



CONTROLES ESTRUCTURALES EN EL DEPÓSITO EPITERMAL (Au-Ag) LA PALOMA, MACIZO DEL DESEADO, ARGENTINA.

María Lis FERNÁNDEZ¹, Stefano MAZZOLI², Elisa SAVIGNANO³, Marta B. FRANCHINI⁴

¹Centro Patagónico de Estudios Metalogénicos, CONICET Universidad Nacional del Comahue, Buenos aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina. marialisfer@gmail.com

²Department of Earth Sciences, University of Naples "Federico II", Largo San Marcellino 10,7 Napoli, 80138 Italy. stefano.mazzoli@unina.it

³Department of Geosciences, University of Padua, Via G. Gradenigo, 6, Padova 35131 Italy. elisa.savignano@studenti.unipd.it

⁴Instituto de Paleobiología y Geología, Universidad Nacional de Río Negro. mfranchini@speedy.com.ar

RESUMEN

El prospecto La Paloma (47°42'30" S, 67°46'23" O) localizado en la porción este del Macizo del Deseado, incluye numerosas vetas y brechas hidrotermales de Au-Ag y metales base. La Veta Sulfuro constituye el depósito de mayor importancia económica en La Paloma (498,4 kT @ 9.20 g/t Au, 147,214 Oz Au Measured&Indicated) y está rodeado por estructuras de menor ley. Las relaciones de corte sobreimpuestas que caracterizan al complejo sistema de fracturas híbridas de extensión-cizalla medidas en La Paloma, sugieren que se formaron por reactivación de diaclasas pre-existentes a partir de condiciones extensionales con una máxima extensión horizontal que cambió de orientación NNO a ENE. Repetidas permutaciones en el campo de esfuerzo y reactivaciones de diaclasas producidas por sobrepresión de fluidos hidrotermales por debajo de una secuencia volcánica de baja permeabilidad, habrían producido el complejo patrón de fallas que observamos en la actualidad. Indicios de reactivación de fallas asociada a la propagación del régimen Ándico en el Macizo del Deseado no habían sido descubiertos en el área de estudio. El análisis del paleo-campo de esfuerzo sobre estas estructuras indican un esfuerzo principal máximo compresivo sub-horizontal en dirección aproximadamente E-O.

Palabras clave: fracturas híbridas de extensión-cizalla, condiciones extensionales, permutaciones en el campo de esfuerzos, sobrepresión de fluidos, régimen Ándico.

ABSTRACT

Structural control on La Paloma (Au-Ag) epithermal deposit, Deseado Massif, Argentina. Located in the eastern portion of the Deseado Massif, La Paloma prospect (47°42'30" S, 67°46'23" W) includes numerous Au-Ag and base metal epithermal veins, stockworks and hydrothermal breccias. The Sulfuro Vein System constitutes the largest vein deposit at La Paloma (498.4 kT @ 9.20 g/t Au, 147,214 Oz Au Measured & Indicated) with lower-grade veins surrounding main ore shoot. Mutually overprinting relationships characterizing the documented complex hybrid extension-shear fracture system of La Paloma, suggest that they developed from reactivation of pre-existing joints under extensional conditions with the maximum horizontal extension switching between a NNW and an ENE orientation. Repeated stress permutation and joint reactivation caused by build-up of hydrothermal fluid overpressure beneath a low-permeability volcanic succession lead to the development of the vein-fault network we observe today. A record of localized, late fault reactivation associated with a far field propagation of Andean regime into the Deseado Massif has also been unravelled in the study area. Paleostress analysis applied to these structures point out a dominant sub-horizontal, roughly E-W trending maximum compressive stress.

Keywords: *hybrid extension-shear fracture, extensional conditions, stress permutation, fluid overpressure, Andean regime .*

INTRODUCCIÓN

El prospecto La Paloma forma parte del Proyecto Don Nicolás situado en el sector noreste del Macizo del Deseado (47°42'30" S, 67°46'23" O) (Fig. 1). Es un yacimiento epitermal de Au-Ag esencialmente vetiforme que se encuentra vinculado al mega-evento volcánico con características bimodales que ocurrió en Patagonia durante el Jurásico Medio a Tardío, definido como Provincia ígnea Silícica Chon-Aike (Pankhurst et al. 1998, Pankhurst et al. 2000). El objetivo de este trabajo consiste en analizar el rol de la presión de los fluidos hidrotermales en las permutaciones en el campo de esfuerzo de sistemas extensionales y el control que ejercieron las características estructurales heredadas de las rocas encajantes sobre la mineralización. También se analiza la relación entre los componentes del campo de esfuerzo, las características de las vetas y las morfologías de los clavos mineralizados.

MARCO GEOLÓGICO

El ambiente geológico del depósito La Paloma es similar al de los yacimientos epitermales de oro y plata de la provincia geológica auro-argentífera del Macizo del Deseado (Schalamuk et al. 1997). Las rocas de caja hospedantes de la mineralización son unidades volcánicas andesíticas de la Formación Bajo Pobre (Lesta y Ferello 1972) que forma parte del Complejo Volcánico Bahía Laura (CVBL) (Feruglio 1949, Sruoga et al. 2008). La Formación Chon Aike representa el volcanismo ácido del CVBL y constituye afloramientos aislados en la porción este y sur del área de estudio. Estas unidades fueron interpretadas como producto de un mega-evento de rifting intra-continental acompañado por volcanismo sin-cinemático en respuesta al régimen tectónico extensional que afectó el sur de Gondwana durante el Jurásico (Giacosa et al. 2010). El régimen tectónico, caracterizado por extensión en dirección SO-NE, dio lugar a la formación de numerosas estructuras híbridas (extensión y cizalla) y de extensión pura en la secuencia volcánica jurásica, donde se emplazaron las vetas epitermales de Au-Ag del Macizo del Deseado (Giacosa et al. 2010, Echavarría et al. 2005).

METODOLOGÍA

El estudio consistió en el relevamiento de datos estructurales en el campo a partir de afloramientos y/o exposiciones del sistema de fallas/fracturas que controlaron la mineralización vetiforme en el prospecto La Paloma (Fig. 1). El análisis estructural se realizó a partir de datos confiables dados por indicadores cinemáticos expuestos en los planos de fallas (ej. *slickenlines*, *abrasion striae*,

mineral shearfibres, *groovemarks*).

Para el análisis de los datos obtenidos se aplicó el método de inversión múltiple (MIM, Yamaji 2000) a fin de obtener y caracterizar el paleo-campo de esfuerzos a partir de las fallas principales que controlaron la mineralización. Este análisis provee las orientaciones de las tres direcciones de esfuerzo principales (σ_1 , σ_2 , σ_3 , siendo $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) y el radio de esfuerzos $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ (Angelier 1979). El método de inversión múltiple (MIM) permitió separar del conjunto de datos obtenidos en el área de estudio, campos de esfuerzos heterogéneos, correspondientes a varios eventos de deformación y asumir que un grupo de fallas fue activado por campos de esfuerzo más viejos y otro por campos de esfuerzo más nuevos.

RESULTADOS

Los juegos de diaclasas son comunes en todo el área de estudio y forman una red que incluye cuatro juegos sub-verticales principales, con relaciones de corte entrecruzadas (Fig. 2, Fig. 3a). Las fallas observadas en el área de estudio también consisten en estructuras verticales a sub-verticales (Fig. 3b). Abarcan vetas, *stockworks* y brechas hidrotermales con espesores variables: algunas de ellas muestran evidencias de desplazamiento con componentes de extensión y cizalla. Se definieron cuatro series de fallas sub-verticales a verticales, de extensión, de cizalla e híbridas, con orientaciones ENE (Serie 1), NNO (Serie 2), NE (Serie 3) y NO (Serie 4) (Fig. 3c). Las fallas híbridas (de extensión y cizalla) representan la mayoría y en todos los casos, en el área de estudio, muestran una componente de desplazamiento normal. El método de inversión múltiple (MIM) aplicado al conjunto de datos dio como resultado un σ_1 en dirección vertical y un σ_3 con dos orientaciones predominantes en el eje sub-horizontal. Toda la población de datos se puede agrupar en dos poblaciones de falla: la primera (Grupo 1) con un σ_1 sub-vertical y un σ_3 sub-horizontal en dirección NNO (Fig. 4b) y la segunda población (Grupo 2) con un σ_1 sub-vertical y un σ_3 sub-horizontal en sentido ENE (Fig. 4c). Japas et al. (2013) reconocen dos campos cinemáticos relacionados con el emplazamiento del volcanismo jurásico de la provincia Chon Aike, uno principal y otro secundario con direcciones de extensión ENE y NNO, respectivamente, coincidentes con las registradas en el presente trabajo. Esta configuración da como resultado un régimen de esfuerzo extensional con un eje principal máximo sub-vertical y direcciones de máxima extensión horizontal (o de mínimo esfuerzo compresivo), NNO y ENE.

En sectores se observaron indicadores cinemáticos que se superponen a los anteriores y se asocian a una

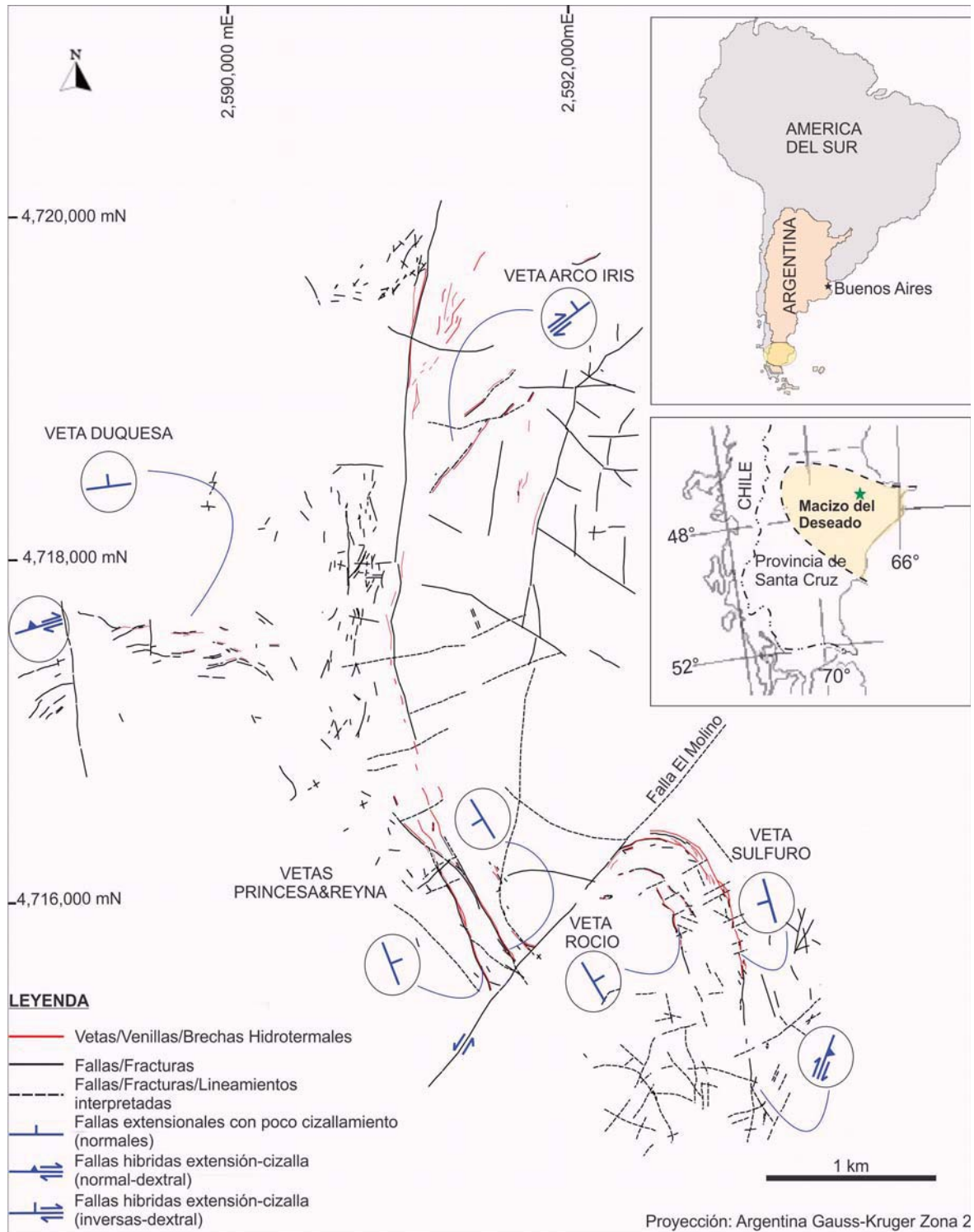


Figura 1. Sistema de fracturas-fallas mineralizadas en La Paloma.
 Tomado de: Mazzoli et al. (en elaboración)

Figura 1. Sistema de fracturas-fallas mineralizadas en La Paloma. En los círculos se representan los indicadores cinemáticos predominantes en cada una de las fallas y/o vetas. En los recuadros de menor tamaño se muestra la ubicación geográfica del Prospecto La Paloma (estrella verde).

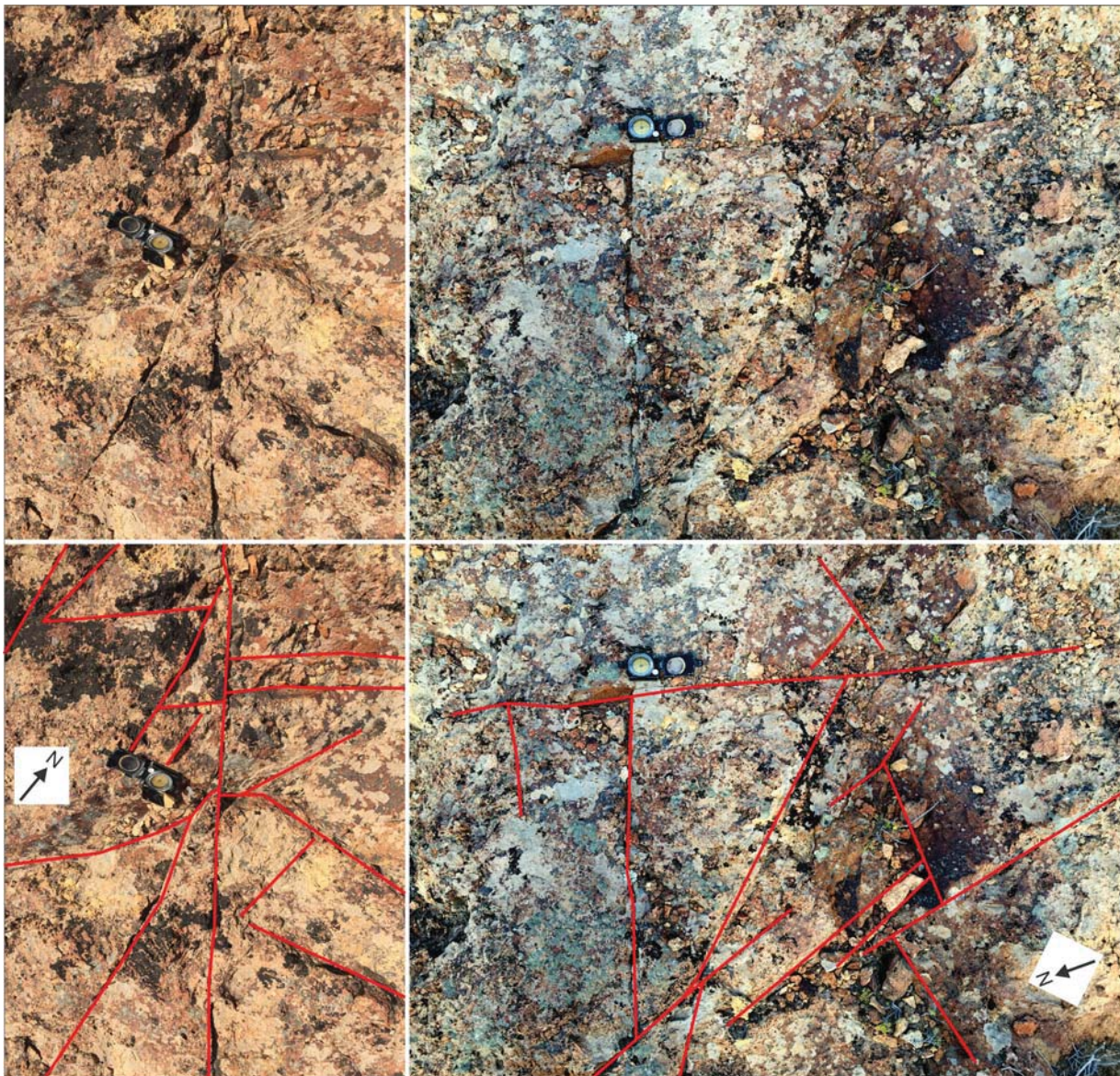


Figura 2. Set de diaclasas en unidades volcánicas. Tomado de : Mazzoli et al. (en elaboración)

Figura 2. Sets de diaclasas en unidades volcánicas.

reactivación de las fallas pre-existentes como fallas inversas con componentes de cizalla dextral dominante. El análisis estructural de estos datos dio como resultado un σ_1 en dirección sub-horizontal (σ_1 , inclina 9° hacia 276°N) (Fig. 4d) y un σ_3 con una inclinación sub-vertical en dirección S (σ_3 , inclina 54° hacia 172°N).

DISCUSIÓN

La roca de caja que hospeda la mineralización se caracteriza por una densa red de diaclasas con relaciones de corte sobreimpuestas que se desarrollaron luego de su

emplazamiento (Fig. 2). El conjunto de diaclasas puede agruparse en cuatro juegos con orientaciones similares a las de las fallas híbridas que controlaron la mineralización (Fig.3a). Este rasgo y las relaciones de corte complejas que caracterizan al sistema de fallas/vetas del distrito, sugieren que estas últimas se desarrollaron como consecuencia de la reactivación de diaclasas pre-existentes, probablemente como resultado de un régimen de extensión que continuó luego del soterramiento de la secuencia volcánica por depósitos suprayacentes.

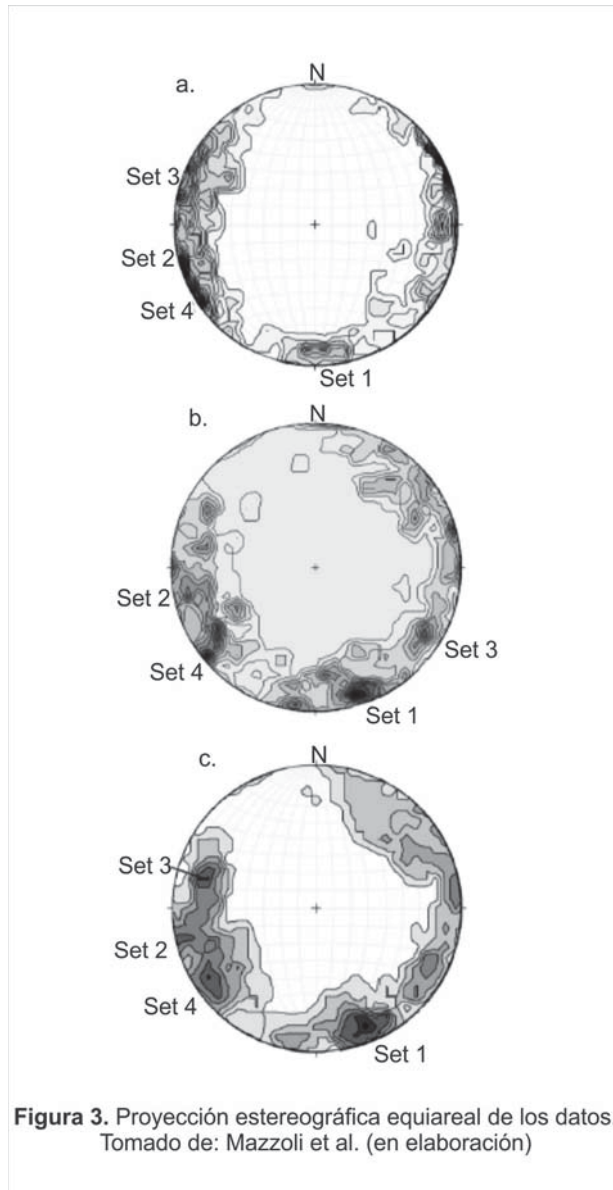


Figura 3. Representación estereográfica de los polos de las principales estructuras reconocidas en el área. (a) Diaclasas y vetas (fracturas de dilatación; 409 datos). (b) Fallas (planos de deslizamiento de fracturas híbridas de extensión-cizalla; 404 datos). (c) Subgrupo del conjunto de datos anterior con indicadores cinemáticos (slickensides) a los cuales se asocian indicadores confiables del sentido de movimiento; (89 datos). Proyección equiareal, hemisferio inferior de representación; contornos de Kamb: 1 intervalo; nivel de significación: 1,5; espaciado de la grilla de conteo: 30.

El desarrollo de potentes vetas a lo largo de fallas híbridas indica una componente de dilatación significativa con poco cizallamiento y sugiere que la presión de los fluidos jugó un papel importante en la reactivación de las diaclasas pre-existentes.

El análisis de los datos indica un régimen extensional

con una máxima dirección de extensión horizontal (σ_3) que cambió de orientación desde NNO a ENE. La roca presentaba un diaclasamiento previo originado por enfriamiento en el marco de un régimen de esfuerzos extensionales dominantes al momento de su emplazamiento (Fig. 4a). Los dos grupos de fallas definidos previamente, se desarrollaron con un σ_1 vertical, sin embargo el Grupo 1 está controlado por un σ_3 horizontal con dirección NNO (Estadio IA) (Fig. 4b) mientras que el Grupo 2 se formó con un σ_3 horizontal orientado ENE (Estadio IB) (Fig. 4c). Durante el Estadio IA, las diaclasas con orientación ENE fueron reactivadas como fallas normales (ej. Veta Duquesa), mientras que las NE se reactivan como fallas oblicuas con componentes de extensión y cizalla, normal y dextral, respectivamente (ej. Veta Arco Iris). Después de que se hayan formado las vetas híbridas-extensionales de rumbo ENE, el esfuerzo normal (σ_y) a través de la fractura iguala a la presión de fluidos (P) y el esfuerzo normal efectivo (σ'_y) debe ser igual a cero, $\sigma'_y = \sigma_y - P$ (Hubert y Rubey 1959). Adyacente a las estructuras formadas recientemente, el esfuerzo normal efectivo (σ'_x) aumenta simultáneamente en menor proporción gobernado por el radio de Poisson, como respuesta poroelástica (Colletini et al. 2006). De esta manera, con un esfuerzo normal efectivo σ'_y igual a cero, σ_3 se vuelve paralelo a la dirección de esfuerzo principal horizontal (σ_x), dando lugar al comienzo del Estadio IB en el cual las diaclasas con rumbos NNO fueron reactivadas como fallas normales (ej. Sistema de Vetas Sulfuro y Princesa & Reyna) mientras que las NE se reactivaron localmente como fallas oblicuas con componente de extensión y cizalla, normal y sinistral, respectivamente (ej. Falla El Molino).

A medida que la presión del fluido a lo largo de las estructuras normales a σ_x decrecía, se dieron las condiciones para una nueva permutación entre σ_2 y σ_3 . La precipitación de minerales (ej. cuarzo) en zonas de dilatación en fracturas híbridas de extensión y de cizalla sellaron y re-generaron las condiciones iniciales de baja permeabilidad del sistema. De esta manera, pudo comenzar un nuevo ciclo de cambio en la dirección del mínimo esfuerzo compresivo (σ_3) ayudado por la presión del fluido. Se interpreta que las reiteradas permutaciones en la dirección del esfuerzo principal mínimo habrían producido el complejo patrón de fallas que se observan en la actualidad (Fig. 1).

La localización de indicadores cinemáticos superpuestos a fallas pre-existentes, con componentes de movimiento inverso y dextral, se asocian a una dirección de esfuerzo principal máximo sub-horizontal (σ_1) aproximadamente E-O. Este esfuerzo fue el resultado de la pro-

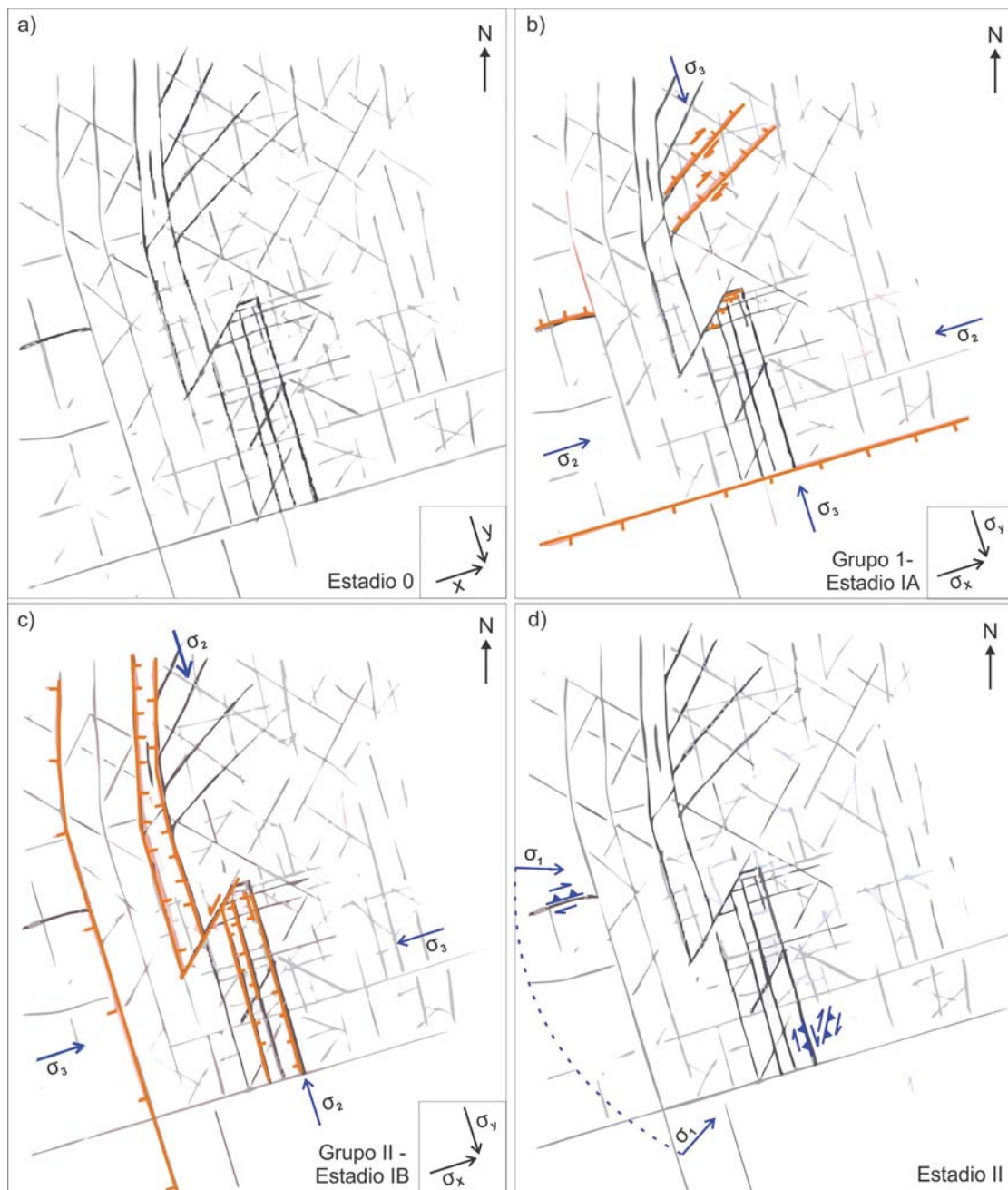


Figura 4. Esquema de la evolución estructural de La Paloma.
Tomado de Mazzoli et al. (en elaboración)

Figura 4. Esquema de la evolución estructural de La Paloma. a) Diaclasamiento inicial de las rocas volcánicas. Se define un sistema de ejes cartesianos con un eje x horizontal que apunta en dirección ENE, un eje y horizontal que apunta en dirección NNW y un eje z vertical que apunta hacia abajo. Todos ellos coinciden con las direcciones principales de esfuerzo, σ_x , σ_y y σ_z , respectivamente, determinadas en el análisis del campo de esfuerzos. b) Desarrollo de fracturas híbridas de extensión-cizalla bajo condiciones de esfuerzo principal mínimo (σ_3) en dirección NNO (las estructuras en naranja están activas). c) Desarrollo de fracturas híbridas de extensión-cizalla bajo condiciones de esfuerzo principal mínimo en dirección ENE (las estructuras en naranja están activas) luego de una permutación en el campo de esfuerzos. d) Reactivación durante el acortamiento Ándico, caracterizada por una dirección de esfuerzo principal máximo compresivo con variaciones de E-O (dominante) a SO-NE (estructuras en azul están activas).

pagación del acortamiento Ándico en la zona de antepaís o Macizo del Deseado (Fig.4d).

La mineralización en La Paloma se asocia a sistemas vetiformes, stockwork y brechas hidrotermales con un rumbo general predominante NNO y N-S, y en menor medida NE y ENE a E-O formadas durante los estadios IB y IA, respectivamente. Durante el estadio IA, las estructuras reactivadas constituyeron sistemas mineralizados con poca extensión lateral y contenido metálico. Los sistemas de fracturas híbridas con mayor componente de dilatación ENE a E-O exhiben, en algunos casos, escaso desarrollo como consecuencia de la mayor permeabilidad y poca capacidad de canalización de fluidos de la roca encajante. Las diaclasas NE reactivadas como fallas oblicuas (e.j Veta Arco Iris) forman clavos mineralizados sub-verticales con poca continuidad lateral asociados a fragmentos de cuarzo incluidos en zonas de falla con abundantes óxidos de hierro.

Durante el estadio IB, en cambio, se emplazaron las vetas de mayor potencia y alta ley (ej. Veta Sulfuro). Los clavos mineralizados se asocian a brechas multi-episódicas y presentan una geometría sub-horizontal.

CONCLUSIONES

Se sugiere que la acumulación de sobrepresión por debajo de la secuencia de rocas volcánicas de baja permeabilidad que cubrían las rocas hospedantes de la mineralización, fueron la causa del desarrollo sin-tectónico de las series de fracturas híbridas, de extensión y de cizalla. Los requisitos para el modelo propuesto son: (i) la presencia de un flujo de fluidos continuo que genere sobrepresión; (ii) una secuencia volcánica con baja permeabilidad cubriendo las rocas hospedantes durante los periodos de acumulación de presión; y (iii) que las rocas de caja adquieran competencia luego de la cementación de las fracturas. Se interpreta al complejo sistema de fracturas híbridas, de extensión y de cizalla de La Paloma como un ejemplo fósil de dicho proceso. La sobrepresión podría haber sido causada por los grandes volúmenes de fluidos hidrotermales que circularon por debajo de una barrera de baja permeabilidad durante un periodo de fuerte actividad magmática ocurrido bajo el régimen extensivo jurásico.

La reactivación de fallas asociada a la propagación del régimen Ándico en la zona del antepaís o Macizo del Deseado, no había sido documentada antes en el área de estudio. Indicadores cinemáticos sobreimpuestos a fallas pre-existentes muestran un componente de cizalla dextral dominante con subordinada componente de movimiento inverso, e indican un esfuerzo principal máximo compresivo sub-horizontal (σ_1), en dirección aproximadamente E-O (Fig. 4d).

El sistema de vetas y fallas híbridas de extensión-cizalla en el distrito La Paloma se generó por reactivación

de estructuras pre-existentes. El emplazamiento de las mismas comenzó con la formación de estructuras NE y ENE a E-O durante el Estadio IA, y continuó con las estructuras de rumbo NNO y N-S durante el Estadio IB, bajo condiciones de permutación del campo de esfuerzos asociado a la sobrepresión de fluidos. La mayoría son vetas híbridas aunque las características de cada una de ellas varían según predomine la extensión o la cizalla. La dilatación asociada al Estadio IB fue la más efectiva en términos de canalización de fluidos hidrotermales, facilitando el emplazamiento de vetas potentes y continuas con clavos mineralizados sub-horizontales. Sin embargo, el desarrollo de vetas potentes en el área de estudio también estuvo controlado por las propiedades mecánicas de la roca encajante.

Las vetas híbridas con predominio de cizalla, representadas por las estructuras NE reactivadas durante el estadio IA, se asocian a clavos verticales de alta ley pero de poca dimensión y continuidad lateral.

AGRADECIMIENTOS

Esta contribución forma parte del Proyecto de investigación financiado por CONICET (PIP n°330). Agradecemos la colaboración del Lic. Silvio Franco, Gerente de Exploraciones de la empresa Minera Don Nicolás, quien nos brindó apoyo técnico y logístico en las tareas de campo. A la Dra. Silvia Japas por su revisión y asesoramiento los cuales nos ayudaron a mejorar la calidad del manuscrito.

LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Angelier J. 1979. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics* 56: T17-T26.
- Colletini, C., De Paola, N. y Gouly, N.R. 2006. Switches in the minimum compressive stress direction induced by overpressure beneath a low-permeability fault zone. *Terra Nova* 18: 224-231.
- Echavarría, L.E., Schalamuk, I. B. y Etcheverry, R.O. 2005. Geologic and tectonic setting of Deseado Mas-sif epithermal deposits, Argentina, based on El Dorado-Monserrat. *Journal of South American Earth Sciences* 19: 415-432.
- Feruglio, E. 1949. Descripción geológica de la Patagonia. 3 Tomos, Dirección Nacional de Yacimientos Petrolíferos Fiscales, Buenos Aires.
- 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.
- Hubbert, M.K. y Rubey, W.W. 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *Geological Society of America Bulletin* 70: 115-166.



- Japas, M.S, Sruoga, P., Kleiman, L.E., Gayone, M.R, Maloberti, A. y Comito, O. 2013. Cinemática de la extensión jurásica vinculada a la Provincia Silícea Chon Aike, Santa Cruz, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 70 (1): 16 – 30.
- Lesta, P. y Ferello, R. 1972. Región Extraandina del Chubut y Norte de Santa Cruz. En Leanza, A.F. (Ed.) *Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias: 602-687, Córdoba.
- Pankhurst, R.J., Leat, P.T., Sruoga, P., Rapela, C.W., Márquez, M., Storey, B.C. y Riley, T.R. 1998. The Chon-Aike silicic igneous province of Patagonia and related rocks in Antarctica: a silicic LIP. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 81: 113-136.
- Pankhurst, R., Riley, T., Fanning, C. y Kelley, S. 2000. Episodic Silicic volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: chronology of magmatism associated with the breakup of Gondwana. *Journal of Petrology* 41(5): 605–625.
- Schalamuk, I.B., Zubia, M., Genini, A. y Fernandez, R.R. 1997. Jurassic epithermal Au-Ag deposits of Patagonia, Argentina. *Ore Geology Reviews* 12(3): 173–186.
- Sruoga, P., Busteros, A., Giacosa, R., Kleiman, L., Japas, S., Maloberti, A. y Martínez, H. 2008. Análisis litofacial y estructural del Complejo Bahía Laura en el área El Dorado - Monserrat, pcia. de Santa Cruz, Argentina. *Revista Asociación Geológica Argentina* 63 (4): 653-664.
- Yamaji A. 2000. The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology* 22: 441-452.