



# Modelado geológico tridimensional de la veta central, área Cerro Norte, distrito Casposo, San Juan, Argentina

**Luciano LÓPEZ<sup>1,2\*</sup>, Agustina SALABERRY<sup>2</sup>, Diego S. PALMA<sup>1,2</sup>, Facundo DE MARTINO<sup>1,2</sup>, Sebastián M. JOVIC<sup>1,2,3</sup>, Pablo ROLANDO<sup>4</sup>, Diego M. GUIDO<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> CONICET - Instituto de Recursos Minerales (INREMI). Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata, Paseo Del Bosque S/n, B1900FWA, La Plata, Argentina.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP, Av. 122 y 60, La Plata, Argentina

<sup>3</sup> Departamento de Geología. Universidad de Buenos Aires.

<sup>4</sup> AUSTRAL GOLD S.A.

\* lucianolopez@gsuite.fcnym.unlp.edu.ar

Recibido: 10/09/2024

Editor: Ricardo A. Astini

Aceptado: 31/03/2025

## RESUMEN

El depósito de baja sulfuración del sistema Cerro Norte, incluye tres vetas principales: Norte, Central y Sur, compuestas por cuarzo-carbonato con texturas de reemplazo y brechas con oro, plata y sulfuros de metales base. La mineralización ocurre en fracturas, formando vetas subverticales de hasta 950 m de extensión. La Veta Central está conformada por dos vetas subparalelas y una zona de stockwork. En esta veta se determinó una correlación positiva media a alta en los pares Au-Ag, Au-Cu, Ag-Cu, Pb-Zn, Pb-Cu, As-Pb, As-Zn, Hg-Au, Mo-Zn y Mo-As. Asimismo, se analizó la distribución de metales mediante un modelo geológico 3D, donde, se modelaron las litologías y fallas que segmentan la veta. Las mayores concentraciones de Au, Ag, metales base y Mo en el bloque E de la veta central se encuentran predominantemente por debajo del contacto litológico entre ignimbritas andesíticas y un cuerpo subvolcánico dacítico. Los valores elevados sobre este nivel se asocian a fallas y diques posminerales. En el bloque O, el Au se concentra en zonas superficiales coincidente con en el contacto mencionado, mientras que la Ag, Pb, Cu y Zn, se asocian también a fallas en zonas profundas. El As y Hg se encuentran en zonas profundas, mientras que el Sb predomina en zonas superficiales. La distribución de metales en Cerro Norte exhibe la influencia de la permeabilidad de las rocas y la estructura geológica en el transporte de fluidos mineralizantes y en la formación de clavos mineralizados, con variaciones significativas entre los bloques de la Veta Central.

**Palabras clave:** Vectorización, Epitermal, Baja sulfuración, Geoquímica, Exploración.

## ABSTRACT

*Three-dimensional geological modeling of the central vein, Cerro Norte area, Casposo district, San Juan.*

The low-sulfidation deposit of the Cerro Norte system includes three main veins: Norte, Central, and Sur, composed of quartz-carbonate with replacement textures and breccias, containing gold, silver, and base metal sulfides. Mineralization occurs in fractures, forming subvertical veins that extend up to 950 meters in length. The Central Vein consists of two subparallel veins and a stockwork zone. A medium to high positive correlation was observed among the pairs Au-Ag, Au-Cu, Ag-Cu, Pb-Zn, Pb-Cu, As-Pb, As-Zn, Hg-Au, Mo-Zn, and Mo-As. The distribution of these metals was analyzed using a 3D geological model, in which lithologies and faults that segment the vein were modeled. The highest concentrations of Au, Ag, base metals, and Mo in the eastern block of the central vein are predominantly located below the lithological contact between andesitic ignimbrites and a dacitic subvolcanic body. Elevated values above this level are associated with faults and post-mineral dikes. In the western block, Au is concentrated in shallow zones, coinciding with the mentioned contact, whereas Ag, Pb, Cu, and Zn are also linked to faults in deeper zones. As and Hg are primarily found at depth, whereas Sb is more abundant in shallow zones. The metal distribution in Cerro Norte reflects the influence of rock permeability and

geological structure on the transport and deposition of mineralizing fluids, with significant variations observed between the blocks of the central vein.

**Keywords:** Vectorization, Epithermal, Low-sulphidation, Geochemistry, Exploration

## INTRODUCCIÓN

Los depósitos epitermales son mineralizaciones que se forman en ambientes someros, comúnmente hasta 1000 m de profundidad. Si bien existen diferentes formas de clasificarlos, la que reúne mayor consenso es la propuesta por Hedenquist (1987) y Hedenquist et al. (2000), que dividen a los depósitos epitermales en tres clases, dependiendo de la mineralogía y composición del fluido: baja (LS), intermedia (IS) y alta sulfuración (HS). Los epitermales de baja sulfuración presentan características particulares y diferenciales de los de intermedia y alta sulfuración. Estos depósitos se caracterizan típicamente por una mineralogía compuesta por escasos sulfuros, entre los que se encuentran pirita, esfalerita, marcasita, galena, además de electrum y oro. El relleno principal de las vetas está constituido por cuarzo y calcedonia, con texturas bandeadas, carbonatos y adularia. Las temperaturas de los fluidos hidrotermales varían entre 150 y 250 °C, mientras que las salinidades son bajas (Hedenquist et al. 2000; Camprubí 2003). Estos sistemas pueden presentar elevadas concentraciones de oro y plata. En contraste, los metales base suelen exhibir concentraciones moderadas a bajas, y su distribución está generalmente asociada a las zonas más proximales del sistema. En estos sistemas, el mercurio, antimonio y arsénico se caracterizan por tener alta movilidad sirviendo de elementos rastreadores en la etapa de exploración (Clarke 1989, White y Hedenquist 1990, Simmons et al. 2005, López 2021). La distribución espacial de los metales suele presentar una zonación vertical y horizontal (Clarke 1989, Andrada de Palomera et al. 2012, Clark y Gemmel 2018, John et al. 2018), por lo que pueden emplearse para vectorizar el sistema y orientar la exploración en estos tipos de mineralizaciones.

La combinación del análisis geoquímico con el modelado de la litología y estructura se presenta como una herramienta valiosa para interpretar los controles de la mineralización en un depósito (Basson et al. 2016, John et al. 2018, Mao et al. 2020, Kaewpaluk et al. 2023) que ha sido utilizada exitosamente para el entendimiento de la distribución y geometría tridimensional de depósitos epitermales en Argentina (López et al. 2021, De Martino et al. 2022, Fernández et al. 2022).

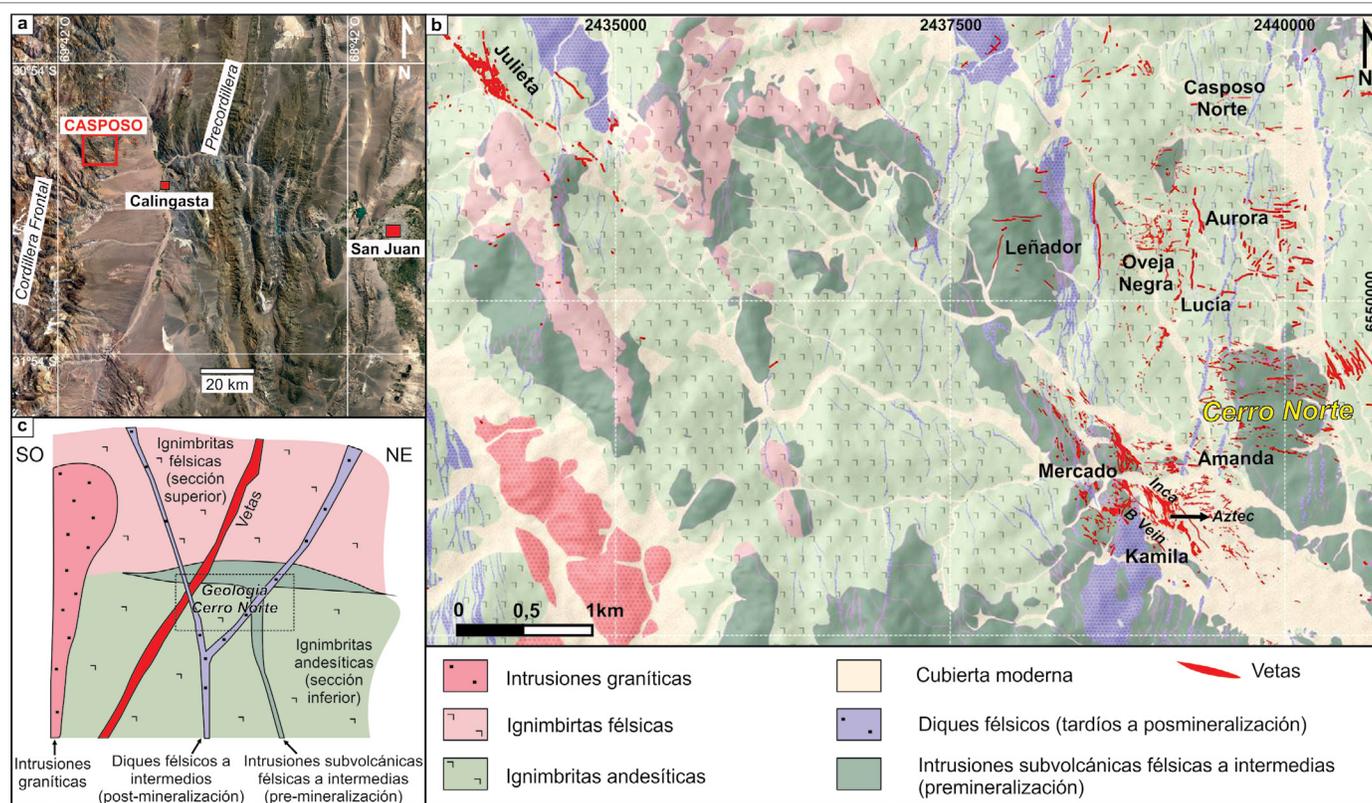
El distrito Casposo se encuentra ubicado en el sector oriental de la Cordillera Frontal en la provincia de San Juan (Fig. 1a), y constituye un extenso sistema epitermal de baja sulfuración alojado en rocas volcánicas del Grupo Choyoi,

conformado por un sistema de vetas con orientaciones principales de rumbo NO-SE, N-S y E-O (Palma 2021, Fig. 1a y b). El sistema NO-SE corresponde a los sectores Kamila-Mercado y Julieta; el N-S está conformado por las vetas Lucía, Aurora y Leñador; en tanto que el E-O se corresponde con las vetas Casposo Norte, Oveja Negra, Amanda y Cerro Norte. La mineralogía típica de estas estructuras se encuentra conformada por cuarzo-calcedonia, adularia, illita y carbonatos, acompañado de Au y Ag nativa, electrum, sulfuros y sulfosales de Ag, sulfuros de metales base y ocasional molibdenita (Palma et al. 2021).

El presente trabajo se focaliza en las estructuras mineralizadas del sistema Cerro Norte con orientación E-O, ubicado 800 m al NE del sector Kamila (Fig. 1b). En esta zona afloran 3 vetas: Norte, Central y Sur (Fig. 2), con espesores que varían entre 1 y 2 m, disposición subvertical y composición cuarzo-carbonática. De estas, la Veta Central es la que contiene los mayores valores de metales preciosos (Au-Ag) y la que cuenta con más información, tanto de muestras de trincheras como de perforaciones de diamantina y aire reverso. Así, el objetivo de la presente contribución es evaluar los posibles controles litológicos y estructurales que afectaron la distribución de las concentraciones de metales preciosos, base y rastreadores en la Veta Central del sector Cerro Norte. Para lograr esto, se generó un modelo geológico-geoquímico tridimensional de la veta y las litologías circundantes, con el fin de definir las relaciones de contacto entre las distintas rocas y determinar patrones de distribución de la mineralización.

## MARCO GEOLÓGICO DEL DISTRITO MINERO CASPOSO

El sistema epitermal del distrito Casposo se encuentra hospedado en rocas ígneas del Permo-Triásico del Grupo Choyoi (Fig. 1b y c), que cubre casi completamente el área de estudio. La secuencia estratigráfica presenta un basamento metasedimentario del Carbonífero Superior al Pérmico Inferior, de ambiente marino somero correspondiente a la Formación La Puerta (Caballé 1986). Sobre este basamento se encuentran, en discordancia angular, vulcanitas y piroclastitas mesosilíceas a ácidas del Grupo Choyoi, de edad pérmica inferior a triásica media (Llambías, 1999). Las rocas volcánicas incluyen ignimbritas andesíticas en la parte inferior



**Figura 1.** a) Ubicación del distrito Casposo. b) Mapa geológico regional del distrito donde se muestran las principales estructuras mineralizadas. c) Perfil esquemático del Grupo Choiyoi en la zona de estudio. Modificado de Palma et al. (2023).

de la secuencia (Sección Inferior) e ignimbritas riolíticas en la superior (Sección Superior), atravesadas por sistemas de diques félsicos y plutones graníticos-granodioríticos, asociados al evento magmático extensional del Grupo Choiyoi (Fig. 1c, Llambías 1999). Sobreyacen en discordancia a las rocas permo-triásicas, las vulcanitas y piroclastitas de composición variada del período Cretácico-Terciario (Formación Las Chinchas, Caballé 1986), que también están intruídas por plutonitas de diversa composición.

Asociado a las etapas extensionales del magmatismo, se desarrolló la mineralización en el distrito Casposo (268-252 Ma, Grignola et al. 2020), formada por un extenso sistema de vetas epitermales dominado por tres orientaciones principales NO-SE, N-S y E-O que abarcan un área de aproximadamente 100 km<sup>2</sup> (Sotarello 2004, Grignola 2017, Palma et al. 2018). Estas poseen longitudes lineales de hasta 2 km, espesores que por sectores superan los 6 m, e inclinaciones de 60 a 75° al SO y/o subverticales (Palma et al. 2017). Dentro del corredor principal NO-SE se destacan los sectores Mercado-Kamila y a 4 km hacia el NO, la veta Julieta, actualmente minados. En el sector Kamila predominan 3 estructuras de distinta orientación que forman una zona de transferencia o *step-over*: la veta B-Vein con orientación NO-SE e inclinación al SO, Aztec de rumbo N-S e inclinación al O, e Inca que

repite el comportamiento de B-Vein (Sotarello 2004, Palma et al. 2018; Fig. 1b). Las vetas están compuestas por cuarzo, calcedonia, illita, adularia y carbonatos con texturas bandeadas coloformes, crustiformes y cocardas, con desarrollo de *ginguros*, y brechas tardías con cemento de sulfuros. Los minerales de mena son oro y plata nativa, argentita, tetraedrita, pirargirita, polibasita, galena, esfalerita, calcopirita, pirita y molibdenita (Palma et al. 2021). Por último, tanto las mineralizaciones E-O como las N-S se caracterizan por presentar espesores de hasta 1.5-2 m y corridas de hasta 1-2 km, rellenos por bandeados coloformes-crustiformes de cuarzo y calcita con *ginguros*.

## GEOLOGÍA Y MINERALIZACIÓN DEL SECTOR CERRO NORTE

La geología del distrito Casposo se resume en dos potentes secuencias piroclásticas conformadas por ignimbritas andesíticas (Sección Inferior) y dacíticas (Sección Superior) separados por una discordancia intraformacional, que alojan a la mineralización vetiforme del área. Esta secuencia es intruída por cuerpos sub-volcánicos pre y post-minerales (Fig. 1c). En el sector de Cerro Norte la Sección Superior no se

encuentra presente ya que ha sido erosionada por completo, por lo que los afloramientos están dominados por la ignimbrita de la Sección Inferior y por intrusivos pre y post-minerales (Fig. 1c y Fig. 2).

La Ignimbrita de la Sección Inferior (ISI) está compuesta por una potente secuencia piroclástica (>1000 m) de composición andesítica, rica en cristaloclastos y con un soldamiento moderado a fuerte. Hacia el techo, presenta un incremento en su contenido de pómez y alterna con niveles de *surge* (Páez

et al. 2018). Los intrusivos pre-mineralización se encuentran representados por la Dacita Casposo (DC), que es un cuerpo subvolcánico con geometría de lacolito, base concordante y techo con forma abovedada e irregular. El mismo se encuentra emplazado siguiendo la superficie de discordancia intraformacional que separa ambas secciones (Palma 2021).

La mineralización en Cerro Norte se aloja en fracturas de tensión conformando depósitos vetiformes de hasta 950 m de extensión, con rumbo preferencial E-O y disposición sub-

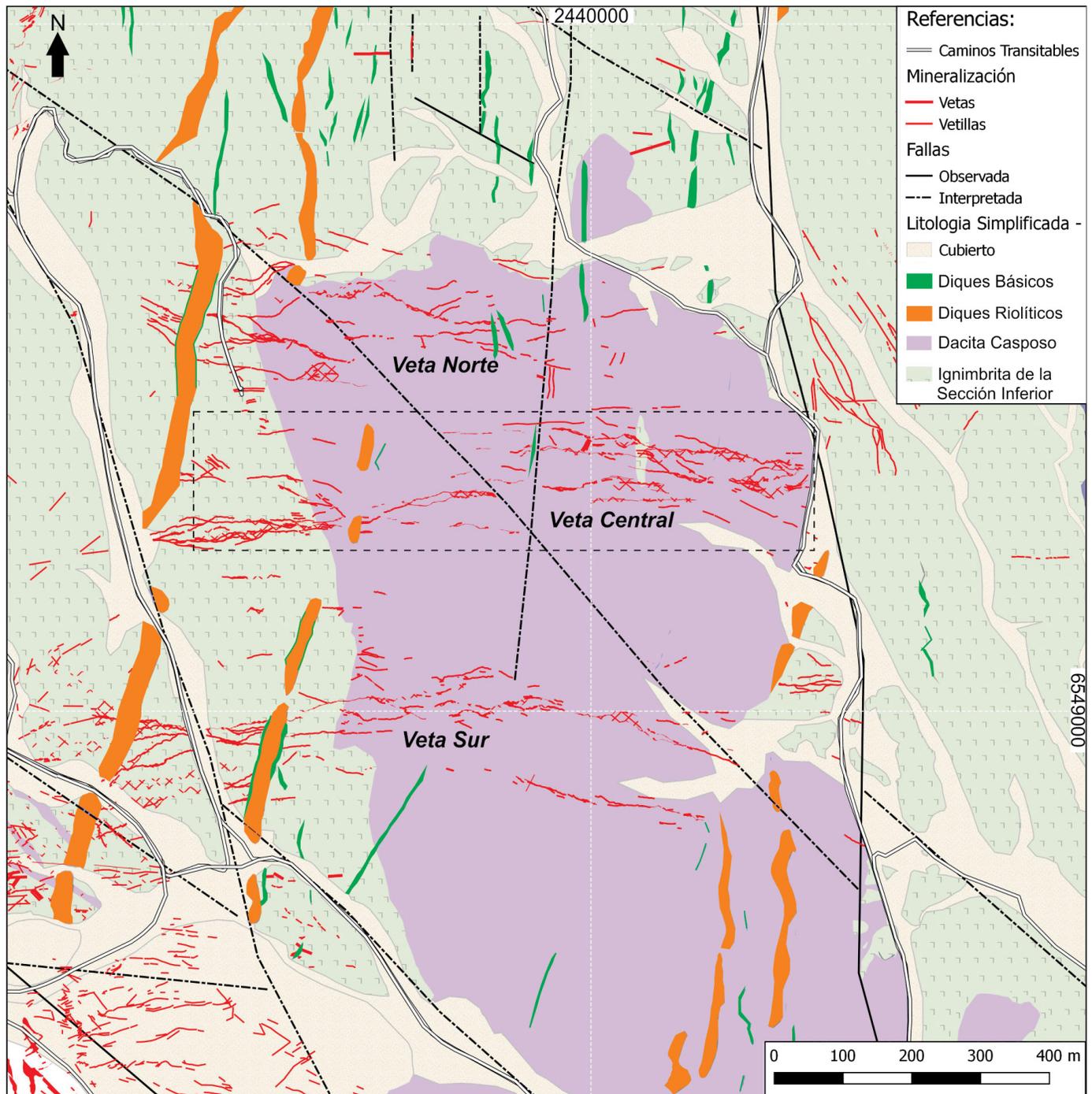
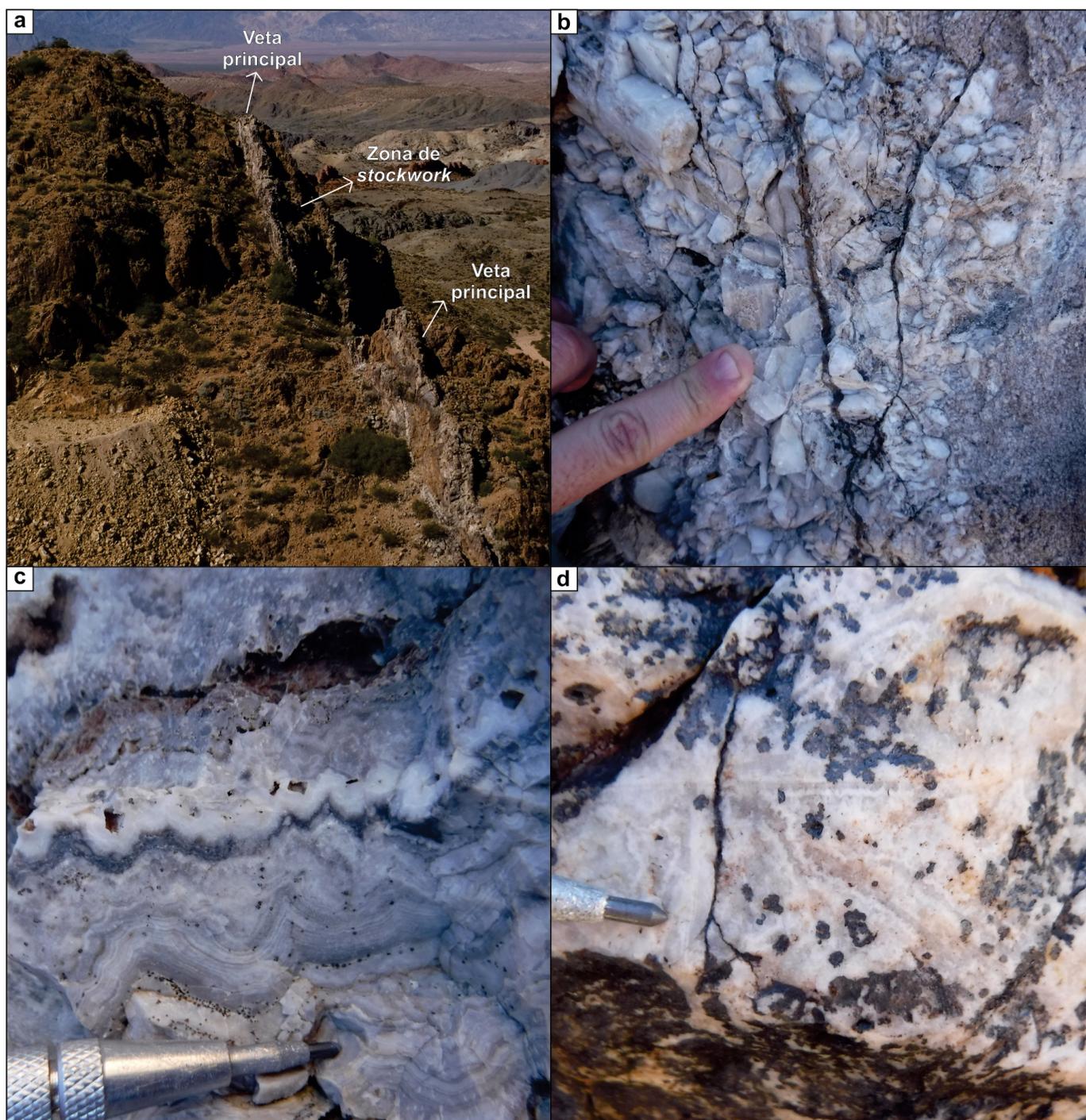


Figura 2. Mapa geológico detallado del sector Cerro Norte. En recuadro punteado ubicación del bloque de la figura 4.

verticales (tanto al N como al S, Fig. 3a). El sistema se conforma de tres vetas principales de entre 1 y 2 m de espesor denominadas Norte, Central y Sur (Fig. 2). Las mismas se presentan en afloramientos continuos desarrollando de 2 a 3 ramas paralelas en cada sector, las cuales se fusionan en una sola a partir del contacto litológico entre ISI y DC. Hacia el este, las vetas de Cerro Norte se encuentran limitadas por una falla regional de rumbo N-S. La composición de las vetas

es cuarzo-carbonática con predominio de texturas de reemplazo, bandeado coloforme, ocasionalmente con *ginguros* y brechas (Fig. 3b, c y d). La geoquímica superficial muestra altas leyes de Au y Ag en el sector de las vetas central y sur, aumentando la concentración hacia el oeste en donde la roca de caja son ignimbritas andesíticas.

Dentro de Cerro Norte, la Veta Central está conformada por dos vetas principales subparalelas, con estructura de tipo



**Figura 3.** Estructuras mineralizadas de Cerro Norte. a) Afloramiento vetiforme de disposición subvertical, vista hacia el E. b) Detalle de pulso carbonático. c) Detalle bandeado coloforme con *ginguros*, en veta silíceas. d) Detalle de texturas de reemplazo del tipo *lattice bladed*.

**Tabla 1.** Estadística descriptiva de los elementos analizados, con outliers, sin outliers hinge 1.5 y sin outliers hinge 3

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS CON OUTLIERS									
	Metales de interés					Elementos rastreadores			
	Ag	Au	Mo	Cu	Pb	Zn	As	Hg	Sb
CD ( $\sigma/X$ )	1.34	1.40	0.97	0.79	1.35	1.96	0.56	2.19	0.66
n	73	73	63	63	63	63	19	63	63
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS SIN OUTLIERS HINGE 1.5									
n outliers (1.5)	3	6	7	2	4	6	2	8	0
CD ( $\sigma/X$ )	0.72	0.73	0.52	0.47	0.82	0.58	0.52	1.60	0.65
n	70	67	56	61	59	57	17	55	63
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS SIN OUTLIERS HINGE 3									
n outliers (3)	3	3	4	2	3	3	0	7	0
CD ( $\sigma/X$ )	0.73	0.86	0.62	0.46	0.91	0.71	0.56	1.76	0.66
n	70	70	59	61	60	60	19	56	63

stockwork entre ellas, formando un paquete de 20 m de espesor (Fig. 3a). Composicionalmente, se constituye de una intercalación de cuarzo gris y blanco con menor volumen de carbonatos, con texturas brechosas, bandeados coliformes con *ginguros*, reemplazos de calcita del tipo lattice bladed (Fig. 3c y d, Palma, 2021).

Por último, los intrusivos post-minerales en la zona de Cerro Norte están representados por dos conjuntos de diques distribuidos en fajas de sentido N-S y NNE-SSO, que en base a su composición se dividen en Diques Básicos y Riolfíticos. Los Diques Básicos son rocas de coloración oscura con espesores que varían de 10 cm a 5 m, y mineralógicamente están compuestos por plagioclasas y piroxenos. Los Diques Riolfíticos resaltan topográficamente debido a que forman grandes cuerpos discordantes de coloración rojiza a anaranjada, con espesores de hasta 50 m, y compuesta por fenocristales de cuarzo, plagioclasas y feldespato alcalino. En ocasiones, en los bordes de estos, se puede observar la presencia de los Diques Básicos, formando estructuras del tipo “dique en dique” (Fig. 2, Palma 2021).

## METODOLOGÍA

A fin de estudiar los contenidos y variabilidad de elementos de interés, tanto económicos, como posibles rastreadores de la mineralización epitermal, se analizó Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Mo, As, Hg y Sb. Para evaluar la distribución de los datos, se determinaron parámetros estadísticos básicos y se representaron los resultados en diagramas *boxplot* e histogramas de frecuencia para analizar la tendencia, forma y variabilidad de las distribuciones. La correlación entre los elementos se evaluó utilizando el coeficiente de correlación de Pearson (R). Los valores obtenidos se categorizaron como de alta corre-

lación ( $R \geq 0,7$ ), media ( $0,5 \leq R < 0,7$ ), y baja o sin correlación ( $R < 0,5$ ).

Con el fin de obtener los parámetros estadísticos y analizar la variabilidad de las muestras en el espacio, se utilizaron los datos de posición espacial de cada muestra y sus resultados de análisis geoquímicos. Así, se generaron variogramas experimentales para cada uno de los elementos y se definieron los parámetros de rango, meseta y efecto pepita, datos relevantes para la construcción de las interpolaciones geoquímicas. Estos cálculos geoestadísticos fueron realizados mediante los programas GeoDA y el análisis espacial se realizó mediante SGeMS. Mediante este programa se exploraron las direcciones de anisotropía y se construyeron variogramas experimentales y se ajustó un variograma de manera visual (Cowan 2003), acorde a las direcciones de máxima anisotropía. A partir de los variogramas se obtuvieron valores de meseta (C), alcance (a) y efecto pepita (EP), que posteriormente fueron introducidos a Leapfrog Geo 2023.1 con el fin de realizar las interpolaciones mediante el interpolador FastRBF (Tabla 2).

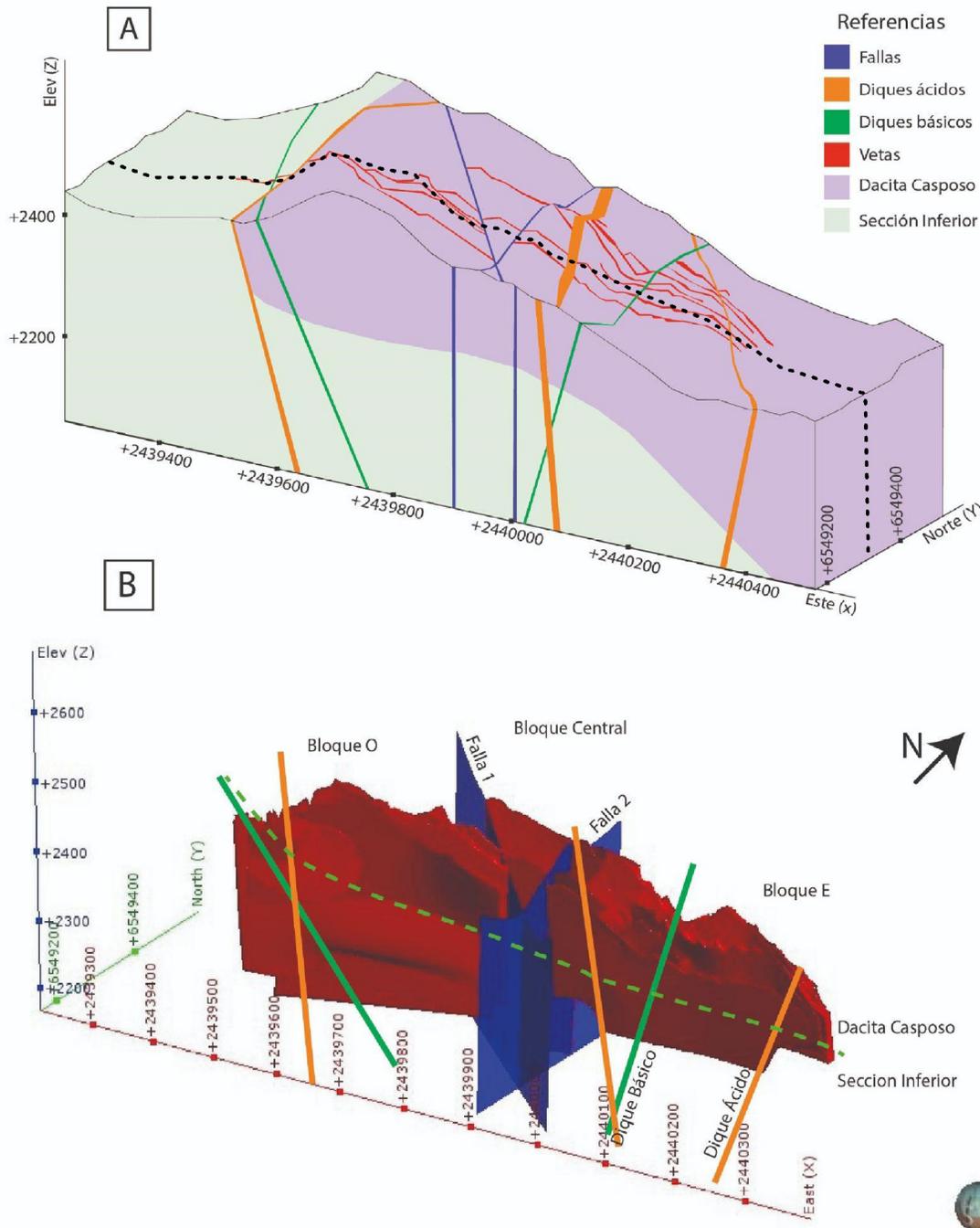
Para la construcción de los sólidos tridimensionales de la litología se generó un modelo geológico a partir de información de superficie (mapas) que se complementó con mapeo de 36 trincheras y logueo de 20 perforaciones.

Para realizar el modelado tridimensional de la veta y las interpolaciones geoquímicas se utilizó Leapfrog Geo 2023.1. Este programa permite realizar modelos geológicos tridimensionales a partir de datos de perforación y afloramiento, mediante el modelado implícito (Cowan et al. 2003, López et al. 2021). Como información base se utilizaron mapas geológicos del sector Cerro Norte, con las principales unidades litológicas y estructuras mineralizadas y se contó con información litológica y geoquímica de 18 pozos de diamantina, 1 pozo de aire reverso y 53 trincheras que delimitan el sector de estudio.

Los datos para la realización del modelo fueron brindados por la empresa Austral Gold S.A.

Las unidades litológicas de los logeos de las perforaciones fueron agrupadas en cinco categorías: (1) Ignimbritas de la Sección Inferior (ISI), (2) Dacita Casposo (DC), (3) veta, (4) Diques Riolfíticos y (5) Diques Básicos. A fin de definir la morfología de la veta, se seleccionó y asignó cada tramo mineralizado clasificado inicialmente como (3) veta en el campo de litología, una categoría correspondiente a cada rama de la

Veta Central (VC) en base a la visualización, análisis tridimensional y concentraciones geoquímicas (Cowan 2020). Para la asignación a esta unidad se consideraron los segmentos de mineralización mayores a 30 cm, separados entre sí una distancia menor a 1 m y que incluyan datos geoquímicos. De esta forma se realizó una separación de las ramas mineralizadas de la VC en unidades menores (VC1, VC2, VCn). Complementariamente, se realizaron cortes perpendiculares al rumbo de la veta donde se clasificaron los segmentos de



**Figura 4.** A) Sólidos litológicos y sistema de vetas central de Cerro norte. La línea punteada en color negro representa la traza de la sección longitudinal utilizada para las Figs. 6, 7 y 8. B) Vista oblicua del modelo de la mineralización con las fallas 1 y 2, las vetas y diques post-minerales.

**Tabla 2.** Parámetros del semivariograma utilizados, alcance (a), meseta (C) y efecto pepita (EP), para la interpolación de cada uno de los elementos considerados

	Au	Ag	Mo	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Hg
a	75	90	80	90	95	85	110	55	85
C	12	1.2	6	30	25	130	600	3000	0.002
EP	2	0.5	3	10	5	50	100	1000	0.001

cada unidad menor. Finalmente, mediante polilíneas se ajustó la morfología de las estructuras en las zonas donde se carecía de información.

Los Diques Básicos y Riolíticos se modelaron de la misma forma que la Veta Central, pero en este caso se reclasificaron los segmentos de diques. Por último, las fallas que afectan a la Veta Central se digitalizaron con polilíneas siguiendo los rumbos de las fallas sobre el mapa geológico y se les asignó una inclinación subvertical.

Para delinear las anomalías geoquímicas se utilizaron únicamente los datos de geoquímica correspondientes a VC, excluyendo la roca de caja y se consideraron los límites de las vetas como límites duros para las interpolaciones. El método utilizado fue el *FastRBF*, que sirve como estimador de la información en cualquier punto del espacio definida que utiliza de base un algoritmo optimizado para modelos 3D (Cowan et al. 2003).

## RESULTADOS

A fin de estudiar los contenidos y variabilidad de elementos de interés (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Mo, As, Hg y Sb), se realizó un análisis univariado para identificar valores anómalos donde se determinó la existencia de valores por fuera de los bigotes tanto en 1.5 y en 3 (Tabla 1). Con el coeficiente de correlación de Pearson, se evaluaron las relaciones lineales entre los elementos analizados (Tabla 3). Las variables mostraron una correlación positiva alta en los pares, Au-Cu, Pb-Zn, As-Zn, y Mo-Zn, lo que sugiere que estos elementos podrían estar influenciados por procesos geoquímicos similares. Por otro lado, se identificó una correlación positiva media entre los pares Au-Ag, Ag-Cu, Pb-Cu, Pb-As, y Au- Hg, Mo-As. El resto de los pares analizados presentan correlaciones bajas o sin correlación, indicando que no presentan una relación lineal significativa. El Sb mostro mayormente leves correlaciones negativa con los elementos analizados.

Tanto la ISI como la DC están atravesadas por diques ácidos y básicos y afectadas por fallas post-mineralización (Fig. 4a). La Falla 1 presenta un rumbo NO-SE, mientras que la Falla 2 rumbo NE-SO; ambas presentan fuertes inclinaciones llegando a ser subverticales a verticales.

Dentro del sistema de tres vetas principales que conforman el sector de Cerro Norte, la Veta Central (VC) es la más extensa y presenta una longitud de 950 m de largo. Esta veta aflora continuamente con rumbo general E-O que se desarrolla en superficie en 2 a 3 ramas paralelas y se fusionan en una sola estructura en profundidad. En el modelo tridimensional se determinó que esta fusión se resuelve en el contacto entre la ISI y la DC (Figs. 4b, 5c).

La VC se encuentra separada en tres bloques: Oeste (O), Central (C) y Este (E)(Fig. 5) delimitados por las Fallas 1 y 2 (Fig. 4a, b). Se observa que la Falla 1 tiene una componente principalmente sinistral (Fig. 4a) mientras la Falla 2 que separa los bloques Central y Este no registra un rechazo significativo. En el área modelada afloran dos diques ácidos y presentan una orientación similar a la de las fallas. En corte transversal del modelo geológico generado, se reconoce que la VC en el bloque central es vertical a subvertical, mientras que en los bloques E y O las inclinaciones alcanzan los 70° a 80° hacia el N (Fig. 5).

Para la realización de las interpolaciones geoquímicas se seleccionaron como elementos de interés los metales preciosos (Ag, Au; Fig. 6), metales base (Cu, Pb, Zn) y el Mo (Fig. 7). Además, se incluyeron las interpolaciones de elementos rastreadores en sistemas epitermales As, Hg, Sb (Fig. 8). A fin de lograr una mejor interpretación de la distribución de cada elemento en el sistema se realizó un corte longitudinal O - E sobre la coordenada N 6549300.

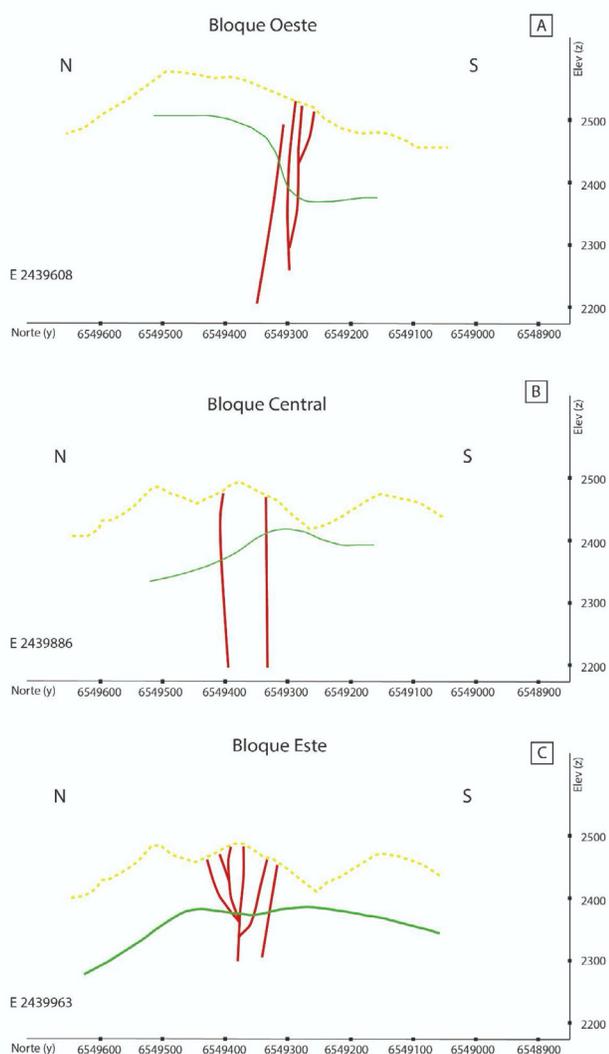
Con la información geoquímica de superficie y de muestras de las perforaciones se determinó que las mayores con-

**Tabla 3.** Tabla con el coeficiente de Pearson entre los elementos analizados. Se resaltan en negrita los valores considerados como de correlación alta y media a alto según la categorización presentada en la metodología.

	Au	Cu	Pb	Zn	As	Hg	Mo	Sb
Ag	0.5	0.6	0.4	0.2	0.1	0.4	0	-0.2
Au		0.7	0.3	0.2	0	0.5	0.2	0
Cu			0.5	0.3	0.2	0.4	0.2	-0.1
Pb				0.7	0.5	0.4	0.4	-0.1
Zn					0.7	0.3	0.8	-0.1
As						0.2	0.6	-0.1
Hg							-0.1	0
Mo								0
Sb								

centraciones de Ag se encuentran en los bloques O y E y conforman tres sectores con leyes anómalas (>12 ppm). El mayor de ellos aflora en el bloque Oeste, mientras que se identifica otro sector de menor tamaño en el mismo bloque, pero a cota 2350 m, cortado por la Falla 1. El tercero se encuentra en el bloque Este, debajo del contacto ISI-DC.

En la distribución de Au, se registraron concentraciones elevadas, superiores a 1.5 ppm, distribuidas en los bloques O y E de la VC. En el bloque O, se identificaron dos zonas principales de alta concentración que se extienden desde la superficie hasta los 2430 m s.n.m. La primera, ubicada en el límite occidental de la veta, presenta concentraciones superiores a 2.5 ppm, siendo la de mayor extensión. Esta anomalía coincide con la intersección de diques ácidos y básicos, así como con el contacto litológico entre la ISI y el DC. La se-



**Figura 5.** Secciones transversales representativas de cada uno de los bloques que conforman el sistema de vetas de Cerro Norte. La línea amarilla representa la topografía, mientras que la línea verde indica el contacto en la DC y la ISI.

gunda zona, de menores dimensiones, se encuentra mayoritariamente sobre el contacto DC y es interrumpida por la Falla 1. En el bloque E se observa un sector con valores superiores a 2.5 ppm, con una extensión de 100 m y se encuentra a una cota por debajo de los 2.350 m s.n.m en la ISI. Un segundo sector son valores superiores a 2 ppm se encuentra por encima del contacto entre DC y ISI y aflora cercano al dique ácido.

En cuanto a los metales base, el Cu presentó sus mayores concentraciones en la ISI con valores anómalos superiores a 21 ppm en el bloque Oeste. Estas anomalías se encuentran hacia el extremo occidental de la veta, próximas a la intersección de diques y el contacto litológico ISI-DC. A diferencia del Au, el clavo del Cu está más desarrollado en la ISI. Otra zona anómala se localiza en las cercanías del contacto con la Falla 1, tanto en superficie como en niveles más profundos, alrededor de los 2350 m s.n.m. En el bloque Este hay una concentración de Cu de menor ley (14 a 21 ppm) sobre la misma cota en contacto con un dique ácido.

Las anomalías de Pb presentan una distribución similar a la del cobre concentrándose principalmente por debajo del contacto ISI-DC. Las mayores concentraciones, superiores a 15 ppm, se encuentran en zonas profundas (por debajo de los 2400 m s.n.m.), permaneciendo abiertas en profundidad en el bloque E. En los bloques O y E, se detectaron valores anómalos en zonas superficiales, específicamente en trincheras. Los valores de Zn presentan un comportamiento análogo al Pb en los bloques O y Central, mientras que en el bloque E es similar al Cu. Las concentraciones mayores a 40 ppm se extienden a lo largo de 150 m en la veta y se encuentran abiertas en profundidad a partir de los 2350 m en el bloque E. El Mo presenta bajas concentraciones, los mayores valores anómalos se registran en el bloque E alrededor del contacto ISI-DC.

Finalmente, se analizó la distribución espacial en la veta de los elementos rastreadores. Los mayores contenidos de As y Hg se encuentran en niveles profundos, por debajo de 2370 m y concentrados en la falla que limita el bloque Oeste y Centro, mientras que en el bloque Este las concentraciones elevadas de ambos elementos se encuentran en la misma cota pero presentan una mayor distribución. En el extremo occidental del bloque O también hay anomalías de As que superan los 125 ppm relacionados a los diques o próximos al contacto con la DC mientras que el Hg en esta zona presenta valores muy bajos, menores a 1 ppm. El Sb mostró un patrón diferente, y se encuentra principalmente en las zonas someras de la veta. Las mayores concentraciones se ubican en la DC, y los valores en ISI son menores a 10 ppm.

## DISCUSIONES

Los modelos tridimensionales geológicos-geoquímicos se configuran como una importante herramienta para el estudio de la distribución de elementos en sistemas epitermales vetiformes (Clark y Gemmell 2018, López et al. 2021, Fernández 2022), y en particular para vetas del distrito Casposo (Palma et al. 2023). La determinación de la distribución de metales, puede permitir establecer una vectorización y zonificación que mejore el entendimiento y exploración de estos depósitos, así como determinar los canales y las condiciones físico-químicas de su transporte y precipitación (Hedenquist et al. 2000, Clark y Gemmell 2018). Su distribución depende de factores propios del fluido hidrotermal como la concentración inicial,

la temperatura y presión, procesos como la ebullición (White y Hedenquist 1990, Hedenquist et al. 2000), factores tectónicos (Sanchez-Alfaro et al. 2016) y factores extrínsecos, como la interacción con la roca de caja, procesos supergénicos o removilización tectónica (Páez et al. 2011, Jovic et al. 2019, Kaewpaluk et al. 2023).

El modelo geológico tridimensional de la Veta Central del sector Cerro Norte permitió reconstruir las unidades correspondientes a la DC y la ISI, identificar el contacto entre esas unidades, y reconstruir la extensión y geometría de la principal estructura mineralizada, al integrar información de superficie y subsuelo. Finalmente, se logró modelar las fallas y los diques post-mineralización. Del modelo resultante se desprende que las anomalías de los elementos de interés se

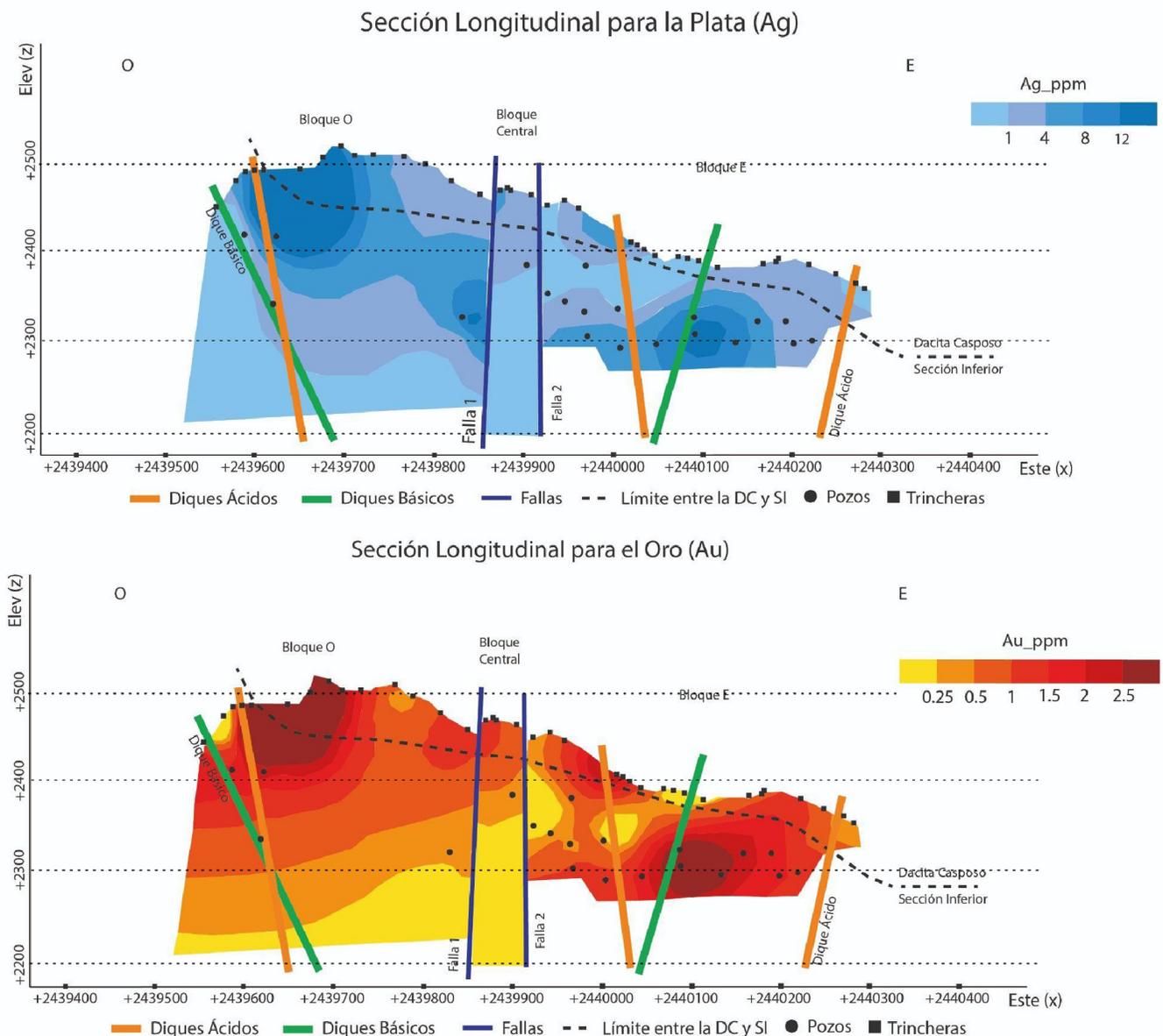
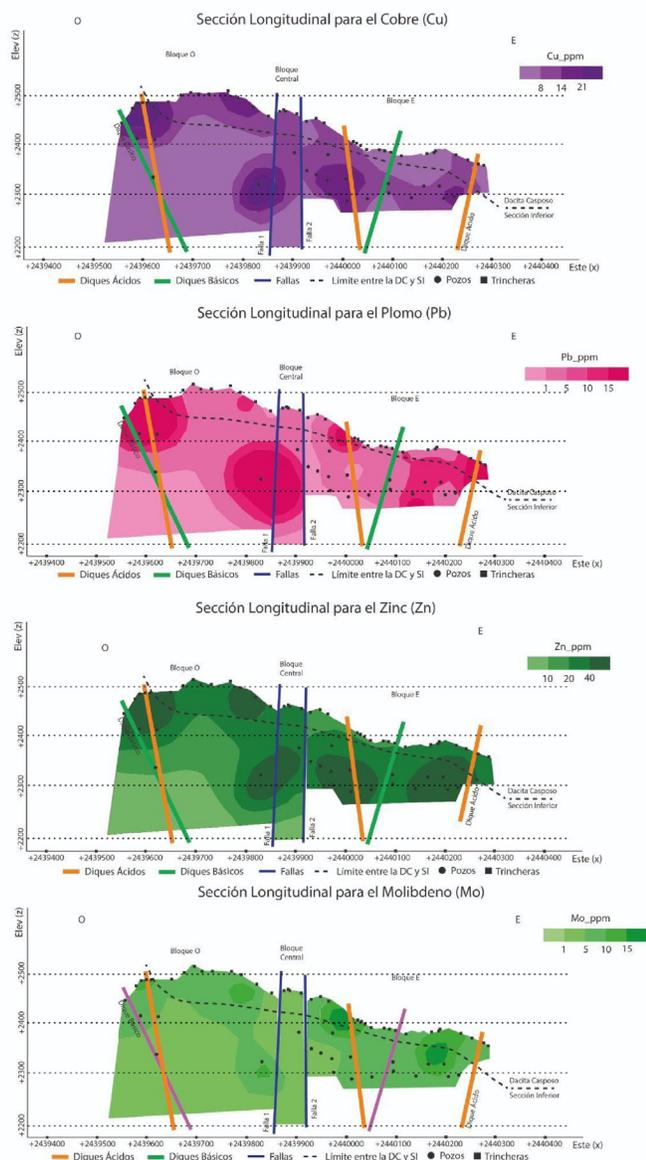


Figura 6. Sección longitudinal de veta Cerro Norte Central con isovalores de Ag (ppm) y Au (ppm).



**Figura 7.** Sección longitudinal de veta Cerro Norte Central con isovalores de Cu (ppm), Pb (ppm), Zn (ppm) y Mo (ppm).

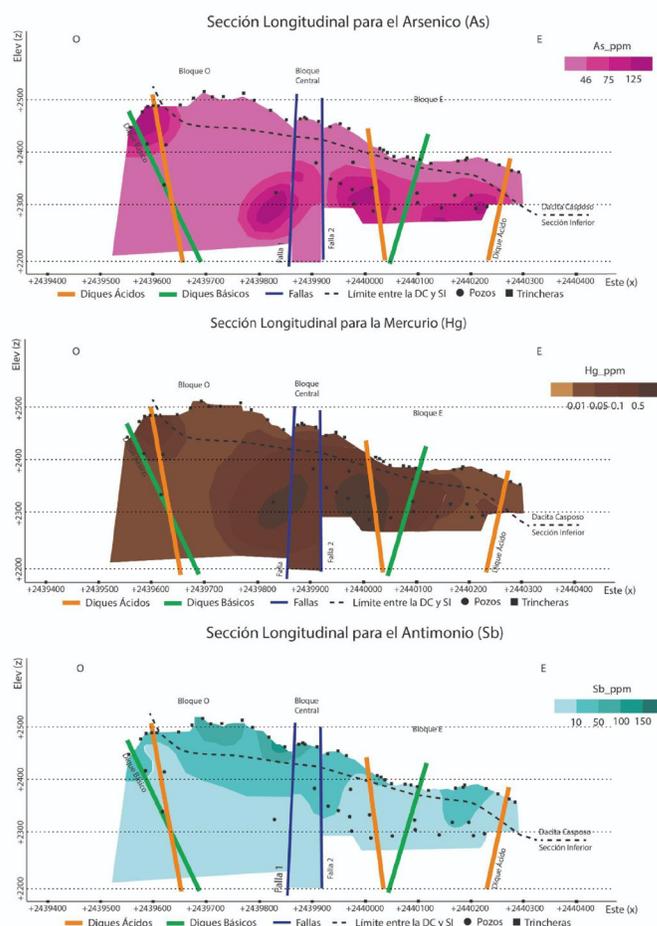
concentran en forma distinta en tres bloques definidos dentro de la Veta Central: bloques Oeste, Central y Este.

Los metales preciosos en sistemas epitermales suelen ser más abundantes en las zonas someras del sistema, mientras que en profundidad aumenta transicionalmente el contenido de metales base (Clark y Gemell 2018). Este comportamiento geoquímico puede observarse parcialmente en la VC. En las zonas profundas de los bloques O y E, la Ag y los metales base, desarrollan clavos extensos relacionados espacialmente a las fallas 1 y 2. Sin embargo, tanto los metales preciosos como los metales base presentan una elevada concentración en zonas someras del bloque O, vinculado espacialmente al contacto litológico ICI-DC. En el bloque E las concentraciones de estos metales se hayan principalmente por debajo de la cota 2350 y

por debajo del contacto litológico mencionado. Esta diferencia entre los bloques podría explicarse si la falla 1 y en menor medida la 2, produjeron el ascenso relativo del bloque O elevando el sistema mineralizado hacia la actual superficie.

Respecto a los metales preciosos, se determinó que el Au presenta una distribución con un clavo definido y abierto en profundidad en el bloque Este por debajo de cota de 2300 m s.n.m, pero que las concentraciones se extienden hasta superficie en los tres bloques. En el bloque O se observa que las mayores concentraciones disminuyen progresivamente desde la superficie hacia las cotas menores. El Mo se encuentra también vinculado espacialmente al contacto litológico ICI-DC.

Al analizar la distribución espacial de los elementos seleccionados para la Veta Central, se reconocen zonas de enriquecimiento de metales en los sectores donde aflora la ISI y en profundidad donde esta roca predomina. Para el caso particular del Au y la Ag se observa que en el bloque O las mayores concentraciones de 2.5 ppm de Au y 12 ppm de Ag se encuentran en superficie tanto en DC como en ISI mientras



**Figura 8.** Sección longitudinal de veta Cerro Norte Central con isovalores de As (ppm), Hg (ppm) y Sb (ppm).

que en el bloque E las mayores concentraciones predominan en ISI, con clavos abiertos en profundidad por debajo de los 2300 m s.n.m.

Para el caso de los metales base se observa que en el bloque Oeste y Central la distribución de los tres elementos es similar, con los clavos desarrollados espacialmente vinculados a la ISI y a las zonas de falla. Sin embargo, el bloque E presenta diferencias significativas en la distribución de elementos, ya que tanto el Cu como el Zn exhiben una zona de alta ley distribuida por debajo del límite DC-ISI, mientras que el Pb con pequeñas zonas de alta concentración distribuidas tanto en DC como en ISI.

La distribución de los elementos presentada permite inferir que las mayores concentraciones de los metales analizados son encuentran por debajo o en el contacto entre ICI-DC. Esta distribución puede explicarse debido a diferencias en la competencia y permeabilidad de estas unidades. Una posible alternativa, que puede complementarse con esta explicación podría ser el desarrollo de un nivel subhorizontal ubicado actualmente en la cota de 2350 en el bloque E, que limitó la extensión de los clavos mineralizados hacia la superficie. Este nivel podría representar un control hidráulico durante el desarrollo del sistema hidrotermal. Asimismo, la distribución de concentraciones elevadas de metales por encima de este nivel podría explicarse por su asociación espacial a las fallas o con los diques post-minerales. Por lo tanto, el ascenso de los fluidos hidrotermales habría utilizado fracturas que luego fueron reutilizadas por las fallas y durante el emplazamiento de los diques ácidos y básicos.

En los sistemas epitermales el estudio de la distribución de los elementos rastreadores se basa en análogos a sistemas geotermales (Buchanan 1981, White y Hedenquist 1995, Simmons et al. 2005). El estudio de la distribución de del As y el Hg muestran una concordancia con el resto de los elementos ya que sus principales leyes se encuentran en la ISI. Una posible explicación de la distribución acotada y concentrada en profundidad es que estos elementos se concentran en minerales primarios como la tetraedrita-tennantita para el caso del As, como ocurre en la Veta Inca del sector Kamila (Palma 2021); aunque para la Veta Central, esta inferencia requiere confirmación mediante estudios mineralógicos detallados. Respecto al Hg, cuyos valores son muy bajos, no es frecuente la presencia de minerales que contienen Hg en la zona primaria, sin embargo, han sido reconocidos valores anómalos en pirita (Abraitis et al. 2004) y esfalerita hidrotermal (Cook et al. 2009). La correlación negativa del Sb con el resto de los elementos analizados determinada con el coeficiente de Pearson, podría obedecer a que la distribución del Sb no muestra una concordancia con el resto de los elementos, a

excepción parcialmente con el Au en superficie).

La correlación media-alta entre los metales preciosos se ve reflejada en su distribución espacial. Ambos elementos muestran un patrón de dispersión similar, aunque el Au tiende a presentar anomalías ligeramente más elevadas hacia la superficie, tanto en el bloque Oeste como en el Este. En general, estos metales son más abundantes en las zonas someras del sistema epitermal, mientras que los metales base tienden a concentrarse a mayores profundidades (Clark y Gemmell, 2018). Este comportamiento no solo se evidencia en los coeficientes de correlación, con valores medios y altos entre los pares Pb-Zn y Pb-Cu, sino también en la distribución de estos elementos en los perfiles longitudinales.

La permeabilidad del macizo rocoso es un factor determinante para el transporte y depositación de los fluidos hidrotermales mineralizantes, siendo las fallas los planos de mayor permeabilidad y, por ende, el principal medio de circulación de los fluidos, demostrando que los rasgos estructurales son el principal control sobre la mineralización (Kim et al. 2003, Sibson 1996). Estas zonas de mayor concentración se interpretan como los sectores de mayor apertura localizada. Por otro lado, la veta se desarrolla principalmente encajada en dos litologías con un contacto levemente inclinado al Este entre ellas. El límite entre ambas unidades coincide con un cambio en la yacencia de la mineralización; desde el contacto litológico DC-ISI hacia la superficie, las estructuras mineralizadas se caracterizan por ser vetillas finas y ramificadas, mientras que, desde esa superficie hacia niveles más profundos, estas vetillas se fusionan en una única estructura individual en profundidad (Fig. 5c). Esta diferencia en el desarrollo de vetas individuales a vetillas más densas hacia las porciones más someras, podría responder a la variación en la competencia de las unidades entre los sectores someros y profundos debido a la variación en su fábrica. Esta variabilidad de las geometrías de las estructuras ha sido identificada en otros sectores del distrito como veta Inca (Palma 2021) y veta Julieta (Palma et al. 2023), sumado a otros depósitos vetiformes de baja sulfuración como Martinetas, Mina Don Nicolas, en el Macizo de Deseado (De Martino et al. 2022).

## CONCLUSIONES

La generación de un modelo tridimensional implícito ha sido de gran importancia para la reconstrucción de la Veta Central del sector Cerro Norte, así como también para entender la litología y estructura vinculada a la misma. Este modelo integró información de superficie (mapeos y trincheras) y de subsuelo (perforaciones). A su vez el modelado permitió re-

presentar de manera consistente la distribución de los clavos mineralizados para las variables de interés.

Las altas concentraciones de Au, Ag, metales base y Mo se dan en profundidad en el bloque E, distribuidos principalmente por debajo del contacto ISI-DC y relacionados a fallas y diques post-mineralización. En el bloque O las mayores concentraciones de Au son superficiales y se vinculan al contacto ICI-DC, mientras que la Ag y metales base también presentan concentraciones elevadas en profundidad en el contacto con la Falla 1. Por otro lado, los elementos rastreadores (Hg, As, Sb) se encuentran en concentraciones elevadas en superficie, aunque en el As y Hg alcanzan mayores concentraciones en zonas profundas, probablemente como elementos traza en minerales de mena. Esta asociación de elementos y su distribución, es típica de yacimientos epitermales de baja sulfuración que coincide con lo descrito para las vetas de Cerro Norte (Medrano 2018).

La distribución de los clavos mineralizados permitió establecer la conjunción de un control estructural y litológico en el depósito. La zona con mayor concentración de metales de interés es ISI tanto en superficie como en profundidad, corroborando lo expresado por Palma (2021) para otros *targets* dentro del distrito El contraste entre las rocas de caja (ISI y DC) con distinta competencia y/o permeabilidad influyó en la geometría de las estructuras mineralizadas y puede haber favorecido la precipitación de los metales. Además la relación espacial de los clavos con las fallas y/o diques sugiere que estas estructuras podrían haber jugado un rol importante en el transporte de los fluidos.

## AGRADECIMIENTOS

Estamos agradecidos con la empresa Austral Gold S.A. quien no ha cedido la información geoquímica para poder llevar adelante este trabajo y a la empresa Seequent por brindarnos la licencia de Leapfrog Geo con el cual fueron generados los modelos tridimensionales. Agradecemos especialmente a los revisores María Liz Fernández y Ramón Aguirre Maturana, cuyos valiosos aportes permitieron mejorar sustancialmente el manuscrito y el material gráfico. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a los editores por su acompañamiento durante todo el proceso de revisión.

## REFERENCIAS

Abraitis, P.K., Patrick, R.A.D., Vaughan, D.J. 2004. Variations in the compositional, textural and electrical properties of natural pyrite: A review. *Int. J. Miner. Process.* 74, 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2003.09.002>

- Álvarez, P.P. 1996. Los depósitos triásicos y jurásicos de la Alta cordillera de San Juan. En Ramos, V.A, Aguirre Urreta, M.B., Alvarez, P.P., Cegarra, M.I., Cristallini, E.O., Kay, S.M., Lo Forte, G.L., Pereyra, F.X. y Pérez, D.J. (ed.) *Geología de la región del Aconcagua, provincias de San Juan y Mendoza*. Subsecretaría de Minería de la Nación. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Anales 24 (5): 59-137, Buenos Aires.
- Amos, A.J., Marchese, H.L. 1965. Acerca de una nueva interpretación de la estructura del Carbónico en la Ciénaga del Medio. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 20: 263–270.
- Aruga, M., Imai, A. 2024. Role of boiling for the formation of vertical metal zoning and bonanza zone in low-sulfidation epithermal gold-silver deposits: A geochemical modeling approach. *Journal of Geochemical Exploration*, 257(December 2023), 107378. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107378>
- Azcuy, C.L., Caminos, R. 1987. Diastrofismo. In: Archangelsky, S. (Ed.), *El Sistema Carbonífero en la República Argentina*. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, Córdoba, pp. 239-251.
- Azcuy, C.L., Carrizo, H.A., Caminos, R. 1999. Carbonífero y Pérmico de las Sierras Pampeanas, Famatina, Precordillera, Cordillera Frontal y Bloque de San Rafael. En: Caminos, R. (Ed), *Geología Argentina*. Inst. Geol. Recur. Miner. An. 29, 261-318. Buenos Aires.
- Basson, I. J., Anthonissen, C. J., McCall, M. J., Stoch, B., Britz, J., Deacon, J., Strydom, M., Cloete, E., Botha, J., Bester, M., Nel, D. 2016. Ore-structure relationships at Sishen Mine, Northern Cape, Republic of South Africa, based on fully-constrained implicit 3D modelling. *Ore Geology Reviews*, 86, 825–838. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.007>
- Caballé, M.F. 1986. Estudio geológico del sector oriental de la Cordillera Frontal entre los ríos Manrique y Calingasta (Provincia de San Juan). Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, (inédita). 205p, La Plata.
- Caminos, R.L. 1979. Cordillera Frontal. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Acad. Nac. Ciencias Córdoba I, 398-453 (Córdoba). Caminos, R.; Cordani, U.G.; Linares, E. 1979. Geología y geocronología de las rocas metamórficas y eruptivas de la Precordillera y Cordillera Frontal de Mendoza, República Argentina. En Congreso Geológico Chileno, No. 2, Actas, Vol. 1, p. F43-F61. Arica.
- Camrubi, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J. y Carrillo-Chávez, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 56(1): 10-18.
- Clark, L. V., Gemmel, J. B. 2018. Vein stratigraphy, mineralogy, and Metal zonation of the Kencana low-sulfidation epithermal Au-Ag deposit, Gosowong Goldfield, Halmahera Island, Indonesia. *Economic Geology*, 113(1), 209–236. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4549>.
- Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., Danyushevsky, L., Saini-Eidukat, B., Melcher, F., 2009. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study. *Geochim. Cosmochim. Acta*

- 73, 4761–4791. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045>
- Corbett, G.J., Leach, T.M. 1997. Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, Alteration, and Mineralization. Short course manual: 318 p.
- Cox, S.F. 2005. Coupling between deformation, fluid pressures and fluid flow in ore producing hydrothermal systems at depth in the crust. *Economic Geology 100th Anniversary volume*: 1-35.
- Cowan, E.J., Beatson, R.K., Ross, H.J., Fright, W.R., McLennan, T.J., Evans, T.R. y Tittley, 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.
- Ebert, S.W. Rye, R.O. 1997, Secondary precious metal enrichment by steam-heated fluids in the Crofoot-Lewis hot spring gold-silver deposit and relation to paleoclimate: *Economic Geology*, v. 92, p. 578–600.
- Espina, R, Cegarra, M., Ragona, D., Gonzalez, P., Lo Forte, G. 1998. Hoja 3169-20 Castaño Nuevo, Provincia de San Juan. Secretaría de Minería de la Nación, SEGEMAR, Mapa Escala 1:250.000, Buenos Aires.
- Fernández, M. L., Franchini, M., Mazzoli, S., Caffè, P. J., Garrone, A. 2022. The Au–Ag (Zn, Pb, Mo, Cu) Sulfuro Vein, La Paloma district, Deseado Massif, Argentina: Geochemical characterization and new insights into the 4D evolution of ore shoots. *Journal of Geochemical Exploration*, 241. 107053.
- Furque, C., Baldis, B.A. 1973. Nuevos enfoques estratigráficos en el Paleozoico del Noroeste de la Cordillera. V Congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca, Vol III: 241-252.
- Garcés Aguilar, P.P. 2013. Nuevas evidencias de mineralización en el sector de Casposo Norte yacimiento Casposo, Departamento Calingasta, San Juan-Argentina. Trabajo final de Licenciatura de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Departamento de Geología, Universidad Nacional de San Juan, (inédito), 124 p., San Juan.
- Grignola, S., Hagemann, S., Fogliata, A. S., Miller, J., Jourdan, F., Ford, A., Santos, J. O., Sotarello, G. Belvideri, I. 2021. The Casposo gold-silver deposit: Evidence for permo-triassic low-sulfidation epithermal mineralization in the Cordillera Frontal, San Juan Province, Argentina. *Economic Geology*, 116 (1), 227–239.
- Groeber, P. 1951. La Alta Cordillera entre las latitudes 34° y 29°30'. *Revista del Instituto Nacional de Investigaciones de las Ciencias Naturales*, Museo Argentino de Ciencias Naturales “Bernardino Rivadavia”, *Geología* 1: 235-352, Buenos Aires.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. Jr., y Gonzales-Urien, E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits: *Reviews in Economic Geology*, v. 13, p. 245-277.
- Heredia, N., Rodríguez Fernández, L.R., Gallastegui, G., Busquets, P., Colombo, F. 2002. Geological setting of the Argentine Frontal Cordillera in the flat-slab segment (30°00' to 31°30' S latitude). In: Ramos, V., McNulty, B. (Eds.), *Flat Subduction in the Andes*. *J. South Am. Earth Sci.* 15, 79-99.
- Hervé, F., Godoy, E., Parada, M., Ramos, V, Rapela, C., Mpodozis, C., Davidson, J. 1987. A general view of the Chilean-Argentine Andes, with emphasis on their early history. En: J. Monger y J. Francheteau (eds.). *Circumpacific orogenic belts and evolution of the Pacific Ocean basin*. *Geodynamic series*, 18, 97-113.
- John, D.A., Vikre, P.G., du Bray, E.A., Blakely, R.J., Fey, D.L., Rockwell, B.W., Mauk, J.L., Anderson, E.D., and Graybeal, F.T. 2018. Descriptive models for epithermal gold-silver deposits: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–Q, 247 p.
- Jovic, S. M., Páez, G. N., Permuy Vidal, C., López, L. y Guido, D. M. 2019. Brechas tectónico-hidrotermales en sistemas epitermales. 13° Congreso de mineralogía, petrología ígnea y metamórfica y metalogénesis, Actas: 320-321, Córdoba.
- Kay, S.M., Ramos, V.A., Kay, R., 1984. Elementos mayoritarios y trazas de las vulcanitas ordovícicas en la Precordillera occidental: Basaltos de rift oceánicos tempranos (?) próximos al margen continental. IX° Congreso Geológico Argentino. Actas 2,48-65.
- Kaewpaluk, S., Assawincharoenkij, T., Hauzenberger, C., Salam, A. 2023. Geochemical vectors to ore and environmental significance at the Chatree epithermal low-sulfidation deposit, Thailand. *International Journal of Earth Sciences*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00531-023-02367-6>
- Leapfrog Geo 4.3: [www.leapfrog3d.com](http://www.leapfrog3d.com)
- Llambías, E.J., Kleiman, L.E., Salvarredy, J., 1993. El magmatismo Gondwánico. In: Ramos, V.A. (Ed.), *Geología y Recursos Naturales de Mendoza*, Relatorio 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Mendoza, pp. 53-64.
- Llambías, E.J., Sato, A. 1990. El batolito de Colanguil (29°-31°S) Cordillera Frontal de Argentina: estructura y marco tectónico. *Rev. Geol. Chile* 17 (1), 89-108. Santiago de Chile.
- Llambías, E.J., Sato, A. 1995. El batolito de Colanguil: transición entre orogénesis y anorogénesis. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 50 (1-4), 111-131. Buenos Aires.
- Llambías, E.J., Sato, A. 2011. Ciclo Gondwánico: la provincia magmática Choiyoi en Neuquén. In: Relatorio XVIII Congreso Geológico Argentino, pp. 53-62.
- López de Azarevich, V.L., Escayola, M., Azarevich, M.B., Pimentel, M.M., Tassinari, C. 2009. The Guarguaraz Complex and the evolution of southwestern Gondwana: geochemical signatures and geochronological constrains. *J. South Am. Earth Sci.* 28, 333-344.
- López V.L., Gregori, D.A. 2004. Provenance and evolution of the Guarguaraz Complex, Cordillera Frontal, Argentina. *Gondwana Research* 7: 1197-1208.
- López, L., Jovic, S., Lapcak, B., Páez, G. N., Guido, D. 2021. Modelado geológico y geoquímico tridimensional de la veta Marta Norte, depósito Pingüino, Macizo del Deseado. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 78(1), 87-101.
- Maksaev, V., Moscoso, R., Mpodozis, C. y Nasi, C. 1984. Las unidades

- volcánicas y plutónicas del Cenozoico superior en la Alta Cordillera del Norte Chico (29°-31°S), Geología, alteración hidrotermal y mineralización. *Revista Geológica de Chile* 21: 11-51.
- Martínez, A., Giambiagi, L., 2010. Evolución petrológica y geoquímica del magmatismo bimodal Permo-Triásico del Grupo Choiyoi en el cordón del Portillo, Mendoza, Argentina. *Universidad de Oviedo*, 30: 432-451.
- Mao, X., Zhang, W., Liu, Z., Ren, J., Bayless, R. C., 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(3), 1–21.
- Medrano, O., 2018. Potencial minero de la veta Carlota del Proyecto Cerro Norte, Distrito Minero Casposo, San Juan. Trabajo final de Licenciatura en Geología, Universidad Nacional del Sur.
- Miller, J., 2011. Structural controls on the Casposo gold–silver mineralization, Casposo Region, Argentina. Informe Interno de la Compañía Troy Resources Ltd. 54p. San Juan, Argentina.
- Moncada, D., Baker, D., Bodnar, R. J. 2017. Mineralogical, petrographic and fluid inclusion evidence for the link between boiling and epithermal Ag-Au mineralization in the La Luz area, Guanajuato Mining District, México. *Ore Geology Reviews*, 89, 143–170. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.024>
- Mpodozis, C. Kay, S.M., 1990. Provincias magmáticas ácidas y evolución tectónica de Gondwana: Andes Chilenos 28°-3 1'. *Revista Geológica de Chile*, 17 (2),153-180.
- Ottone, E.G., Barreda, V.D. y Pérez, D.J. 1998. Basin evolution as reflected by Miocene palynomorphs from the Chinchas Formation, Frontal Cordillera (32° S), San Juan province, Argentina. *Revista Española de Micropaleontología* 30: 35-47.
- 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.
- Palma, D. S. 2021. Caracterización de las fases minerales y los fluidos hidrotermales presentes en el Distrito Casposo, Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (inédito), 253 p., La Plata.
- Palma, D. S., Ruiz, R., Jovic, S.M., Guido, D. M., De Martino, F.J. 2021. Molibdenita dendrítica del depósito epitermal (Ag-Au) Casposo, Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. Detección a partir de espectrometría Raman. *Revista de la Asociación Geológica Argentina (RAGA)*, 78 (1), p. 121-126.
- Palma, D.; Jovic, S.; Guido, D.M.; Ruiz, R.; Páez, G.; Permuy Vidal, C.; Sotarello, G.; López, L. 2017. Evolución de eventos mineralizantes en la veta Julieta, Distrito Casposo, Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. In Congreso Geológico Argentino, No. 20, Actas: ST9-92-98. Tucumán.
- Peralta, L. R. 2008. Geología y mineralización del sector Leñador NW Proyecto Casposo - San Juan Argentina -. Trabajo final de Licenciatura de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Departamento de Geología, Universidad Nacional de San Juan, (inédito), 110 p., San Juan.
- Polanski, J. 1970. Carbónico y Pérmico de la Argentina. EUDEBA, Manuales. Buenos Aires.
- Ramos, V.A. 1988. The tectonics of the Central Andes; 30° to 33° S latitude. En Clark Jr., S.P., Burchfiel, B.C., Suppe, J. (Eds.). *Processes in Continental Lithospheric Deformation*. Geological Society of America, pp. 31–54.
- Ramos, VA. 1992. Control geotectónico de las cuencas triásicas de Cuyo. *Bol. Inf. Petrol.*, Tercera Epoca, IX (31), 2-9.
- Ramos, VA., Jordan, T.A., Allmendinger, R.W., Kay, S.M., Cortes, J.M., Palma, M.A. 1984. Chilenia: un terreno alóctono en la evolución paleozoica de los Andes Centrales. *Actas IX Congr. Geol. Argentino*, 2, 84-106.
- Ramos, V A., Kay, S.M., 1991. Triassic rifting and associated basalts in the Cuyo Basin, Central Argentina. In R.S. Harmon and C.W. Rapela (eds.). *Andean Magmatism and its tectonic setting*, Geol. Soc. Amer., Spec. Paper, 265, 79-91.
- Ramos, V.A., Basei, M.A.S., 1997. The basement of Chilenia: an exotic continental terrane to Gondwana during the early Paleozoic. In: Bradshaw, J.D., Weaver, S.D. (Eds.), *Terrane Dynamics* 97, International Conference on Terrane Geology, Conference Abstracts: 140-143, Christchurch.
- Rodríguez Fernández, L.R., Heredia, N., Gallastegui, G., Quesada, C., Robador, A., Marín, G., Cardó, R. 1996. Hoja 3169-14: Paraje Castaño Viejo. Escala 1:250.000. SEGEMAR. Buenos Aires.
- Rodríguez Fernández, L.R., Heredia, N., Espina, R.G. y Cegarra, M.I., 1999. Estratigrafía y estructura de los Andes Centrales Argentinos entre los 30° y 31° de Latitud Sur. *Acta Geológica Hispana* 32: 51-75.
- Sanchez-Alfaro, P., Reich, M., Driesner, T., Cembrano, J., Arancibia, G., Pérez-Flores, P., Heinrich, C.A., Rowland, J., Tardani, D., Lange, D., Campos, E. 2016. The optimal windows for seismically-enhanced gold precipitation in the epithermal environment. *Ore Geol. Rev.* 79, 463–473. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.005>.
- Sato, A.M. 1987. Chita granitic stock: a closed system crystallization. X Congreso Geológico Argentino. Actas IV, 96-99. Tucumán.
- Sato, A.M., Llambías, E.J. 1993. El Grupo Choiyoi, provincia de San Juan: equivalentes efusivos del batolito de Colanguil In: 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos (Mendoza), Actas 4, pp. 156-165.
- Sato, A.M., Llambías, E.J., Basei, M.A.S. Castro, C.E. 2015. Three stages in the Late Paleozoic to Triassic magmatism of southwestern Gondwana, and the relationships with the volcanogenic events in coeval basins. *Journal of South American Earth Science* 63: 48–69.
- Sibson, R.H., 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology* 18 (8): 1031-1042.
- Simmons, S.F., White, N.C., John, D.A. 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits, Society of Economic

- Geologist, Economic Geology 100 th Anniversary Volume: pp 485-522.
- Volkheimer, W. 1978. Descripción Geológica de la Hoja 27b, Cerro Sosneado, provincia de Mendoza. Buenos Aires.
- White, N.C., Hedenquist, J.W., 1990. Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration. J. Geochemical Explor. 36, 445–474. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G)
- Zappettini, E.O. Chernicoff, C.J. 2018. Metallogenic Implications of Redefining the Upper Paleozoic Magmatism in Argentina: Tectonic settings and related deposit models. En IAGOD (ed.), 15th Quadrennial IAGOD International Association on the Genesis of Ore Deposits Symposium. Anales 56 - SEGEMAR, Salta, Argentina, p. 144-145.