superficie y de subsuelo. Esta información de cada sección era digitalizada y se generaban sólidos mediante la unión en 3D entre las secciones; esta técnica es conocida como modelado explícito (Cowan et al. 2003, Jessel et al. 2014). En los últimos años surgió una nueva aproximación para la creación de volúmenes geológicos tridimensionales denominada modelado implícito. Esta novedosa técnica permite la generación de representaciones espaciales de cuerpos litológicos, cuerpos mineralizados, concentraciones de elementos (*grade shells*) y tendencias estructurales integrando información de superficie y subsuelo (Apel 2006, Jackson 2010, Wang y Huang 2012), de forma rápida, a partir de parámetros matemáticos con mínima digitalización manual. De este modo se reducen sesgos y se obtiene un modelo dinámico debido a que la nueva información actualiza el modelo automáticamente. La simplificación en la generación de superficies permite abordar historias geológicas más complejas.

Los depósitos minerales presentan zonaciones mineralógicas y geoquímicas que varían de acuerdo con su tipología (Imamalipour y Mousavi 2018). El análisis de la distribución de elementos puede mostrar vectores que indiquen la localización de clavos mineralizados dentro del sistema (Jackson 2010). Asimismo, la generación de estos modelos permite lograr un acercamiento tridimensional al estudio de estos cuerpos, algo que posibilita definir controles geológicos que operan durante la precipitación de los metales en los depósitos minerales (Mao et al. 2020). También permite generar interpolaciones geoquímicas precisas utilizando criterios geostatísticos.

La veta Marta Norte del Proyecto Pingüino, ubicada en la provincia auroargentífera Deseado (Schalamuk et al. 1999) de la Patagonia, presenta una oportunidad excepcional para el modelado implícito de una veta epitermal de sulfuración intermedia (Jovic 2010) gracias a la disponibilidad de abun-

dante información geológica y geoquímica de superficie y de subsuelo.

El objetivo principal de este trabajo es generar un modelado tridimensional que contribuya al conocimiento de los controles litológicos, estructurales y geoquímicos que promovieron la generación de los clavos mineralizados y establecer una vectorización del contenido de metales.

MARCO GEOLÓGICO

Macizo del Deseado

El Macizo del Deseado se caracteriza por la presencia de depósitos epitermales del tipo baja a intermedia sulfuración. Con siete minas en producción (Cerro Vanguardia, San José, Manantial Espejo, Cerro Negro, Martha, Cerro Moro y Don Nicolas) y numerosos proyectos en avanzado estado de exploración, esta región es una importante productora de Au y Ag (3 millones de onzas Au y más de 40 millones de onzas de Ag; Páez et al. 2011).

En referencia a la estructuración del Macizo del Deseado, Giacosa et al. (2010) proponen la formación de una cuenca de *rift* a partir del Pérmico, con extensión aproximada E-O y aprovechando la estructuración cámbrica - devónica de orientación NNO. La depositación del Grupo La Golondrina (Pérmico) representa los depósitos de *sinrift*, mientras que el Grupo El Tranquilo (Triásico Medio a Tardío) y la Formación Roca Blanca (Jurásico Temprano) representan la etapa de *sag* de la cuenca. Posteriormente se desarrolla el magmatismo del Batolito de la Patagonia Central o Batolito Patagónico (Jurásico Temprano). En el Jurásico Medio el área del Deseado presentó un régimen cinemático extensional, caracterizado por extensión en dirección NE-SO, siendo las principales estructuras generadas fallas normales dextrales de rumbo ONO y NNE y fallas normales de orientación NO (Giacosa et al. 2010, Japas et al. 2013). Esta estructuración permitió el desarrollo del magmatismo calcoalcalino del Jurásico Medio a Tardío del Complejo volcánico Bahía Laura formado en un ambiente extensional de retroarco (Guido y Schalamuk 2003), el cual se encuentra vinculado genéticamente con las mineralizaciones epitermales de Au-Ag.

Los depósitos epitermales del Macizo del Deseado están caracterizados por mineralización en sistemas vetiformes, stockworks y brechas hidrotermales de cuarzo, calcedonia, carbonatos y sulfuros, con un rumbo general predominante NO (NNO-ONO) y N-S, NE-SO y E-O subordinados. A escala regional estos sistemas forman clusters o distritos constituidos por arreglos de vetas de hasta 200 km de extensión lineal

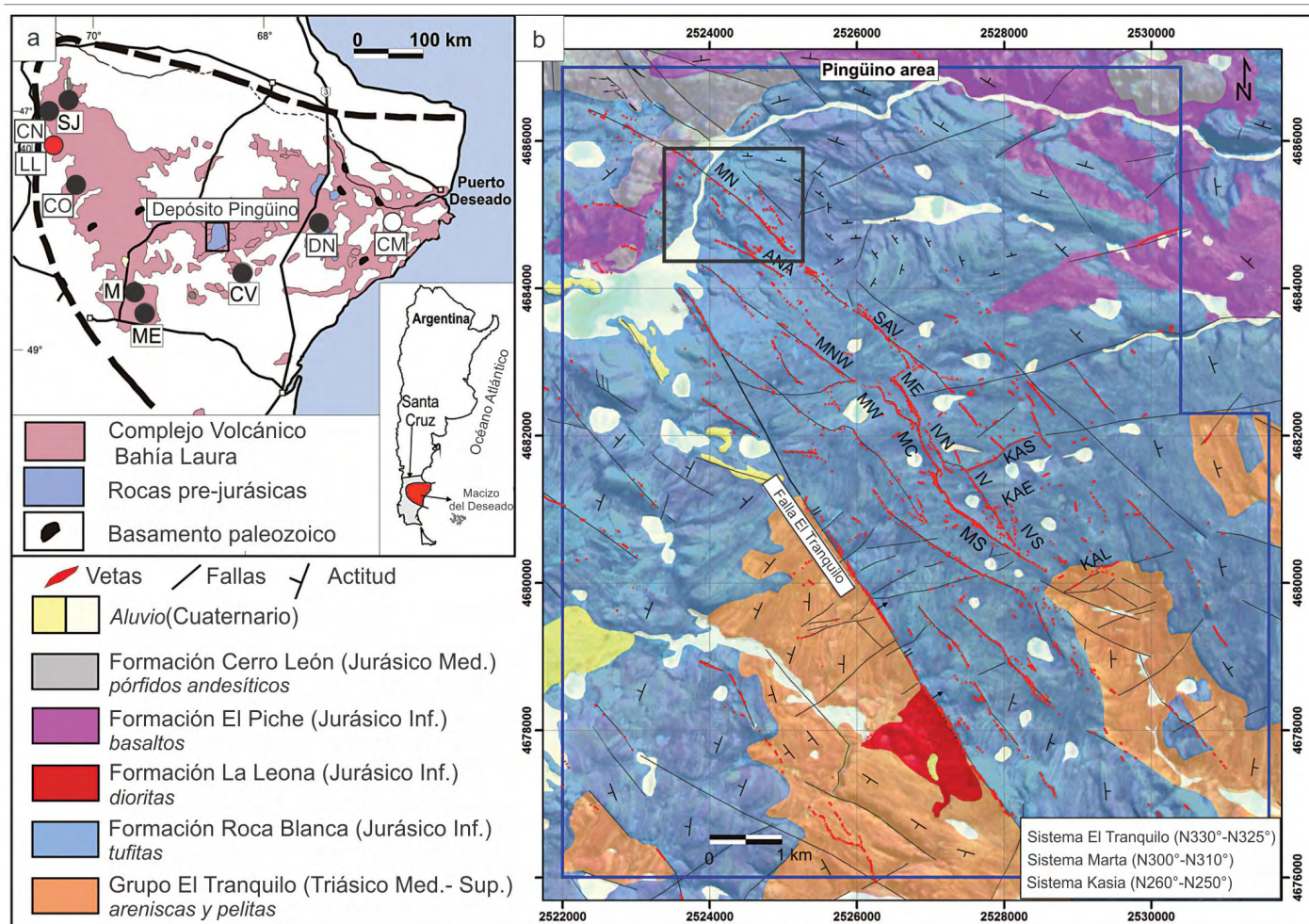


Figura 1. a) Mapa geológico simplificado del Macizo del Deseado que muestra la ubicación del depósito Pingüino y minas activas en círculos negros y no activas en círculos rojos (CV: Cerro Vanguardia, ME: Manantial Espejo, SJ: San José, CN: Cerro Negro, M: Mina Martha, CO: Cap Oeste, DN: Don Nicolás, CM: Cerro Moro, y LL: Lomada de Leiva); **b)** Mapa geológico y de mineralizaciones del depósito Pingüino tomado de Jovic (2010). Vetas: MN Marta Norte (Recuadro negro), ANA Ana, SAV Savary, MNW Marta Noroeste, ME Marta Este, MW Marta Oeste, MC Marta Centro, IVN Ivonne Norte, IV Ivonne Sur, KAS Kasia, MS Marta Sur, IVS Ivonne Sur, KAL Kalia.

(ej. Cerro Vanguardia) y con zonas de alta ley de hasta 600 g/t Au (ej. Cerro Negro, La Josefina) y 45000 g/t Ag (ej. Mina Martha). La posición geográfica y distribución espacial de los depósitos epitermales y geotermales asociados, los mapeos geológicos y estructurales regionales, y el análisis de imágenes satelitales, líneas sísmicas y datos aeromagnetométricos, muestran que estos distritos están asociados a lineamientos geológicos y magnéticos regionales de orientación ONO y NNO (Giacosa et al. 2010, Guido y Campbell 2011).

Geología del área

El depósito Pingüino se ubica en el sector central del Macizo del Deseado (Fig. 1a). El área está caracterizada por la presencia de rocas y unidades geológicas con escasa representación en el Macizo del Deseado, y representa una "ventana geológica" que permite el estudio del intervalo Triásico Tardío - Jurásico Temprano de una región donde el vulcanismo

del Jurásico Medio a Tardío es preponderante (Jovic 2010).

La secuencia estratigráfica (Fig. 1b) de este sector se inicia con las sedimentitas continentales, areniscas y conglomerados con intercalaciones de pelitas del Grupo El Tranquilo, del Triásico Medio a Tardío (Jalfin y Herbst 1995). Por encima yacen las rocas volcánicas de la Formación Roca Blanca del Jurásico Temprano. Esta es la litología más extendida en el área, compuesta por tufitas, areniscas y sabulitas ricas en componentes volcánicos (Herbst 1965). Las sedimentitas y tufitas continentales están intruidas por rocas del Jurásico Temprano, que se presentan como filones capa y diques dioríticos correspondientes a la Formación La Leona (Jovic 2010). Intercaladas dentro de las tufitas se reconocieron lavas basálticas de edad jurásica temprana definidas como Formación El Piche (Jovic 2010). Lacolitos y criptodomas de composición andesítica pertenecientes a la Formación Cerro León (Panza 1995) intruyen a la secuencia estratigráfica.

El Proyecto Pingüino

La provincia auroargentífera del Deseado (Schalamuk et al. 1999) se ubica en la provincia de Santa Cruz y representa uno de los principales productores de Au-Ag de la Argentina (Fig. 1a). Esta provincia metalogenética se caracteriza por la presencia de depósitos epitermales de baja e intermedia sulfuración de edad jurásica media a tardía (Schalamuk et al. 1999, Fernández et al. 2008).

La mineralización de Pingüino consta de un sistema de más de 70 vetas que incluye vetas polimetálicas de edad jurásica temprana, caracterizadas por una compleja mineralogía de sulfuros con In (Jovic et al. 2011) y vetas epitermales de sulfuración intermedia de edad jurásica media. Ambos tipos se alojan en fallas de rumbos NO, NNO y ENE, asociados a una estructura antiforme definida como un domamiento por intrusión (Peñalva et al. 2008). Las vetas polimetálicas se alojan en las fracturas de rumbo ENE, las epitermales de sulfuración intermedia en las fracturas de rumbo NO y en las estructuras NNO se encuentran ambos eventos de mineralización superpuestos (Jovic 2010).

Las vetas del proyecto Pingüino presentan una orientación general que varía desde 330° a 290° y rellenan fallas principales segmentadas y subparalelas con inclinaciones mayores de 60° , tanto al SO como al NE. Estos segmentos continuos tienen hasta 1 km de longitud y en sus terminaciones tienden a bifurcarse en estructuras menores o sistemas de fallas secundarias (*networks o stockworks*), generando estructuras de transferencia (*step-overs*) de la deformación a otro segmento continuo (Micklethwaite et al. 2015). Los segmentos continuos están rellenos por vetas que desarrollaron clavos mineralizados de ley alta a intermedia, con morfologías tabulares continuas de hasta 1,000 m de longitud, 16 m de espesor y hasta 400 m de profundidad. Las zonas de transferencia se caracterizan por formar sistemas de vetas secundarias y vetillas, con espesores totales menores de 2 m. Las texturas y la morfología de las vetas y clavos indican una deformación de tipo extensional. En algunos casos, las vetas cuarzo-argentíferas se emplazaron cortando a las vetas de sulfuros, generando así estructuras brechosas que muestran la superposición de los dos eventos mineralizantes en el mismo sistema de fallas (Jovic 2010).

La Veta Marta Norte

La veta Marta Norte (Fig. 2) es una estructura aflorante a subaflorante (Fig. 3a), con una corrida de 700 m, azimut 320° y una inclinación promedio de 70° al SO. Presenta dos ramas secundarias de orientación 300° e inclinación de alto ángulo (80° - 75°) al SO, que reciben la denominación de Rama Norte

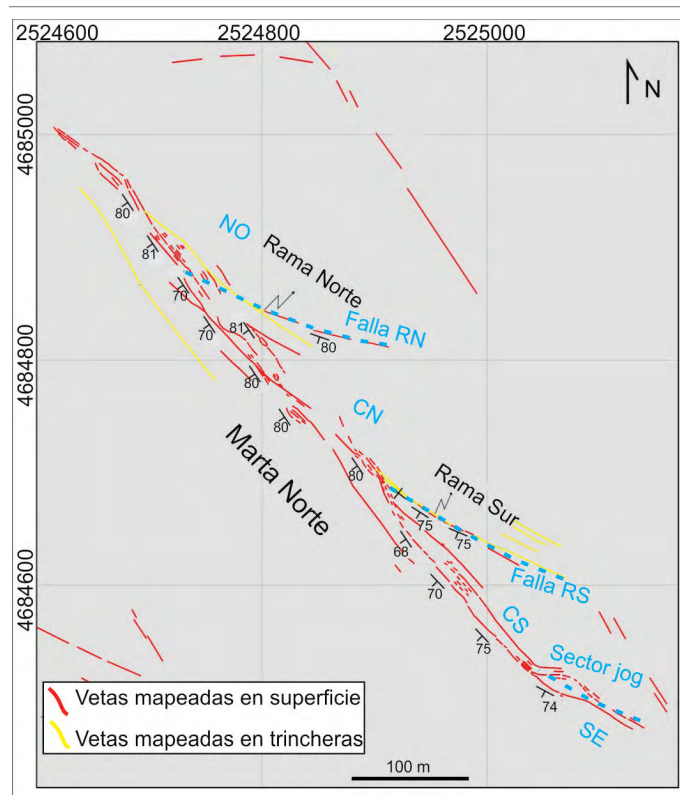


Figura 2. Mapa detallado de las mineralizaciones del sector de veta Marta Norte. La veta presenta cuatro segmentos limitados por las intersecciones con las fallas Rama Norte, Rama Sur y Sector Jog, los segmentos son NO (Noroeste), CN (Centro Norte), CS (Centro Sur), SE (Sureste).

y Rama Sur (Fig. 2). Estas vetas se alojan en fallas que reciben el mismo nombre y se ubican en el límite de los segmentos NO-CN y en el sector CS de la estructura principal.

El relleno hidrotermal de la veta está conformado por tres pulsos (Jovic 2010): a) pulso 1 de cuarzo gris fino con pirita, esfalerita, galena, minerales de Ag y Au nativo, con hasta un 20% de sulfuros en volumen (Fig. 3b); b) pulso 2 representado por bandeados coloformes de cuarzo, rodocrosita, siderita, caolinita y fluorita (Fig. 3c) y c) pulso 3 de cristales de cuarzo de hasta 15 cm de largo con textura en peine y también cementa los clastos de multibrechas con el desarrollo de pequeñas cavidades y geodas (Fig. 3d).

Tanto la geoquímica de suelos como la geoquímica de trincheras permitieron determinar importantes anomalías de Ag en el sector centro-sur de la veta. Sucesivas campañas geoelectricas detectaron tres anomalías de resistividad ubicadas una al sur, una en la zona central y la de mayor intensidad en el sector centro-norte de la veta. Estas anomalías coinciden espacialmente con tres importantes anomalías de cargabilidad, donde las de mayor intensidad se asocian a las de menor valor de resistividad (Fig. 4). Importantes valores de Ag, Cu, As, Sb, Hg y Pb se concentran en la anomalía central y en la anomalía sur. De acuerdo con Jovic (2010), esta veta

se formó a partir de fluidos con temperaturas comprendidas entre 307° y 179°C y salinidades que varían entre 0.54 y 6.52 % eq. en peso NaCl. Las composiciones isotópicas del O y del C de estos fluidos indican mezcla de aguas meteóricas con aguas magmáticas y los isótopos del S señalan un origen magmático para el S. La veta Marta Norte fue clasificada como una veta epitermal de sulfuración intermedia (Jovic 2010). Ristorcelli et al. (2013) realizaron una estimación de recursos indicados para la veta y se obtuvieron 566000 toneladas con 3099000 Oz de Ag y 3100 Oz de Au con una ley de corte de 50 g/t de Ag equivalente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el modelado 3D de la veta y para las interpolaciones de los valores de los elementos y sus relaciones, se utilizó el software Leapfrog Geo 4.3 (www.leapfrog3d.com). Es un programa pionero en el modelado de tipo implícito, que es capaz de generar modelos geológicos 3D directamente a partir de datos de perforaciones y afloramientos sin digitalización manual (Cowan et al. 2003, Bell et al. 2018). Esto lo diferencia del modelado explícito que se basa en la construcción de secciones 2D, usualmente verticales, donde la creación de mallas sólidas se genera mediante una red de triángulos que luego son unidos entre secciones. Para este trabajo se utilizaron mapas geológicos de las unidades litológicas y estructuras principales y de mineralización a mayor escala, en el que se ubicaron las vetas y *floats*. En cada una de éstas se ha realizado una descripción litológica, estructural, de alteración y tipo de mineralización. Se obtuvieron resultados geoquímicos de 2973 muestras procedentes de 52 pozos de diamantina, 5

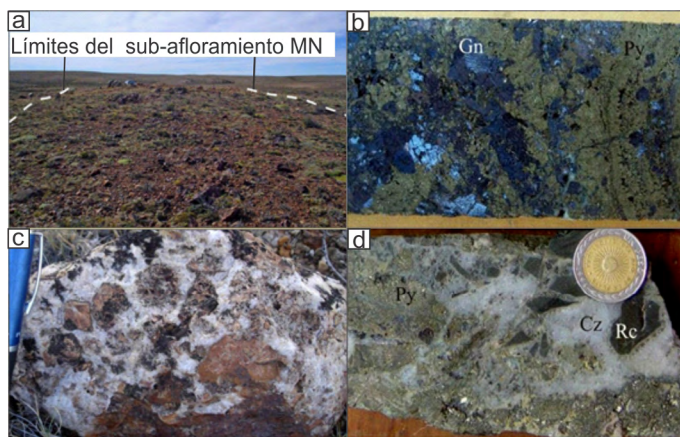


Figura 3. a) Afloramientos del sector de veta Marta Norte; b) Veta de sulfuros formada por pirita y galena; c) Brecha de cuarzo blanco cristalino a sacaroides con clastos de roca de caja; d) Brecha de cuarzo blanco cristalino con clastos de pirita y roca de caja. Referencias: Py (pirita), Gn (galena), Cz (cuarzo), Rc (roca de caja).

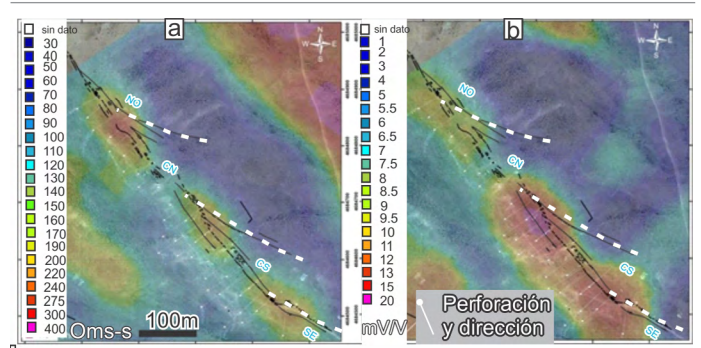


Figura 4. a) Mapa de isoresistividad; b) Mapa de isocargabilidad a nivel -75 m del sector de veta Marta Norte y ubicación de perforaciones.

pozos de RC y 32 trincheras (Ristorcelli et al. 2013). La información geofísica fue relevada a partir de perfiles geoelectrónicos perpendiculares al rumbo de la veta, con un largo de 600 m y una equidistancia de 200 m (Guido et al. 2009).

Geología y mineralizaciones

El modelado implícito permite la construcción de (iso) superficies 3D y sólidos que son definidos por una función matemática simple (función implícita), la cual es calculada por la interpolación espacial de datos numéricos (valores) y no numéricos (litología) (Vollger et al. 2013). Las mayores ventajas de este tipo de modelado es que permite una aproximación tridimensional a los datos, es un modelo repetible entre distintos intérpretes, puede ser dinámicamente actualizado y limita el sesgo de las interpretaciones 2D. Este modelo puede ser manipulado y refinado, pero es generado por algoritmos informáticos a partir de una combinación de datos medidos y la interpretación del usuario. Este enfoque es más rápido, flexible y adecuado para hacer modelos geológicos que el modelado explícito (Cowan et al. 2003).

Las descripciones litológicas, mineralógicas y los contenidos geoquímicos tabulados fueron importados para generar un modelo implícito 3D inicial basado exclusivamente en datos de pozos y datos de mapeo de superficie. La información geológica y geoquímica fue utilizada de la base de datos del Proyecto Pingüino. El modelado de las superficies *hangingwall* y *footwall* de la veta Marta Norte ha sido implícito, mediante selección manual de los interceptos correspondiente a las vetas. El contacto entre el Grupo El Tranquilo y la Formación Roca Blanca se asumió de tipo depositacional con una tendencia regional horizontal. El intrusivo de composición andesítico-basáltico se modeló con una tendencia isotrópica, ya que con los datos disponibles no es posible asignarle una tendencia estructural. Las vetas Rama Norte y Rama Sur fueron construidas con los datos del mapeo de superficie, utilizando polilíneas 3D y asumiendo las inclinaciones medidas en el campo.

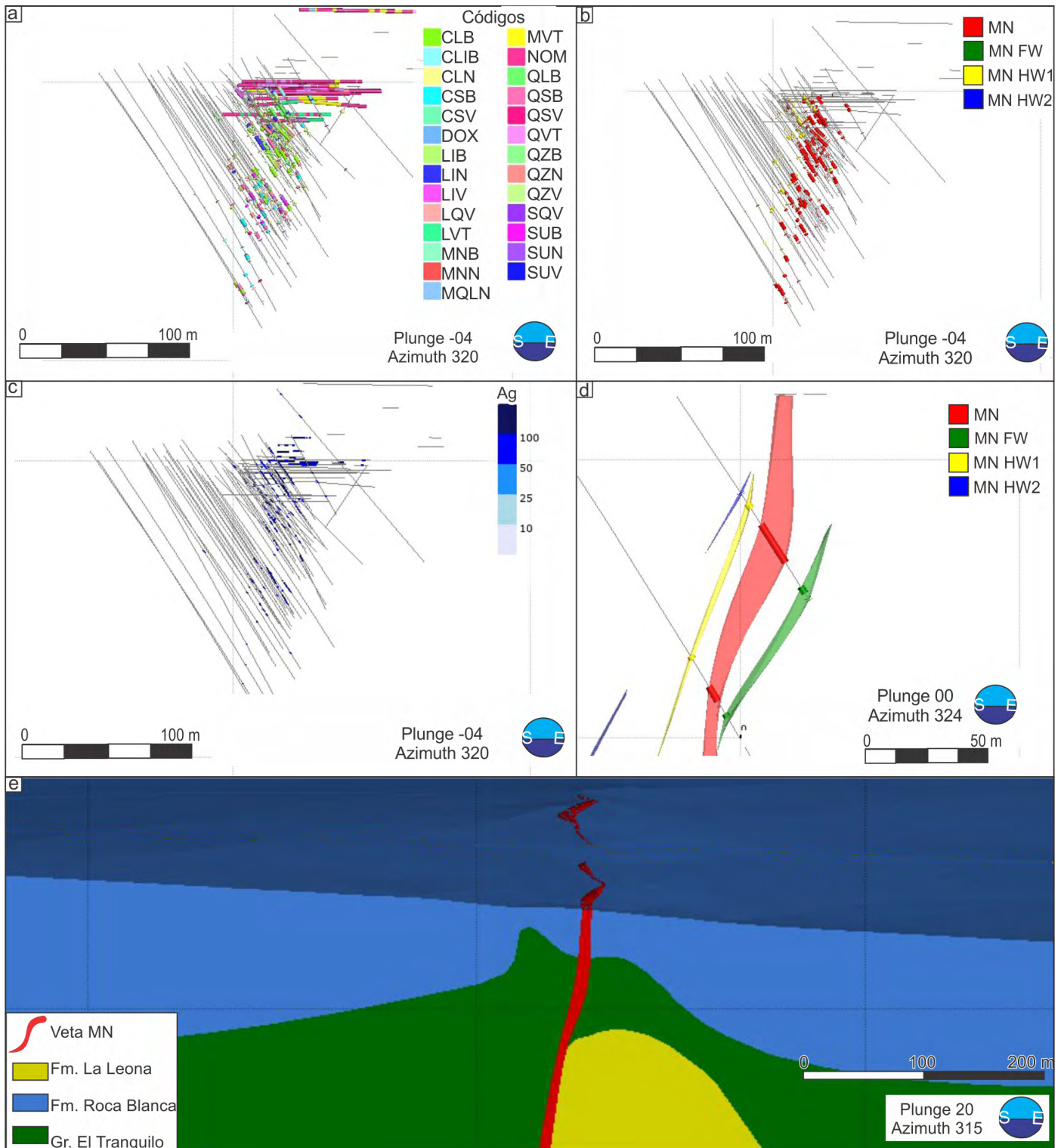


Figura 5. Flujo de trabajo para el modelado de la veta Marta Norte. a) Tramos mineralizados de la veta Marta Norte discriminados por la composición (arcillas, limonitas, óxidos de Mn, cuarzo y sulfuros) y por el tipo de mineralización (brechas, stockworks, vetas y vetillas) clasificadas en 27 clases; b) Simplificación de la mineralización y asignación de cada tramo a una rama de la veta Marta Norte. Marta Norte, HW1, HW2 y FW; c) Valores de Ag, categorizados por rangos de la veta Marta Norte; d) Sección transversal de la veta Marta Norte, HW1, HW2 y FW; e) Modelo geológico de las litologías y de la veta Marta Norte. Vista en perspectiva hacia el NNO del modelo litológico y de la veta MN.

La topografía fue generada mediante relevamientos con GPS diferencial (dGPS) Trimble® R3, a partir de recorridos a pie realizando perfiles del área. El posicionamiento de los

inicio y fin de las trincheras y de las bocas de pozo de cada perforación fueron establecidos también con dGPS.

Interpretación y preparación de los datos de entrada

La base de datos constó de tablas con datos de las coordenadas, profundidad, azimut e inclinación, litología, mineralogía, análisis químicos, intervalo oxidado e intervalo con mineralización primaria de cada uno de los pozos. A partir de mapeos de superficie y de la determinación litológica de los testigos de las perforaciones, las unidades geológicas reconocidas se asignaron a tres unidades: la Formación El Tranquilo, la Formación Roca Blanca y un cuerpo intrusivo de composición andesítica-basáltica. Las dos primeras presentan una geometría tabular con una leve inclinación hacia el SO. El intrusivo no aflora y fue reconocido mediante las perforaciones, presenta forma globosa y con una geometría elongada en sentido NO-SE (Figs. 5 y 6).

Durante la etapa de logueo, las mineralizaciones fueron clasificadas en 27 categorías de acuerdo a su composición (sulfuros, cuarzo, arcillas, limonitas y óxidos de Mn) y yacencia (vetillas, vetas, *stockwork*, brechas, Fig. 5a). A fin de agrupar y simplificar la mineralización, estas categorías fueron reclasificadas como VM (*Vein Mineralization*) a los intervalos correspondientes a vetas y brechas con espesores mayores de 10 cm, mientras que las mineralizaciones de tipo *stockwork* y vetillas menores de 10 cm fueron clasificadas como DM (*Disseminated Mineralization*) y no fueron consideradas para el modelado. Es frecuente que cada perforación atraviese más de un tramo mineralizado. Para la construcción del modelo de cada veta es necesario seleccionar y asignar cada tramo mineralizado a una veta específica, separándolas entre la veta principal (MN) y las que se encuentran en el bloque alto o *hanging wall* (MN HW) o en el bloque bajo o *footwall* (MN FW). La veta MN se presenta como un tramo continuo o como una sucesión de tramos cortos separados por roca de caja. La asignación de estos tramos a la veta MN fue realizada manualmente, seleccionando el tramo más potente y los segmentos mayores de 20 cm alejados hasta una distancia de 1 m del tramo principal para incorporarlos a la veta (Fig. 5b). Esta asignación es producto de la interpretación geológica que se consigue realizando una visualización y análisis tridimensional para determinar la continuidad de cada una de las vetas. Además, se visualizaron en 3D las concentraciones geoquímicas de los elementos de interés clasificados en rangos (Fig. 5c) para determinar patrones estructurales a diferentes escalas (Cowan 2020). En la veta Marta Norte se modelaron dos vetas discontinuas en el bloque alto de la veta principal (HW1 y HW2) y una veta en el bloque bajo (FW) (Fig. 5d). Para la identificación y clasificación de cada uno de los tramos asignados como VM

en cada perforación/trinchera fueron utilizadas visuales 3D y secciones perpendiculares al rumbo de la veta principal. La información interpretada fue utilizada para construir un modelo geológico de la veta Marta Norte, las unidades litológicas y las fallas (Fig. 5e).

Distribución geoquímica

Para el análisis del comportamiento geoquímico de los metales es relevante la identificación del nivel de oxidación, ya que esto puede producir la movilización de determinados elementos químicos (Triantafyllidis y Skarpelis 2017). Este nivel define tres zonas: a) una zona oxidada superior (Greffié et al. 2002, Páez et al. 2016), donde los sulfuros entran en contacto con aguas meteóricas oxidantes y se descomponen formando óxidos y soluciones sulfatadas, b) la zona de mineralización primaria por debajo (Greffié et al. 2002), donde se concentran los minerales hipogénicos y c) una zona de transición entre ambas zonas donde coexisten sulfuros, principalmente pirita, con minerales producto de la alteración meteórica.

A partir de las descripciones mineralógicas del logueo en las perforaciones, se modeló una superficie que limita una zona superior con presencia de óxidos de hierro de otra inferior con sulfuros, principalmente pirita (Fig. 6a). En la veta Marta Norte la zona de transición es muy delgada o está ausente y no fue modelada.

A fin de comprender la distribución espacial de los elementos de interés, se utilizaron los análisis geoquímicos de las muestras clasificadas como vetas (VM), excluyendo las muestras de la roca de caja. Para las interpolaciones geoquímicas los límites de la veta fueron considerados límites duros. Las muestras fueron analizadas mediante ICP-MS en Acme Analytical Laboratories (actualmente Bureau Veritas; para más detalles ver Ristorcelli et al. 2013). El contenido de oro fue determinado por ensayo a fuego (FA) y absorción atómica (procedimiento de Acme 6FA). Los elementos contemplados para este análisis fueron Au-Ag-Pb-Cu-Zn como elementos de interés económico y As-Sn-Hg-Tl como elementos rastreadores (Silberman y Berger 1985). Las interpolaciones fueron realizadas para la visualización de anomalías y no para estimación de recursos, el método empleado fue el krigeado y los valores del variograma se obtuvieron con el módulo Leapfrog Edge (www.leapfroggeo3d.com).

Adicionalmente se realizó un análisis estadístico, ponderado por la longitud de las muestras, que permitió determinar valores de Ag con una media de 129.7 ppm y valores de Au con una media de 186.2 ppb. La relación Ag/Au promedio es de 39800 y presentan una buena correlación ($r = 0.718$).

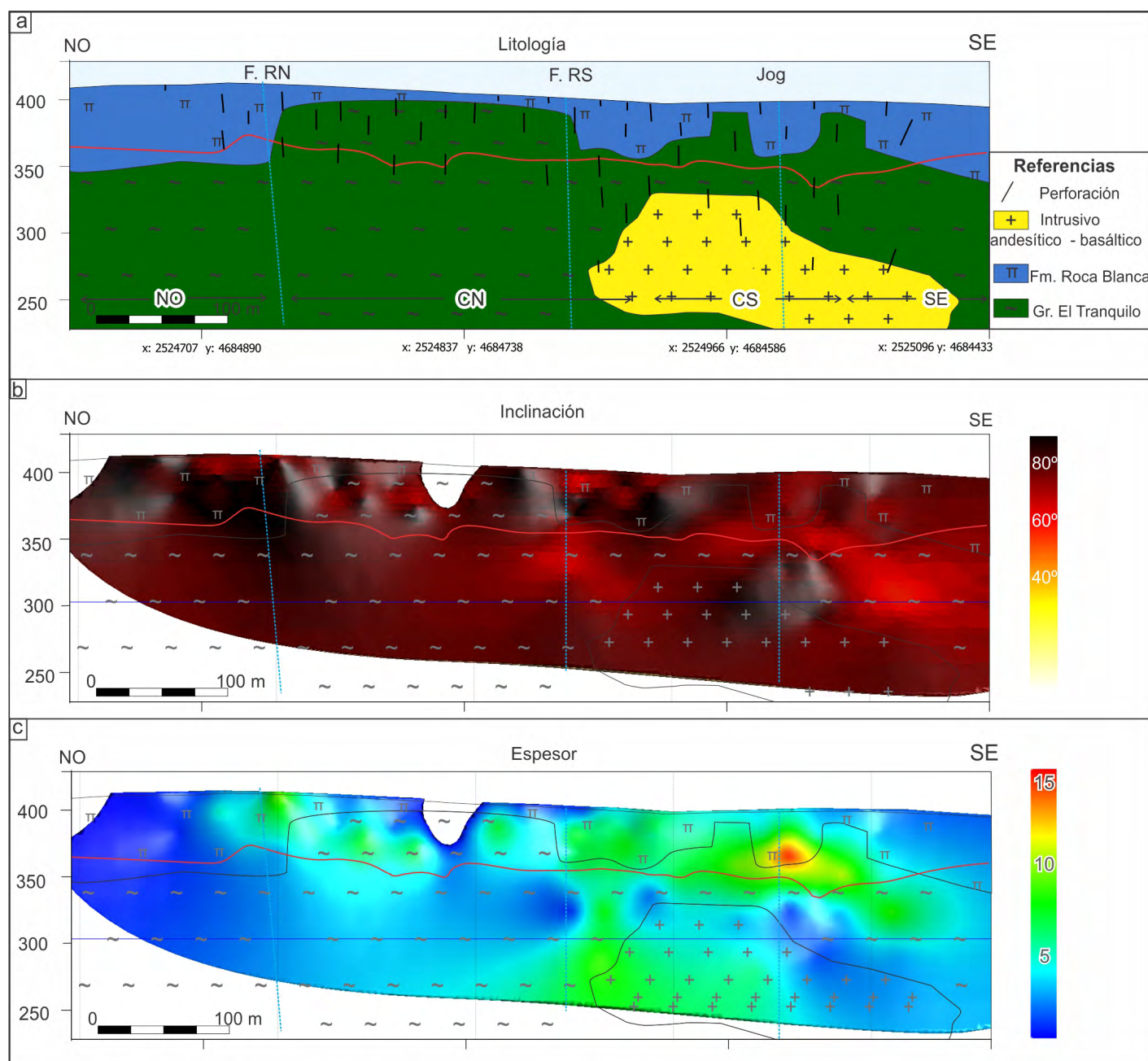


Figura 6. a) Sección longitudinal generada sobre la veta MN que muestra las unidades litológicas, las fallas principales (líneas celestes) y el límite inferior de la zona de oxidación (línea roja); b) Mapa de inclinación de la veta MN sobre sección longitudinal; c) Mapa de espesor de la veta expresado en metros.

El cuadro 1 muestra estos valores promedios, junto con los metales base y los elementos rastreadores.

Por último, y a los fines del análisis espacial de las concentraciones de metales en la veta, se dividió a la misma en cuatro segmentos; noroeste (NO), centro norte (CN), centro sur (CS) y sudeste (SE). Los límites de estos segmentos están marcados por dos fallas transversales a la estructura (Fig. 2) y una zona de jog. La falla Rama Norte tiene un azimut de 100° e inclina 80° S, mientras que la Rama sur presenta un

azimut de 120° e inclina 90° en contacto con la veta y hacia el E disminuye su inclinación hasta los 65°. El sector *jog* presenta una orientación similar a la Rama Sur y se interpreta subvertical en contacto con la veta. Estas fallas fueron sincrónicas durante el emplazamiento de la veta Marta Norte y también presentan relleno hidrotermal. Estas fallas terminan contra la veta y no hay evidencias de desplazamiento de la veta por estas fallas.

Cuadro 1. Número de muestras utilizadas para este estudio, promedio de valores de los elementos analizados y el desvío estándar de los mismos.

	n	Promedio	Desvío estándar
Ag_ppm	334	129.7	281.8
As_ppm	248	624.0	998.4
Au_ppb	334	186.2	328.4
Cu_ppm	283	310.6	750.0
Hg_ppm	248	0.7	2.2
Pb_ppm	283	4911.3	19181.1
Sb_ppm	248	11.9	15.6
Tl_ppm	248	1.0	1.2
Zn_ppm	283	1986.4	4652.0
Ag/Au		39800.7	289466.2

RESULTADOS

La veta Marta Norte consiste en un cuerpo principal de 700 m de largo en el sentido del rumbo y un espesor variable que puede alcanzar hasta 15 m, presenta un azimut e inclinación promedio de $137/79^\circ$ (Fig. 6b). A partir del sólido generado se observa que los mayores espesores se registran en el sector central, en un nivel subhorizontal a 40 m por debajo de la superficie (Fig. 6c).

Metales preciosos

Los mayores valores de Ag se localizan en la zona de oxidación, en los sectores CN-CS y SE conformando dos clavos subverticales con dos sectores de alta ley, uno hacia la superficie y el segundo en la cota 350 m s.n.m., próximo al intrusivo andesítico-basáltico (Fig. 7). Además, se registra una zona de alta ley con una extensión de 100 m que se desarrolla en el límite entre el sector NO y el sector CN, a una cota de 400 m s.n.m. Los valores de Au registrados son relativamente bajos y exhiben una distribución espacial en la veta similar a la plata (Fig. 7).

Al modelar la relación Ag/Au (Fig. 7) se observa que las relaciones Ag/Au menores de 100 se encuentran por debajo del límite inferior de la zona de oxidación en los sectores CN y CS y en un nivel subhorizontal cercano a la superficie, aproximadamente en la cota de 390 m s.n.m. Las relaciones mayores de 10,000 se encuentran mayormente formando un nivel subhorizontal en la zona de oxidación, aunque en el sector CN y SE muestran proyecciones a profundidad.

Metales base

Utilizando una metodología similar, se realizaron las interpolaciones de los metales base para poder comparar su

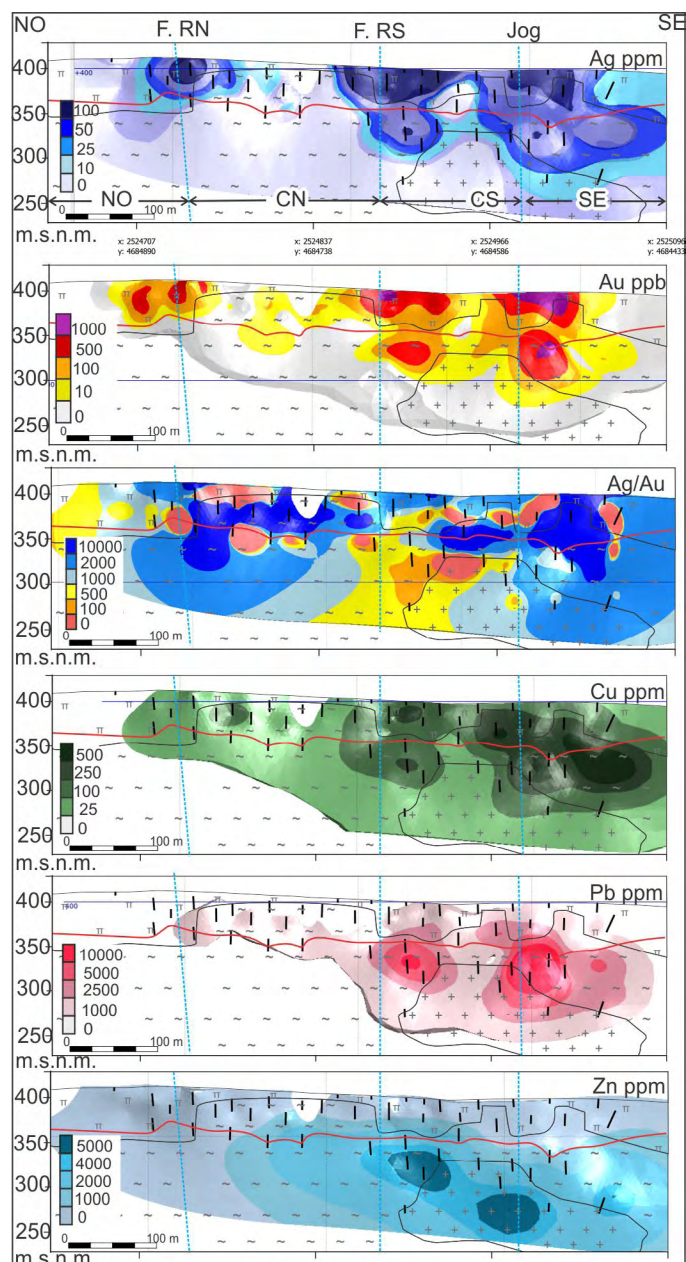


Figura 7. Sección longitudinal de veta Marta Norte (notar los contornos de litologías) con isovalores de plata (ppm), oro (ppb), relación Ag/Au, y de metales base, cobre (ppm), plomo (ppm) zinc (ppm). Las líneas celestes punteadas representan las fallas interpretadas en profundidad y la línea roja marca el límite inferior de la zona de oxidación.

distribución con respecto a la de los metales preciosos. El Cu presenta sus mayores concentraciones en el sector SE y CS (Fig. 7), en las proximidades al intrusivo y las anomalías se extienden en la zona de oxidación. Las anomalías de Pb se encuentran en dos zonas muy bien definidas, en el sector CS y SE de la veta Marta Norte, entre las cotas 300 y 350 m s.n.m. Los valores de Zn también se concentran en los sectores SE y CS y muestra un enriquecimiento en zonas más profundas que los anteriores metales base; en la sección longi-

tudinal muestra dos clavos con un *plunge* de 40° hacia el SE. En los tres metales base considerados se observa una mayor concentración de las anomalías en proximidad al intrusivo.

Elementos rastreadores

Por último, en los sistemas epitermales existe un enriquecimiento de ciertos metales con una alta movilidad que pueden considerarse como elementos rastreadores en la etapa de exploración de estos depósitos (Clarke 1989, White y Hedenquist 1990, Simmons et al. 2005). En este trabajo se modeló la distribución espacial de As, Sb, Hg y Tl en el interior de la veta Marta Norte. El tratamiento de los datos para generar las interpolaciones fue similar al de los casos anteriores. Las mayores anomalías de As se encuentran en el sector CS de la veta y en el límite entre CS y SE (Fig. 8), con dos anomalías en la zona de oxidación y otra zona con enriquecimiento en la cota 325 m s.n.m., en el contacto con el intrusivo. Las mayores concentraciones de Sb se presentan hacia los contornos del cuerpo intrusivo y se extienden en la zona de oxidación hacia el NO (Fig. 8). El Hg forma un nivel subhorizontal en la zona de oxidación (Fig. 8). La distribución de las anomalías de Tl es similar a la del Hg, aunque las anomalías presentan mayor continuidad lateral (Fig. 8).

DISCUSIÓN

Controles geológicos de la precipitación de metales

Controles litológicos: El modelo geológico del sector de la veta Marta Norte permitió generar las superficies de contacto entre la Formación Roca Blanca y el Grupo El Tranquilo. Asimismo, a partir de los datos de las perforaciones fue posible modelar tridimensionalmente un cuerpo subvolcánico de composición andesítico-basáltico. Esta unidad puede ser asignada a la Formación La Leona del Jurásico Temprano o Formación Cerro León del Jurásico Medio. De acuerdo con Jovic (2010), este intrusivo podría ser la potencial fuente de calor y de metales del depósito epitermal (Fig. 5). Si bien en las inmediaciones de la veta Marta Norte no han sido reconocidos afloramientos correspondientes a las Formaciones La Leona o Cerro León, ambas unidades afloran a pocos kilómetros y han sido modeladas en profundidad con magnetometría por Peñalba et al. (2008). Los mayores valores de los metales preciosos y de los metales base por debajo de la zona de oxidación se encuentran próximos al intrusivo, en los sectores CS y SE de la veta.

Sobre la base de las zoneografías, el contacto entre el

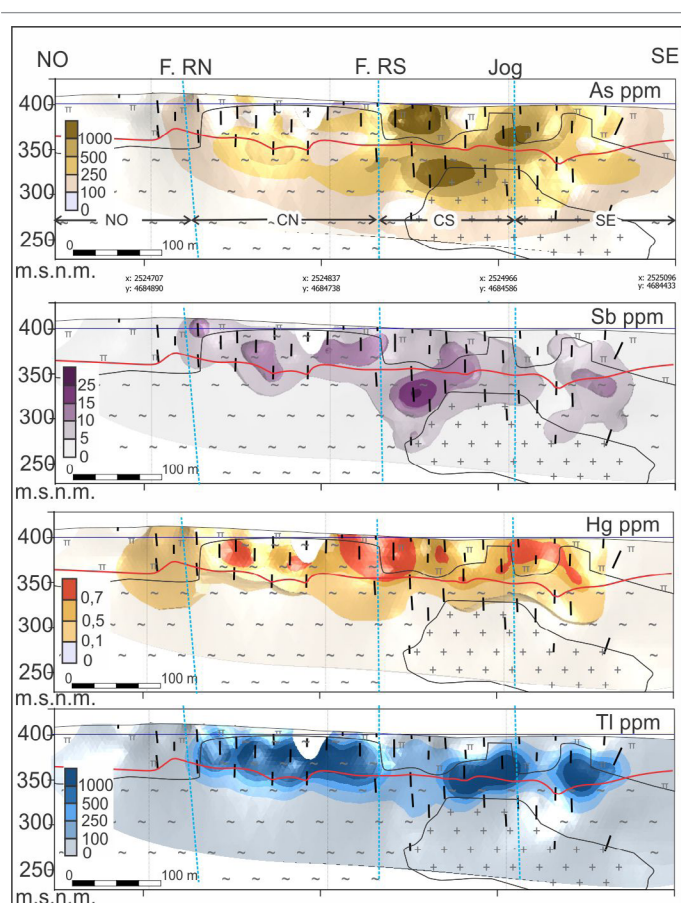


Figura 8. Sección longitudinal de la veta Marta Norte (notar los contornos de litologías) con isovalores de elementos rastreadores (arsénico, mercurio, antimonio y talio). Las líneas celestes punteadas representan las fallas interpretadas en profundidad y la línea roja el límite inferior de la zona de oxidación.

Grupo El Tranquilo y la Formación Roca Blanca no parece un control relevante de la mineralización.

Control estructural: La figura 4 muestra tres anomalías de resistividad ubicadas una al sur, una en la zona central y la de mayor intensidad en el sector centro-norte de la veta. Estas anomalías coinciden espacialmente con tres anomalías de cargabilidad, donde las más importantes se asocian a los valores de menor resistividad. Estas zonas de alta cargabilidad se asocian, a su vez, a las mayores concentraciones de Ag, Cu, Pb, As, Hg y Sb y se ubican en el sector CS y SE de la veta. Las anomalías del sector norte (NO-CN) y el sector central (CN-CS) coinciden espacialmente con la unión de la Rama Norte y Rama Sur con la estructura principal, respectivamente, mientras que la anomalía sur (SE) coincide con un sector de cambio de orientación de la estructura principal, generando un quiebre de falla o *jog* (Fig. 2). Estas zonas (Figs. 9 y 10) presentan mayor permeabilidad dentro de la falla que alberga la mineralización debido a la mayor fracturación (cruce de estructuras) o mayor dilatación (quiebres). Los clavos

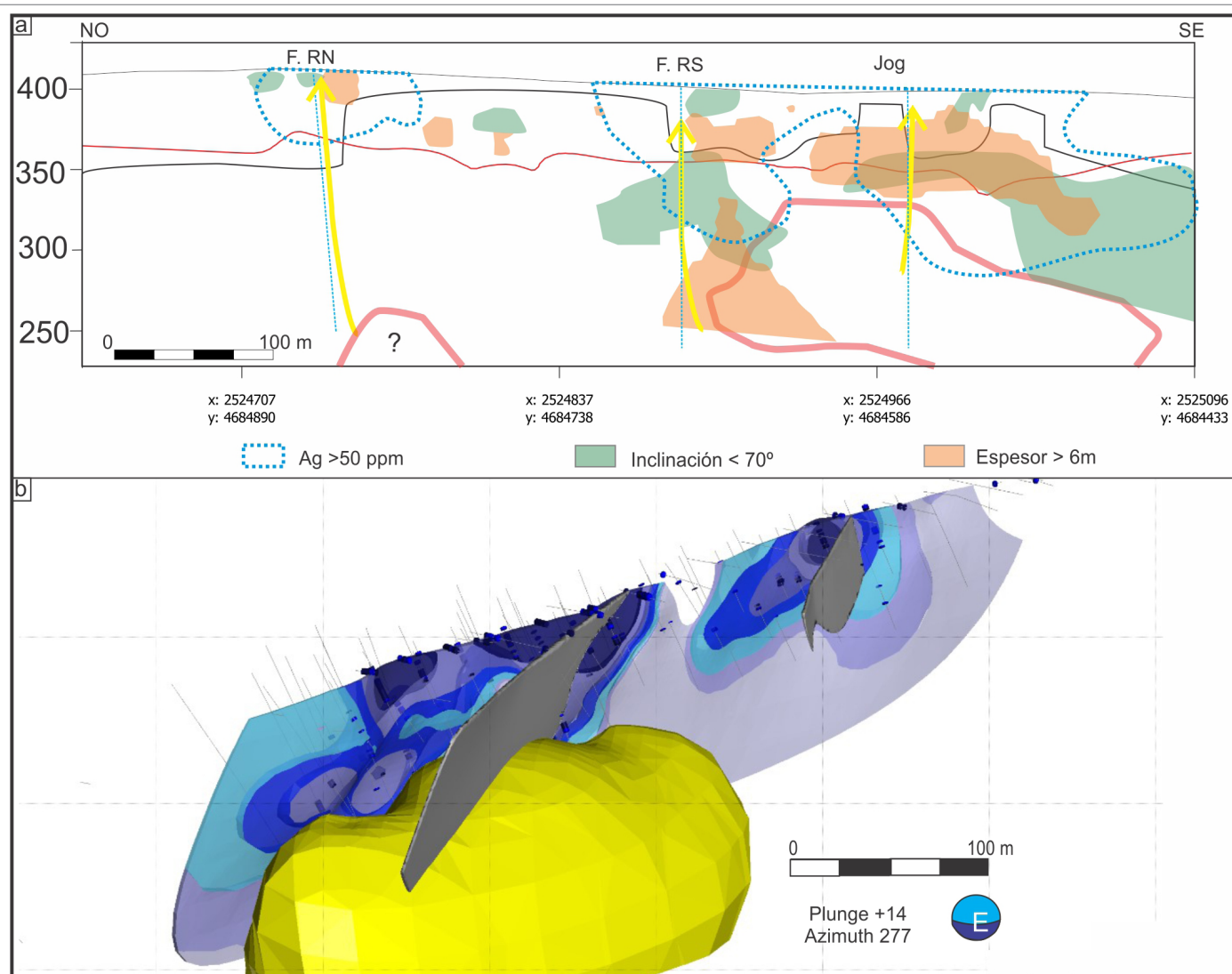


Figura 9. a) Modelo conceptual de la veta MN donde se representan la curva de isovalores con altos contenidos de Ag y los mapas de los sectores de la veta con inclinaciones menores a 70° y espesores mayores a 6 m; b) Representación tridimensional de la veta MN con las curvas de isovalores de Ag, la relación espacial con las fallas Rama Norte y Rama Sur (gris) y con el intrusivo de composición andesítica-basáltica.

mineralizados coinciden con las zonas de mayor apertura de la veta y menores inclinaciones. En la figura 9 se observa que los valores de plata mayores de 50 ppm tienen correlación alta con los sectores de la veta con espesores mayores de 6 m y con los tramos de la veta con inclinaciones menores de 70° . La cinemática de la falla sin-mineralización se interpreta como extensional, posiblemente con una componente sinistral (Fig. 10), según la morfología de los clavos mineralizados y los rasgos estructurales definidos. Las fallas que limitan el sector CS de la veta podrían haber funcionado como conductos para el ascenso de los fluidos hidrotermales.

Vectorización geoquímica

La combinación de análisis geoquímicos con el modelado tridimensional de la litología, la estructura y la alteración hi-

drotermal ha probado ser una valiosa herramienta para interpretar los controles de la mineralización en un depósito mineral (Fisher et al. 2013, Vollger et al. 2015, Bell et al. 2018). La distribución de los elementos depende de procesos primarios que ocurren durante la formación del depósito, a los que se les superimponen procesos secundarios de alteración supergénica (Greffié et al. 2002, Jackson 2010) o la removilización tectónica (Páez et al. 2011, Jovic et al. 2019).

Al analizar la distribución espacial de la plata y el oro en la veta Marta Norte, se reconocen zonas de enriquecimiento o clavos mineralizados. El modelo muestra en la zona supergénica dos clavos importantes de Au y Ag en los sectores CS y SE, y uno menor en el sector NO próximo a la superficie actual. Debajo de la zona de oxidación hay dos anomalías en los sectores CS y SE próximos o en el contacto y dentro del

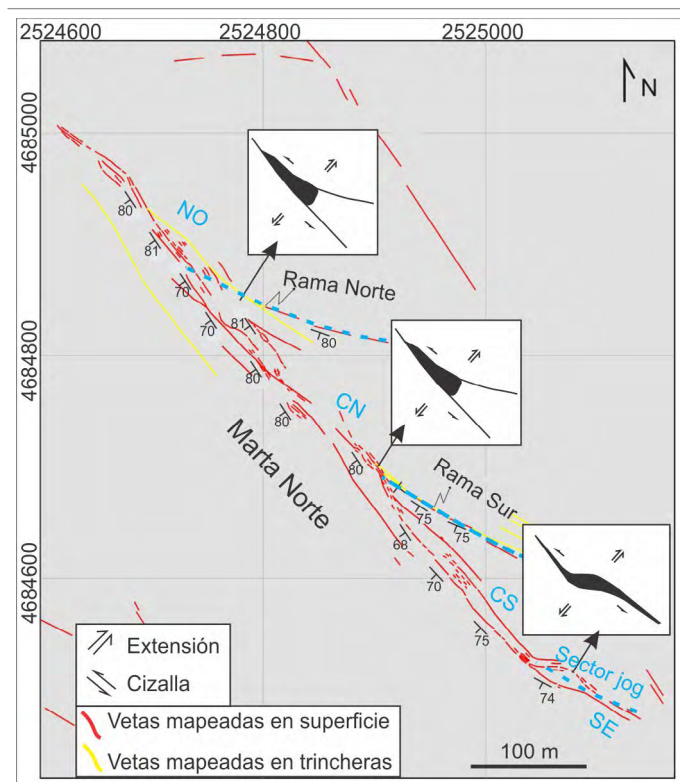


Figura 10. Modelo estructural del sector de veta Marta Norte. Los clavos mineralizados con altos tenores de plata del sector norte (NO-CN) y el sector central (CN-CS) están relacionados con la intersección de las Ramas Norte Sur con la veta Marta Norte. La del SE se vincula con cambio de orientación de la estructura principal (jog).

cuerpo intrusivo. Tanto el Au como la Ag presentan una disminución de sus tenores en la zona próxima al límite inferior de la zona de oxidación. Los valores más altos de Pb y Zn se encuentran próximos al cuerpo intrusivo, lo que puede indicar una cercanía a la fuente de estos metales. En la zona de oxidación se observa una disminución en los contenidos de Pb y Zn, aunque en este último es significativamente más marcada. Esto es compatible con la alta movilidad que presenta el Zn (López et al. 2015), y una vez oxidados los sulfuros de Zn, este elemento se moviliza fuera del sistema.

El Cu, si bien también se encuentran valores elevados por debajo de los 300 m s.n.m., presenta un nivel subhorizontal con altos valores en el sector SE y CS de la veta, próximo a la zona de oxidación. Esto podría obedecer a la presencia de una zona de enriquecimiento secundario, similar a la ya identificada en otras vetas del proyecto Pingüino (López et al. 2015). También se registran altos tenores en el contacto con el intrusivo.

Los elementos rastreadores se presentan en las zonas distales (Clarke 1989). Sin embargo, el As y el Sb se encuentran tanto en las zonas superficiales con alteración supergénica como en zonas más profundas y próximas al intrusivo.

Esto último puede explicarse debido a que precipitan como sulfuros en la zona primaria formando minerales como arsenopirita (As) y sulfosales de plata, tetrahedrita/tennantita (Sb). Las mayores anomalías de Hg y Tl se encuentran exclusivamente en las zonas de oxidación, con una amplia dispersión, lo cual es coherente con la alta movilidad de estos elementos en los sistemas epitermales (Buchanan 1981, Simmons et al. 2005).

Relación Ag/Au

La relación Ag/Au ha sido utilizada en varias ocasiones para caracterizar depósitos epitermales de la Patagonia argentina (Fernández et al. 2008). En este sentido, la veta Marta Norte es una veta argentífera, donde las concentraciones de oro son bajas, con un promedio de 0.1 ppm. Al analizar la variación de la relación Ag/Au se observa que los menores valores se registran en las zonas próximas al intrusivo, particularmente en el sector CS de la veta.

Los mayores valores de plata respecto a los de oro se encuentran en la zona próxima al nivel inferior de la zona de oxidación. Este aumento relativo de la plata respecto al oro podría obedecer a los procesos de enriquecimiento secundario ya mencionados para el cobre. Esta zonación se genera debido a la disolución de los sulfuros y sulfosales primarios en la zona oxidada y su redepositación en profundidad bajo condiciones reductoras (Greffié et al. 2002, Páez 2012).

Wang et al. (2019) han clasificado a los depósitos epitermales de sulfuración intermedia en dos grupos basados en la relación Ag/Au. Los depósitos con una relación Ag/Au < 60 se forman en arcos volcánicos bajo condiciones neutrales a compresivas (*NC-type IS*) mientras los que presentan relación Ag/Au > 60 se encuentran en ambientes extensionales (*E-type IS*) de intra-arco, cinturones orogénicos post-colisionales o en ambiente de retroarco. La relación Ag/Au es extremadamente alta en la veta Marta Norte, con un promedio de 30900. Esta alta relación se ajustaría con la clasificación *E-Type IS* sugerida por Wang et al. (2019) y es coherente con el ambiente geodinámico propuesto para el Jurásico del Macizo del Deseado (Navarrete et al. 2019, Lovecchio et al. 2020), momento en que se habría formado la veta (Jovic 2010).

CONCLUSIONES

El modelado implícito 3D ha demostrado ser un potente método para la reconstrucción tridimensional de la Veta Marta Norte del Proyecto Pingüino, así como también para la geología circundante a la veta. Este modelado integró informa-

ción de superficie (mapeos y trincheras) y subsuelo (perforaciones) junto con información geofísica. Particularmente, se modeló un cuerpo subvolcánico no aflorante de composición andesítico-basáltico que podría corresponder a la Formación La Leona o a la Formación Cerro León.

El modelado geoquímico de la veta Marta Norte confirmó a la veta como una estructura argentífera con una muy alta relación Ag/Au y valores anómalos de metales base. Las curvas generadas de isotenos de elementos preciosos, base y rastreadores permitieron visualizar la geometría y establecer los controles de los clavos mineralizados.

El control más relevante para los clavos mineralizados de la veta Marta Norte es el estructural. Las zonas de mayor concentración de los metales analizados están controladas estructuralmente por dos mecanismos que generaron extensión splits (Ramas 1 y 2) y *jogs*. La cinemática de las fracturas que alojan la veta es extensional con componente sinistral. Algunas de estas fallas que limitan los distintos segmentos de la veta han estado activas en un estadio post-mineralización y desplazaron verticalmente los clavos mineralizados.

Además, se registra una vectorización de los mayores tenores de metales base hacia el cuerpo subvolcánico identificado en profundidad. Se propone a este cuerpo como una posible fuente de calor y metales para la mineralización de la veta Marta Norte.

El modelado 3D constituye una herramienta de exploración fundamental para la vectorización tridimensional de sectores mineralizados en sistemas epitermales como el ejemplo considerado en este trabajo del Depósito Pingüino y otros sistemas vetiformes similares de Patagonia y Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a la empresa Austral Gold por brindarnos generosamente la base de datos para realizar este trabajo y a la empresa Seequent por brindarnos la licencia de Leapfrog Geo con el cual fueron generados los modelos tridimensionales. Además, queremos agradecer a los revisores de este trabajo, la Dra. Laura Giambiagi, el Dr. Ramón Aguirre Maturana y a la Dra. Marta Franchini por sus sugerencias y comentarios que mejoraron sustancialmente este trabajo.

REFERENCIAS

Apel, M. 2006. From 3d geomodelling systems towards 3D geoscience information systems: Data model, query functionality, and data management. *Computers and Geosciences* 32: 222-239.

- Bell, R.M., Kolb, J. y Waight, T.E. 2018. Assessment of lithological, geochemical and structural controls on gold distribution in the Nalunaq gold deposit, South Greenland using three-dimensional implicit modelling. *Geological Society Special Publication* 453(1): 385-405.
- Buchanan, L.J. 1981. Precious-metal deposits associated with volcanic environments in the Southwest. En Dickinson, W.R. y Payne, W.D. (eds.), *Relations of tectonics to ore deposits in the Southern Cordillera: Arizona Geological Society Digest* 14: 237-262.
- Clarke, D.S. 1989. The Trace Element Geochemistry of Vein Material in Epithermal Systems: Significance for Exploration. 11th New Zealand Geothermal Workshop 1989: 139-142, Auckland.
- Cowan, E.J., Beatson, R.K., Ross, H.J., Fright, W.R., McLennan, T.J., Evans, T.R. y Titley, M. 2003. Practical Implicit Geological Modelling. 5th International Mining Geology Conference 8: 89-99.
- Cowan, E.J. 2020. Deposit-scale structural architecture of the Sigma-Lamaque gold deposit, Canada—insights from a newly proposed 3D method for assessing structural controls from drill hole data. *Mineralium Deposita* 55: 217-240.
- Fernández, R.R., Blesa, A., Moreira, P., Echeveste, H., Mykietiuik, K., De Palomera, P. A. y 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.
- Fisher, L.A., Cleverley, J.S., Pownceby, M. y MacRae, C. 2013. 3D representation of geochemical data, the corresponding alteration and associated REE mobility at the Ranger uranium deposit, Northern Territory, Australia. *Mineralium Deposita* 48(8): 947-966.
- Giacosa, R., Zubia, M., Sánchez, M. y Allard, J. 2010. Meso-Cenozoic tectonics of the southern Patagonian foreland: structural evolution and implications for Au-Ag veins in the eastern Deseado Region. *Journal of South American Earth Sciences* 30: 134-150.
- Greffé, C., Bailly, L. y Milési, J. P. 2002. Supergene alteration of primary ore assemblages from low-sulfidation Au-Ag epithermal deposits at Pongkor, Indonesia, and Nazareño, Perú. *Economic Geology* 97(3): 561-571.
- Guido, D. y Schalamuk, I. 2003. Genesis and exploration potential of epithermal deposits from the Deseado Massif, Argentinean Patagonia. En: Eliopoulos, D. et al. (eds.), *Mineral Exploration and Sustainable Development*. I. Balkema, 489-492, Rotterdam.
- Guido, D.M. y Campbell, K.A. 2011. Jurassic hot spring deposits of the Deseado Massif (Patagonia, Argentina): Characteristics and controls on regional distribution. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 203: 35-47.
- Guido, D.M., Jovic, S.M., Echeveste, H., Tessone, M.O., Ramayo Cortes, L. y Schalamuk, I. B. 2009. Descubrimiento y modelización de clavos mineralizados en vetas polimetálicas a partir de exploración geoelectrica, proyecto pingüino, Macizo del Deseado. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64(3): 383-390.

- Herbst, R. 1965. La flora fósil de la Formación Roca Blanca, provincial de Santa Cruz, Patagonia, con consideraciones geológicas y estratigráficas. *Opera Lilloana* 12: 1-102.
- Imamalipour, A. y Mousavi, R. 2018. Vertical geochemical zonation in the Masjed Daghi porphyry copper-gold deposit, northwestern Iran: Implications for exploration of blind mineral deposits. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 18(2): 120-131.
- Jackson, R.G. 2010. Application of 3D geochemistry to mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 10: 143-156.
- Jalfin, G. y Herbst, R. 1995. La Flora triásica del Grupo El Tranquilo, provincia de Santa Cruz (Patagonia). *Estratigrafía. Ameghiniana* 32(3): 211-229.
- Japas, M.S., Sruoga, P., Kleiman, L.E., Gayone, M.R. y Maloberti, A. 2013. Cinemática de la extensión jurásica vinculada a la Provincia Silíceo Chon Aike, Santa Cruz, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 70 (1): 16-30.
- Jessell, M., Aillères, L., Kemp, E. de, Lindsay, M., Wellmann, F., Hillier, M. y Martin, R. 2014. Next Generation Three-Dimensional Geologic Modeling and Inversion. *Special Publication SEG*, 261-272.
- Jovic, S. 2010. Geología y Metalogénesis de las mineralizaciones polimetálicas del área El Tranquilo (Cerro León), sector central del Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz. Editorial de la Universidad de La Plata (EDULP), 278 p., La Plata.
- Jovic, S., Guido, D., Schalamuk, I., Ríos, F., Tassinari, C. y Recio, C. 2011. Pingüino In-bearing polymetallic vein deposit, Deseado Massif, Argentina: Characteristics of mineralization and ore-forming fluids. *Mineralium Deposita* 46: 257-271.
- Jovic, S. M., Páez, G. N., Permuy Vidal, C., López, L. y Guido, D. M. 2019. Brechas tectónico-hidrotermales en sistemas epitermales. 13º Congreso de mineralogía, petrología ígnea y metamórfica y metalogénesis, Actas: 320-321, Córdoba.
- Leapfrog Geo 4.3: www.leapfrog3d.com
- López, L., Jovic, S. M., Guido, D. M., Permuy Vidal, C., Páez, G. N. y Ruiz, R. 2015. Geochemical distribution and supergene behavior of indium at the Pingüino epithermal polymetallic vein system, Patagonia, Argentina. *Ore Geology Reviews* 64: 747-755.
- Lovecchio, J.P., Rohais, S., Joseph, P., Bolatti, N.D. y Ramos, V.A. 2020. Mesozoic rifting evolution of SW Gondwana: A poly-phased, subduction-related, extensional history responsible for basin formation along the Argentinean Atlantic margin. *Earth-Science Reviews* 203: 103138.
- Mao, X., Zhang, W., Liu, Z., Ren, J., Bayless, R.C., y Deng, H. 2020. 3D mineral prospectivity modeling for the low-sulfidation epithermal gold deposit: A case study of the axi gold deposit, western Tianshan, NW China. *Minerals* 10: 1-21.
- Micklethwaite, S., Ford, A., Witt, W. y Sheldon, H. A. 2015. The where and how of faults, fluids and permeability - insights from fault stepovers, scaling properties and gold mineralisation. *Geofluids* 15(1-2): 240-251.
- Navarrete, C., Gianni, G., Encinas, A., Márquez, M., Kamerbeek, Y., Valle, M. y Folguera, A. 2019. Triassic to Middle Jurassic geodynamic evolution of southwestern Gondwana: From a large flat-slab to mantle plume suction in a rollback subduction setting. *Earth-Science Reviews* 194: 125-159.
- Páez, G.N. 2012. Génesis del yacimiento de metales preciosos Mina Martha, sector sudoccidental del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata (inédito), 241 p., La Plata.
- Páez, G.N., Ruiz, R., Guido, D.M., Jovic, S.M. y Schalamuk, I. B. 2011. Structurally controlled fluid flow: High-grade silver ore-shoots at Martha epithermal mine, Deseado Massif, Argentina. *Journal of Structural Geology* 33(5): 985-999.
- Páez, G.N., Ruiz, R., Guido, D.M., Ríos, F.J., Subias, I., Recio, C. y Schalamuk, I.B. 2016. High-grade ore shoots at the Martha epithermal vein system, Deseado Massif, Argentina: The interplay of tectonic, hydrothermal and supergene processes in ore genesis. *Ore Geology Reviews* 72(P1): 546-561.
- Panza, J. 1995. Hoja geológica 4969—II Tres Cerros escala 1: 250.000, Provincia de Santa Cruz. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Boletín 213: 1-103, Buenos Aires.
- Peñalva, G., Jovic S., Chemicoff C., Guido D. y Schalamuk, I. 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.
- Ristorcelli, S., Ronning, P., Tucker, R. y Guido, D. 2013. Technical Report on the Pingüino Project Santa Cruz Province, Argentina (inédito), 143 p.
- Schalamuk, I., de Barrio, R., Zubia, M., Genini, A. y Echeveste, H. 1999. Provincia Auroargentífera del Deseado, Santa Cruz. En: Zappettini E. (ed.), Recursos Minerales de la República Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR 35: 1177-1188.
- Silberman M.L. y Berger B.R. 1985. Relationship of trace-element patterns to alteration and morphology in epithermal precious-metal deposits. En: Berceer B.R. y Bethke P.M. (eds.), *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*. *Economic Geology* (2): 203-232.
- Simmons, S.F., White, N.C. y John, D.A. 2005. Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits. *Economic Geology*, 100th Anniversary: 485-522.
- Triantafyllidis, S. y Skarpelis, N. 2017. Supergene alteration of a refractory epithermal gold mineralization: The Perama Hill deposit, NE Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece* (49): 59-75.
- Vollgger, S.A., Cruden, A.R. y Cowan, E.J. 2013. 3D implicit geological modelling of a gold deposit from a structural geologist's point of view. *Proceedings to 12th SGA Biennial Meeting, Upsala*.
- Vollgger, S. A., Cruden, A. R., Aillères, L. y Cowan, E. J. 2015. Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights

- from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit, Namibia. *Ore Geology Reviews* 69: 268-284.
- Wang, G. y Huang, L. 2012. 3D geological modeling for mineral resource assessment of the Tongshan Cu deposit, Heilongjiang Province, China. *Geoscience Frontiers* 3(4): 483-491.
- Wang, L., Qin, K. Z., Song, G. X. y Li, G. M. 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews* 107(19): 434-456.
- 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(1-3): 445-474.