



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

Potencial mecanismo de reactivación de estructuras litosféricas de basamento, críticas para el desarrollo de provincias metalogénicas diacrónicas en los Andes Centrales

Navarro, I.⁽¹⁻²⁾; Carrizo D.⁽²⁾; Fuentes, J.⁽²⁾

⁽¹⁾ Carrera de Geología, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción. (isnavarro@udec.cl)

⁽²⁾ GeoEkun SpA, Servicios de Geociencia Aplicada, Dr. Manuel Barros Borgoño 71, of. 504, Providencia, Santiago de Chile. carrizo@geokun.com ; (fuentes@geokun.com)

RESUMEN

En este trabajo se propone por primera vez, un mecanismo de reactivación para estructuras litosféricas metalogénicas Andinas. El desarrollo de un régimen tectónico a la escala de la subducción, no isotrópico ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$), con $\sigma_2 = \sigma_v$ y σ_1 coherente con la convergencia durante etapas intermedias de inversión tectónica, parece ser el motor tectónico de esas estructuras. Este mecanismo favorece la migración de fluidos, concentración metálica a lo largo de zonas de falla mediante repetidas ebulliciones por cambios de presión, y el desarrollo de cámaras magmáticas someras y fértiles que interactúan con los sistemas estructurales más jóvenes en la corteza superior. Esto concuerda con trabajos anteriores que han reconocido las transiciones entre regímenes tectónicos con sus respectivos cambios en el régimen de esfuerzos, como momentos especialmente favorables para la mineralización.

ABSTRACT

In this work, for the first time, we propose an Andean metallogenic-related lithospheric structures reactivation mechanism. Development of a non-isotropic subduction-scale tectonic regime ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$), with $\sigma_2 = \sigma_v$ and σ_1 consistent with the convergence, during intermediate stages of tectonic inversion, seems to be the tectonic motor of these structures. This mechanism promotes fluid migration, metal concentration along the

fault zones by repeated pressure-related boiling, and shallow and fertile magmatic chamber development that interact with the younger structural systems in the upper crust. The above is consistent with previous works recognizing the tectonic regime transitions, with stress field changes, as especially favorable tectonic settings for mineralization.

Palabras claves: Estructuras litosféricas, metalogénesis andina, inversión tectónica.

Keywords: Lithospheric structures, andean metallogenesis, tectonic inversion.

INTRODUCCIÓN

Durante la última década, la renovación paradigmática del control estructural en los procesos de mineralización en los Andes Centrales ha propuesto, como idea motora, el importante rol de la existencia de estructuras de escala litosférica en la construcción de los escenarios metalogénicos andinos [1,2 entre otros], tal como ha sido documentado en otros escenarios como Australia y África [p.e. 3]. Al parecer, la interacción estructural de estos rasgos profundos, de gran escala, con los diferentes sistemas de fallas corticales más jóvenes, desarrollados a lo largo de la evolución andina desde el Jurásico al Neógeno, han elaborado una red estructural de permeabilidad diferencial en la corteza, estableciendo una tortuosidad estructural mayor, que condicionaría la formación de zonas

metalogénicas fértiles en los últimos kilómetros de la corteza [4, 5, 6]. A pesar de los esfuerzos cartográficos para documentar estas estructuras [7], las evidencias objetivas exponen más bien señales estructurales de fondo, con sistemas de estructuras de corta persistencia y jerarquía, asociadas más bien al reconocimiento a gran escala de lineamientos de objetos geológicos, más que a zonas de fallas continuas y discretas que permitan develar la mecánica y temporalidad de dicha deformación. Aunque que durante la última década estos rasgos estructurales han sido reconocidos por los equipos de las diferentes compañías de exploración minera, su uso como herramienta prospectiva ha sido incipiente, debido a la poca profundidad comprensiva de los procesos de deformación responsables de los mecanismos de fertilidad metalogénica en los Andes [6].

En este contexto, la mecánica y cinemática de reactivación/propagación de estas estructuras de larga data y su coexistencia con el desarrollo de diferentes sistemas de fallas corticales más jóvenes, se expone como una pregunta de investigación fundamental, cuya respuesta podría generar información crítica para el desarrollo de las nuevas estrategias en la actividad prospectiva metalífera, reverdeciendo conceptualmente el tradicional control magmático de la distribución de los escenarios metalogénicos, e introduciendo la idea de un control estructural diacrónico en los distritos metálicos andinos [5, 6]. El presente estudio propone un potencial mecanismo de reactivación de las estructuras litosféricas de basamento, a escala del margen, desarrollado durante los diferentes escenarios tectónicos meso-cenozoicos, explicando tanto las evidencias cinemáticas reportadas, como el potencial rol tectonomagmático en los procesos de metalogénicos de los Andes Centrales.

Estructuras litosféricas de basamento y la metalogénesis Andina

Los lineamientos se definen como un rasgo lineal mapeable, simple o compuesto de una superficie, cuyas partes están alineadas en una relación rectilínea o ligeramente curvilínea que difiere claramente de los patrones de características adyacentes y, presumiblemente, refleja un fenómeno del subsuelo [8]. Los lineamientos pueden representar discontinuidades de la corteza, tales como fallas u otras estructuras expuestas y no expuestas en superficie; cuya existencia se infiere a partir de métodos de detección indirecta. Los lineamien-

tos de gran expresión ($>10^2$ km de longitud) han sido interpretados como estructuras de carácter cortical a litosférico, con una exitosa correlación espacial con conocidos distritos metalogénicos, proponiendo la idea que este tipo de estructuras son parte relevante en la construcción de algunos escenarios metalogénicos fértiles [3]. Este tipo de lineamientos han sido documentados en los Andes Centrales por diferentes autores [9, 10, 1, 2, 11, 4, 12, 5, 6, 7, entre otros]. El estudio general de estos rasgos a diferentes escalas en Argentina, Perú y Chile muestran trazas rectilíneas, evidenciando geometrías en profundidad de alto ángulo, según orientaciones preferenciales oblicuas al margen de subducción, NO-SE a NNO-SSE y en menor expresión orientaciones NE-SO y NNE-SSO (Figura 1). Es notable el importante control en el desarrollo de los diseños de las principales incisiones de la vertiente oeste de los Andes, alineamientos morfotectónicos en el sector de la Puna, quiebres abruptos en la continuidad N-S de unidades geológicas, junto con la alineación de sistemas volcánicos tardíos. De manera indirecta, es posible correlacionar estos rasgos ($\sim 10^2$ km de longitud) con gradientes abruptos en tomografías sísmicas y gravimétricas a diferentes escalas [p.e. 12, 6].

La naturaleza de dichas estructuras conlleva una importante condición de escala, lo que ha establecido una naturaleza pre-andina de dichas estructuras vinculadas principalmente a potenciales rasgos estructurales de acreción del paleo margen durante el Paleozoico superior y/o estructuras mayores vinculadas con el desarrollo de las cuencas tectono-volcánicas triásicas en el margen [9, 13,4,5, 6]. En detalle, estudios locales a lo largo de la vertiente oeste de los Andes Centrales han documentado numerosas estructuras discretas, oblicuas al margen, de alto ángulo, coherentes con las zonas de definición de los lineamientos aquí estudiados. Las cinemáticas descritas para este tipo de estructuras son sistemáticamente de rumbo, evidenciada por rasgos geológicos desplazados y estudios de tectoglifos en rellenos hidrotermales desarrolladas principalmente durante el término del Mesozoico e inicio del Cenozoico. Las estructuras de orientación NO-SE exponen una cinemática dominante sinistral, tales como: las fallas Calientes, Linga, Incapuquio, Micalaco, Challaviento, Cincha Lluta-Quellaveco [14, 15, 16] asociadas al lineamiento Cincha Lluta-Incapuquio; Las fallas Indagua, San Emilio, Cien-

aga, Veraguas, Sierra Overa, Altamira [17, 18, 19] asociadas al lineamiento TalTal-El Salvador; Las fallas internas del Sistema de Fallas de Atacama costero [20, 21] asociadas al lineamiento Inca de Oro-Casale; Las fallas Trapiche, Toro Negro, Cruzadero [22] asociadas al lineamiento Cruzadero. Las estructuras de orientación NE-SO, en tanto, exponen cinemáticas dextrales tales como las fallas del distrito Angelitos [18] y las fallas El Indio, Vacas Heladas, Las Hediondas [22] asociables a lineamientos discretos; y las fallas observadas en el depósito Dominga [23] asociables al lineamiento El Tofo-El Potro.

Complejidad 3-D en los cambios del campo de esfuerzo durante las inversiones tectónicas Andinas, como mecanismo de reactivación/propagación de estructuras litosféricas metalogénicas

Las inversiones tectónicas tanto positivas como negativas, involucran un cambio de los esfuerzos principales, las que pueden ser ejemplificadas como el paso desde un $\sigma_3 = \sigma_v$, que causa acortamiento tectónico y compresión con desarrollo de fallas inversas, a un $\sigma_1 = \sigma_v$ que causa adelgazamiento cortical y extensión con el desarrollo de fallas normales. Durante las inversiones tectónicas cambian las orientaciones axiales de los esfuerzos principales, implicando una permutación de dichos esfuerzos, intercambiando en posición σ_1 y σ_2 , o intercambiando σ_2 y σ_3 [24]. Lo anterior, se ha reconocido en diversos regímenes tectónicos incluyendo sistemas en compresión [25], rumbo [26], extensión [27], y sistemas de *rifts* [28] en márgenes pasivos [29] y volcanes en escudo [30]. En particular, para que las estructuras puedan acomodar desplazamientos de rumbo, es necesario un régimen tectónico no isotrópico ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) con $\sigma_2 = \sigma_v$. Se ha demostrado que, durante las inversiones tectónicas, tanto positivas como negativas, los cambios entre σ_1 vertical y σ_3 vertical típicamente involucran una fase intermedia en la que $\sigma_2 = \sigma_v$, escenario propicio para la propagación de fallas de rumbo o un régimen de desgarro o *wrenching* [26; 31], el cual es reconocido como el esfuerzo diferencial intermedio entre los campos de compresión y extensión [32]. A su vez, la envergadura del desarrollo de la propagación y reactivación de estructuras de rumbo durante etapas intermedias de inversiones tectónicas está condicionada tanto por la magnitud del esfuerzo diferencial, como por la duración de dicho proceso [26].

Sumado a lo anterior, durante la etapa intermedia de inversiones tectónicas, el desarrollo de fallas de rumbo se ve favorecida por factores como la presencia de unidades de sello que permitan superar la presión hidrostática y alcanzar una sobrepresión de fluidos [31] y generar repetidas ebulliciones en la zona de falla, por cambios abruptos de presión, construyendo de esta manera una red de permeabilidad dinámica con un alto potencial de concentración metálica en los fluidos ascendentes (conducidos por $\sigma_2 = \sigma_v$) hasta zonas someras de la corteza.

DISCUSIÓN

Las estructuras litosféricas descritas anteriormente representan rasgos estructurales pre-andinos, de gran escala, los que han sido sometidos a los diversos escenarios geodinámicos durante la evolución del margen. La idea motora de la presente contribución responde a proponer un mecanismo de reactivación y propagación, de estas estructuras, que sea capaz de generar no sólo una red física de permeabilidad en la corteza, sino que también un motor tectónico de migración magmática y concentración metálica que alimente cámaras magmáticas someras (~5 km de profundidad) en la corteza, en un proceso a la escala de la subducción. Con posterioridad al Paleozoico Superior, la evolución geológica del margen oeste de los Andes Centrales muestra el desarrollo de diversos procesos de deformación en subducción e inversiones tectónicas desde un sistema de arco-isla, con el desarrollo de una cuenca de trasarco extensional, hasta la propagación de un margen compresivo, con el desarrollo de engrosamiento cortical tectónico y la creación del relieve tectónico más importante del Planeta (~14 km de diferencia de cota) [33]. Lo anterior, expone una condición de borde clave para establecer un proceso de reactivación de estructuras litosféricas en la corteza, con cinemáticas de rumbo y con un alto potencial de permeabilidad. Aquí proponemos que durante las etapas intermedias de las inversiones tectónicas Andinas las condiciones de esfuerzos, con un $\sigma_2 = \sigma_v$ y un σ_1 coherente con el vector de convergencia, es clave. En este contexto, la inversión tectónica entre el fin del Mesozoico e inicio del Cenozoico, desde un régimen extensional, asociado a *roll-back*, al desarrollo de un margen compresivo, representaría el último proceso relevante de activación de estas estructuras, asociables a la metalogénesis cenozoica Andina.

Al desarrollar un análisis más detallado de la mineralización tipo pórfido cuprífero más relevantes (>5000 MT) en los Andes Centrales, se exponen tres observaciones críticas: (i) Los sistemas porfídicos de mayor envergadura se localizan en el margen oeste de los Andes, asociados a la estructura responsable del alzamiento del borde occidental el altiplano-Puna [*West Andean Thrust*, 33]; (ii) Estos sistemas mineralizados coinciden con lineamientos litosféricos relevantes [10, 1, 11, 6]; (iii) Los sistemas porfídicos exponen edades diacrónicas que se rejuvenecen al norte y al sur de la región de Moquegua-Arica (Figura 1). Esto último permitiría la propagación diacrónica de los procesos de inversión tectónica, los que se habrían desarrollado al N y S de la región de Moquegua-Arica, permitiendo el emplazamiento de cámaras magmáticas tardías en una corteza engrosada tectónicamente por el WAT, configurando de esta manera los escenarios críticos para la génesis de los mega-pórpidos Andinos condicionadas por la previa activación de las estructuras litosféricas durante la inversión tectónica. Las reactivaciones tardías de las estructuras de rumbo, consistentes con el esfuerzo de convergencia y el acortamiento, serían las responsables a su vez, a escala de distrito, del control estructural de la geometría y localización de los sistemas mineralizados [p.e.22]. Finalmente, procesos de inversión tectónica pre-Jurásico serían responsables de la reactivación e interacción de estas estructuras en la metalogénesis mesozoica.

CONCLUSIONES

(i) El fallamiento de rumbo, asociado al desarrollo de un régimen tectónico a escala de la subducción, no isotrópico ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) con $\sigma_2 = \sigma_v$ durante etapas intermedias de inversiones tectónicas sería el motor de larga vida de las estructuras litosféricas en los Andes Centrales. Dichos cambios en el régimen de esfuerzo en la corteza han sido considerados por otros autores como momentos especialmente favorables para la generación de los diferentes escenarios metalogénicos tectono magmáticos, tales como depósitos tipo pórfidos y epitermales [34], como así también, probablemente, los de Fe-Apatito e IOCG asociados [6]. (ii) De esta manera, explorar la nucleación y propagación paralela a la Fosa de la inversión tectónica, podría explicar la variación de edades de los sistemas metalogénicos cenozoicos en los Andes Centrales, donde la preparación asociada a la reactivación de las estructuras litosféricas de rumbo, precedida de la propagación del WAT en acortamiento, sería un proceso clave para la construcción de cámaras magmáticas someras enriquecidas metalicamente en las fases terminales de los respectivos arcos. (iii) Finalmente, rasgos menores asociados a estas estructuras pueden ser reactivados de manera coherente con la convergencia en acortamiento, acomodando movimientos laterales discretos a escala de distrito, pudiendo interactuar de manera genética en la configuración final, somera (<3,5 km de profundidad) de los escenarios metalogénicos fértiles.

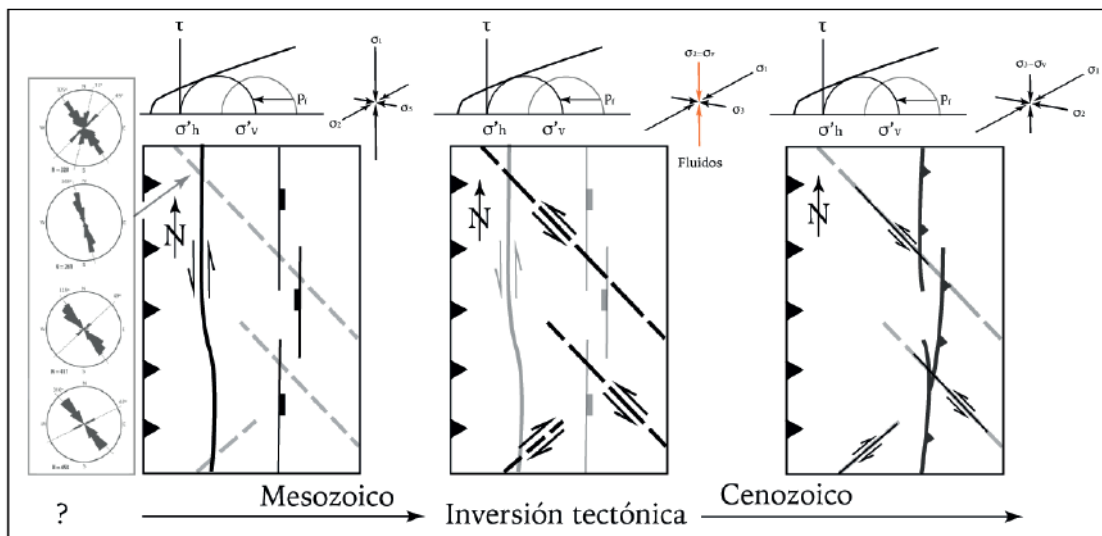


Figura 1. Esquema general del proceso de reactivación de estructuras litosféricas pre-andinas durante la inversión tectónica meso-cenozoica en los Andes Centrales. Notar la condición de $\sigma_2 = \sigma_v$ favoreciendo el ascenso de fluidos en la corteza en las zonas de falla.

REFERENCIAS

- [1] Chernicoff, et al., (2002) Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical, and remote sensing evidence. *Ore Geology Reviews*, 21:127 - 155.
- [2] Maksaev, V. (2001) Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis Andina. Santiago
- [3] O'Driscoll, E.S.T. (1986) Observations of the lineament-ore relation. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* 317, 195-218 pp. doi: 10.1098/rsta.1986.0032317
- [4] Carrizo, et al. (2018) Revisitando el Paradigma de las Provincias Metalogénicas Andinas: ¿Franjas paralelas o segmentos oblicuos a la Fosa? *In Congreso Geológicos Chileno*, No. 15, RENE-5, p.496. Concepción.
- [5] Carrizo, D. & Fuentes, J. (2019) The role of the Interplay between deep and shallow crustal structures in the metallogenic architecture of Central Andes: renewing the paradigm. *In 8th ISAG, Abstracts, Actas*. Quito, Ecuador.
- [6] Fuentes, J. (2020) Metalogénesis de los sistemas porfídicos cretácicos (25° - 31°S): implicancias para la exploración minera. Tesis para optar al grado de Magister en Geología Económica (Inédito). *Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas*: 319 p. Antofagasta.
- [7] Piquer, et al., (2021) A new model for optimal structural context for giant porphyry copper deposit formation. *Geology*, v.49, <https://doi.org/10.1130/G48287.1>
- [8] O'Leary et al., (1976) Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. *The Geological Society of America Bulletin*, v. 87(10):1463-1469.
- [9] Salfity, J. A. (1985) Lineamientos transversales al rumbo andino en el Noroeste Argentino. *Congreso Geológico Chileno*, No 4, Actas 2, 119-127. Antofagasta.
- [10] Fuentes, J. (1999). Identificación de Metalotectos y Áreas Potenciales para la Prospección de Depósitos Oro-Plata en Argentina. Informe (Inédito), *Placer Dome Exploration Inc*: 30 p.
- [11] Sillitoe, R. H. (2010) Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, Vol. 105 (1): 3-41.
- [12] Yañez, G. & Rivera, O. (2019) Crustal dense blocks in the fore-arc and arc region of Chilean ranges and their role in the magma ascent and composition: Breaking paradigms in the Andean metallogeny. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 93: 51-66
- [13] Kley et al. (1999) Along-strike segmentation of the Andean foreland: Causes and consequences. *Tectonophysics*, v. 301: 75 – 94.
- [14] Mamani et al. (2010) El sistema de fallas Incapuquio: dinámica y relación con el magmatismo región Omate – Moquegua Sur del Perú. *In XV Congreso Peruano de Geología*, Cusco, Resúmenes Extendidos. SGP, No. 9: 792-795.
- [15] Mamani et al., (2011) Dominios geotectónicos: basado en la tectónica, geología, magmatismo, geoquímica, depósitos minerales (Fe-Cu-Au-Mo) y geofísica. *PERÚMIN - 30 Convención Minera*.
- [16] Romero, D. & Cruz, M. (2016) El sistema de fallas Transandino del Sur de Perú; un sistema transcurrente sinistral (interpretación preliminar): Implicancias en los yacimientos de hidrocarburos y metálicos. *In XVIII Congreso Peruano de Geología*, Lima. Sociedad Geológica del Perú.
- [17] Cornejo et al. (1998). Hoja Salar de Maricunga, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos*, No. 7, 1 mapa escala 1:100.000, Santiago.
- [18] Matthews et al. (2010). Carta Altamira, Regiones de Antofagasta y Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica*, No.121: 66 p., 1 mapa escala 1:100.000, Santiago.
- [19] Mavor et al. (2020). Timing, Kinematics, and Displacement of the Taltal Fault System, Northern Chile: Implications for the Cretaceous Tectonic Evolution of the Andean Margin. *Tectonics*, 39, e2019TC005832.
- [20] Grocott, J. & Taylor, G. (2002). Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, north Chilean Andes (25°30'S to 27°00'S). *Journal of the Geological Society*, Vol. 159: 425-443.

- [21] Contreras et al. (2013). Carta Cifuncho, Regiones de Antofagasta y Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica*, No. 161: 69 p., 1 mapa escala 1:100.000, Santiago.
- [22] Giambiagi et al. (2017). Cenozoic shift from compression to strike-slip stress regime in the high Andes at 30°S, during the shallowing of the slab: Implications for the El Indio/Tambo mineral district. *Tectonics*, 36. <https://doi.org/10.1002/2017TC004608>
- [23] Heuser, G. (2021) Transporte y emplazamiento de fluidos en la corteza: perspectivas desde la textura mineral y la simulación numérica de la permeabilidad en el yacimiento de Fe-Cu Dominga (Cordillera de la Costa, 29°22'S). Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería (Inédito), Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Santiago.
- [24] Angelier et al. (1985) Neogene paleostress changes in the Basin and Range: a case study at Hoover Dam, Nevada-Arizona. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 96, 347-361.
- [25] Tranos, M.D. (2013) The TR method: The use of slip preference to separate heterogeneous fault-slip data in compressional stress regimes. The surface rupture of the 1999 Chi-Chi Taiwan earthquake as a case study. *Tectonophysics*, 608, 622-641.
- [26] Van Noten, et al (2012) The complexity of 3D stress-state changes during compressional tectonic inversion at the onset of orogeny: Geological Society Special Publication, v. 367, p. 51-69, doi:10.1144/SP367.5.
- [27] Sue et al. (2014) Stress field during early magmatism in the Ali Sabieh Dome, Djibouti, SE Afar rift. *J. Af. Earth Sci.*, 97, 56-66.
- [28] Plateaux et al (2012) Implications of fracturing mechanisms and fluid pressure on earthquakes and fault slip data in the east Iceland rift zone. *Tectonophysics*, 581, 19-34.
- [29] Mazabraud et al. (2013). Is earthquake activity along the French Atlantic margin favoured by local rheological contrasts? *Comp. Rend. Geosci.*, 345, 373-382.
- [30] Chaput et al. (2014) Deformation of basaltic shield volcanoes under cointrusive stress permutations. *J. Geophys. Res.*, 119, 274-301.
- [31] Peacock et al. (2016) Interplay between stress permutations and overpressure to cause strike-slip faulting during tectonic inversion. *Terra Nova*, doi:10.1111/ter.12249
- [32] Sibson, R. H. (1998) Brittle failure mode plots for compressional and extensional tectonic regimes. *Journal of Structural Geology*, 20, 655-660.
- [33] Armijo et al. (2015) Coupled tectonic evolution of Andean orogeny and global climate. *Earth Science Reviews*, v. 143: 1-35.
- [34] Tosdal, R.M. & Richards, J.P. (2001) Magmatic and structural control on the development of Porphyry Cu ± Mo ± Au deposits. *Reviews in Economic Geology*, v. 14, 157-181.