



LA PRECORDILLERA CHILENA: UNA HISTORIA DE DEFORMACIÓN Y ROTACIONES

C.G. Puigdomenech^{1*}, R. Somoza¹, A. Tomlinson², E. M. Renda¹

¹ IGEBA-CONICET, Buenos Aires, Argentina.

² Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile.

*e-mail: carlapuigdo@gmail.com

ABSTRACT

One of the most conspicuous features of the Central Andes is the change in its structural trend from NW-SE to N-S at 18° S known in the literature as “Bolivian Orocline”. Although the Central Andes rotations pattern (CARP) roughly agrees with the geometry of the orocline, the mechanisms for its genesis and the age at which this phenomenon would have begun are still a matter of discussion.

In this work, 621 oriented samples from Mesozoic and Cenozoic rocks from different zones in northern Chile were analysed. The samples were subjected to different demagnetization processes in order to isolate the characteristic magnetic remanence and calculate tectonic rotations of different blocks. The results obtained from the middle Cretaceous units indicate the existence of clockwise and counterclockwise rotated sites. On the contrary, the data obtained from Upper Cretaceous rocks are slightly rotated (~ 15°) or not rotated at all. These differences in magnitude and sense suggest that the rotations in rocks of the Lower Cretaceous would correspond to local blocks rotations during the Peruvian Phase. On the other hand, given the absence of rotations in rocks located east of the Chintoraste-Quetena-Sierra Las Rabonas-Cerro Jaspe Eocene Fault System, it is proposed as the eastern limit of rotations in the forearc for the study area.

Keywords: Central Andes, tectonic rotation, Chilean Precordillera, paleomagnetism

RESUMEN

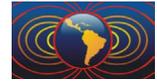
Uno de sus rasgos más conspicuos de los Andes Centrales es el cambio en su trayectoria de NW-SE a N-S a los 18° S conocido en la literatura como “Oroclino Boliviano”. El patrón de rotaciones de los Andes Centrales (CARP) describe a grandes rasgos la naturaleza del oroclino, pero los mecanismos para su génesis y la edad en la cual el fenómeno comenzaría a manifestarse son todavía materia de discusión.

En este trabajo se presentan los datos obtenidos en 621 muestras orientadas provenientes de rocas mesozoicas y cenozoicas de distintas zonas. Los resultados obtenidos en unidades del Cretácico medio indican la existencia de sitios rotados en sentido horario y antihorario. Por el contrario, los resultados de rocas del Cretácico Superior presentan una leve rotación horaria (~15°) o no se encuentran rotados. Esta diferencia en magnitud y sentido sugiere que las rotaciones en rocas cretácicas inferior corresponderían a rotaciones locales de bloques durante la Fase Peruana. Por otro lado, dada la ausencia de rotaciones en rocas situadas al este del Sistema eoceno de falla Chintoraste-Quetena-Sierra Las Rabonas-Cerro Jaspe, se propone al mismo sistema como el límite oriental de las rotaciones en el antearco para la zona de estudio.

Palabras Clave: Andes Centrales, rotaciones tectónicas, Precordillera Chilena.

1. Introducción

La cordillera de los Andes constituye un ejemplo clásico de orógeno no colisional, desarrollado durante el proceso de subducción de litósfera oceánica bajo el margen sudamericano. Luego de 200 Ma de convergencia, existe una marcada segmentación del margen caracterizado por variaciones sistemáticas a lo largo del rumbo en topografía, morfología, tectónica, distribución de cuencas, volcanismo, geometría de la placa



subductada e historia geológica. Una de las características más importantes es el “Oroclino Boliviano”, al igual de la existencia de un patrón de rotaciones tectónicas horarias y antihorarias al sur y al norte del codo de Arica conocido como CARP (Central Andean Rotation Pattern; Somoza *et al.* 1996).

La distribución espacial y temporal del CARP ha mejorado en los últimos años (e.j. Arriagada *et al.* 2003; Rousse *et al.* 2003; Roperch *et al.* 2006; Taylor *et al.* 2007; Narea *et al.* 2015). Sin embargo, los mecanismos que actuaron en su génesis y la edad en la cual se desarrollaron las rotaciones son todavía materia de discusión.

El objetivo de este trabajo es obtener nuevos datos paleomagnéticos a partir de rocas mesozoicas y cenozoicas provenientes de tres áreas ubicadas en la región de Calama, a fin de poder determinar la existencia de uno o varios eventos de deformación involucrados en su formación (Fig. 1).

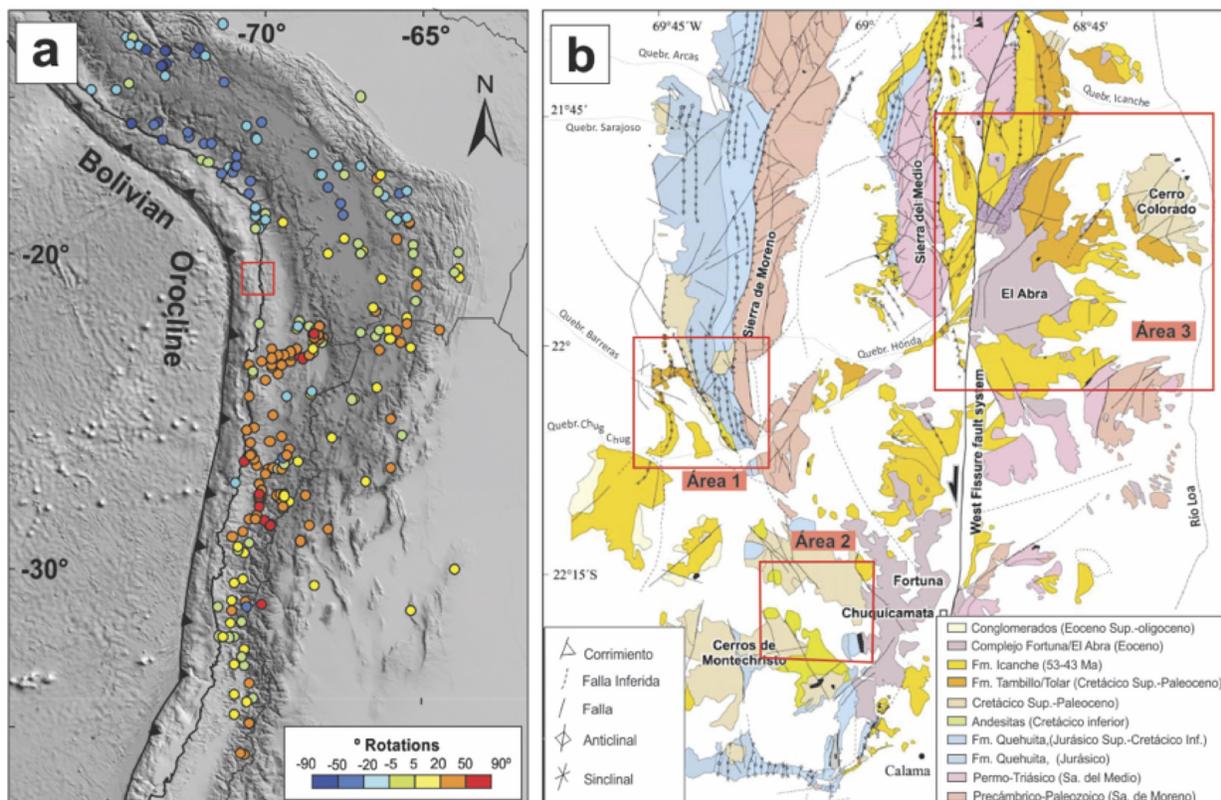


Figura 1. (a) Base de datos de las rotaciones según ejes verticales publicadas de los Andes Centrales. (b) Mapa geológico simplificado del norte de Chile (Haschke y Günther 2003) indicando las tres áreas de estudio.

2. Metodología

En este trabajo se analizaron 621 especímenes obtenidos de rocas sedimentarias, volcánicas y plutónicas del Jurásico al Eoceno tardío en 3 áreas de la localidad de Calama. La obtención de las muestras se realizó mediante una máquina perforadora portátil a gasolina. En el caso de rocas friables, se extrajeron al menos de tres muestras de mano. Las muestras obtenidas fueron orientadas usando brújula magnética y solar. El control de la paleohorizontal se llevó a cabo mediante la medición del plano de estratificación (en el caso de rocas sedimentarias y tobas intercaladas entre las unidades) y mediante observación de la fábrica de compactación en el caso de ignimbritas. En todos los casos se tomaron varias medidas, las cuales fueron posteriormente promediadas.

Todas las muestras fueron sometidas a desmagnetización progresiva térmica y / o de campo alterno (AF) (12 a 16 pasos). La mineralogía magnética fue explorada mediante curvas termomagnéticas de alta temperatura,



ciclos de histéresis y curvas de susceptibilidad magnética (K) vs campo magnético (H).

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante el método de análisis de componentes principales desarrollado por Kirschvink (1980) lo cual permitió la identificación de la magnetización remanente característica (ChRM).

Con el objetivo de analizar la edad relativa entre la remanencia obtenida y la estructura se realizaron las pruebas de plegamiento/basculamiento (foldtest) de McFadden (1990) y Watson y Enkin (1993). Una vez obtenidas las direcciones medias finales (DMF) se procedió al cálculo de rotaciones e *inclination flattening* de acuerdo con Demarest (1983), utilizando los polos de referencia publicados para América del Sur en Somoza (2007) y Somoza y Zaffarana (2008).

3. Resultados

La edad de las remanencias obtenidas para las distintas unidades varía entre el Cretácico medio al Eoceno (Fig. 2), y por lo tanto son previas al desplazamiento principal a lo largo de la Falla Oeste. La Figura 2 corresponde al mapa geológico luego de restaurar los ca. 35-37 km de desplazamiento sinistral aproximado de la Falla Oeste durante el Oligoceno-Mioceno, siguiendo las correlaciones descritas por Dilles *et al.* (1997) y Tomlinson y Blanco (1997); en él se han volcado las rotaciones tectónicas calculadas para las distintas unidades de cada área. Los resultados obtenidos en las tres áreas muestran grandes diferencias no solo en la edad de las remanencias sino también en la magnitud y sentido de las rotaciones tectónicas observadas (Fig.2). Cabe destacar la ausencia de rotaciones en el bloque oriental de la Falla Oeste. Este último resultado, es consistente con la ausencia de discordancias angulares en el registro estratigráfico en el área de Sierra del Medio.

Los resultados obtenidos en la Sierra de Moreno para los depósitos de la Fm. Quehuita (Jurásico-Cretácico) registran una rotación antihoraria de $\sim 20^\circ$ (A en la Fig. 2), mientras que la Monzonita Cuarcifera Barrera (~ 85 Ma) (C en la Fig. 2) y la Fm. Tambillo, no muestran evidencia de rotaciones (B en la Fig. 2). En el Área 2, las volcanitas de la Cuesta de Montecristo (E en la Fig. 2) sugieren $\sim 20^\circ$ de rotación tectónica horaria, previa a la depositación de las lavas de la Fm. Quebrada Mala del Cretácico Superior (F en la Fig. 2).

Esta diferencia en la magnitud y sentido de las rotaciones entre las unidades jurásicas-cretácicas inferiores y las del Cretácico Superior probablemente esté relacionada con la fase Peruana, del Cretácico Tardío temprano. Dicha fase está representada por una discordancia angular en ambas localidades (Ladino *et al.* 1997; Tomlinson *et al.* 2001) producto del alzamiento de bloques de basamento e inversión tectónica de las cuencas extensionales del Jurásico-Cretácico Temprano, alrededor de 90-70 Ma (Amilibia *et al.* 2008; Bascuñán *et al.* 2015).

Sin embargo, al sur del Río Loa la magnitud de la rotación tectónica es similar en las unidades que se encuentran a ambos lados de la discordancia (Arriagada *et al.* 2000; Narea *et al.* 2015; Gómez *et al.* 2017) Esta variabilidad en el sentido y magnitud de la rotación tectónica de diferentes sectores de la Precordillera sugiere que las rotaciones están relacionadas con las estructuras locales.

Con respecto a las unidades del Cretácico Superior en la Sierra de Moreno, éstas no muestran evidencias de rotaciones tectónicas (B y C en la Fig. 2), mientras que al sur (Quebrada Chug Chug y Cerros de Montecristo) se registran rotaciones horarias (D y F en la Fig. 2). Esto sugiere que se trataría de dos bloques estructurales independientes. Sin embargo, ninguna discontinuidad estructural entre ambas localidades ha sido documentada y la magnitud de los errores asociados a las rotaciones no permite validar este supuesto.

Las unidades del Cretácico Superior, Paleoceno Inferior y Eoceno medio en el área de Cerros de Montecristo (E, F, S*, S** en la Fig. 2) presentan cantidades similares de rotación (Somoza *et al.*, 2015; Somoza *et al.*,



2012; y este trabajo). Esto sumado a la continuidad estructural del bloque que contiene estas unidades, indica que estas localidades giraron aproximadamente 20° en sentido horario con posterioridad al emplazamiento del Complejo Los Picos (43-42 Ma). Debido a esto, puede deducirse que la fase K-T, responsable de la discordancia entre los depósitos del Cretácico Superior y Eoceno, no involucró rotación tectónica de bloques.

En contraste, las magnetizaciones pretectónicas de las unidades del Cretácico Superior y del Eoceno en el anticlinal de Chajagua (H-I) no registran rotaciones (Fig. 2). La restauración de la Falla Oeste indica que estas dos áreas están separadas por una falla inversa del Eoceno expuesta en la Sierra Las Rabonas (falla de Sierra Las Rabonas; SLRF en la Fig. 2), con su continuación hacia el norte (en coordenadas restauradas) en la Falla de Cerro Jaspe.

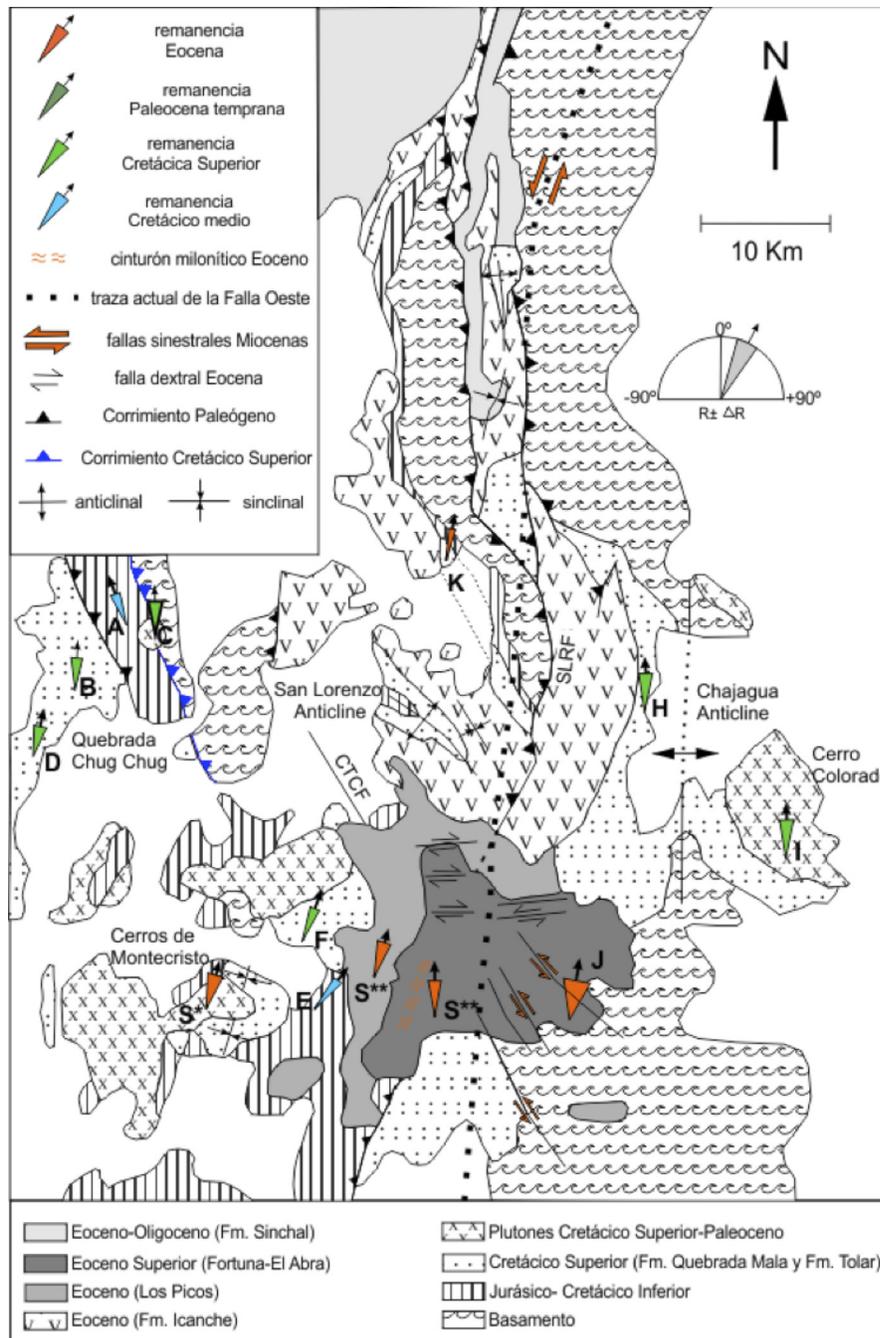


Figura 2: Configuración de la región para el Eoceno después de la restauración del movimiento sinistral del Mioceno temprano de la Falla Oeste. QQ: Quebrada Quinchamale; CJF: Cerro Jaspe Fault; CTCF: Falla de Cerro Tres Cerros; SLRF: Falla de la Sierra de las Rabonas. Las letras corresponden a los resultados paleomagnéticos obtenidos en este trabajo, Somoza *et al.* 2012 (S*) y Somoza *et al.* 2015 (S**). Modificado de Dilles *et al.* (1997) y Tomlinson y Blanco (1997).



En el extremo sur de la Sierra Las Rabonas y en el extremo norte del Complejo Fortuna, la mala exposición, debido a la cubierta aluvial miocena y las complicaciones estructurales relacionadas con la Falla Oeste, oscurecen la continuidad de la Falla Sierra Las Rabonas y su relación con las intrusiones de Los Picos. Sin embargo, esta falla posee el mismo rumbo que la falla inversa expuesta al sur de las intrusiones (Fig. 2). Dado que las rotaciones parecen estar circunscriptas al bloque colgante de la ó las fallas y en virtud a que no aparecen en el bloque bajo, es posible que sean producto del movimiento diferencial a lo largo de estas estructuras. La edad de esta rotación está acotada por el registro de rotaciones en el Complejo Los Picos (43-42 Ma) y la ausencia de estas en el Complejo Fortuna (39-37 Ma; Somoza *et al.*, 2015). Esta deformación corresponde a las etapas más tempranas de la Fase orogénica Incaica.

Dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita en dos zonas miloníticas ubicadas 3.4 y 4.9 km al suroeste del poblado abandonado de Chuquicamata, arrojaron edades de 36.6 ± 0.5 Ma (Tomlinson *et al.* 2010) y 36.3 ± 0.6 Ma respectivamente (Maksaev 1990) y son interpretadas como edades de enfriamiento del evento de deformación que generó las zonas de cizalla dúctil en el Eoceno. Se estima que el desplazamiento representado por estas zonas no es significativo, probablemente un máximo del orden de decenas de metros para las zonas de mejor desarrollo. Sin embargo, las zonas miloníticas tienen el mismo rumbo que la Falla Quetena y la faja de deformación compresiva de Quetena-Chintoraste expuesta al SSO del complejo, por lo cual se interpreta que representan una continuación en el tiempo del mismo régimen tectónico de compresión incaica en el Eoceno.

Los datos obtenidos para el Complejo El Abra sugieren la presencia de una pequeña rotación horaria (J en la Fig. 2), aunque es posible que la PSV no haya sido promediada adecuadamente. Dado que el Complejo Fortuna carece de evidencia de rotación sobre eje vertical, las rotaciones en el Complejo El Abra, si las hubiera, probablemente sean producto del desplazamiento de la Falla Oeste durante el Oligoceno-Mioceno. Durante dicho desplazamiento las fallas sinestrales observadas en la parte noroeste del complejo acomodaron acortamiento este-oeste y una rotación sobre eje vertical de tipo dominó.

4. Conclusiones

Los resultados paleomagnéticos obtenidos permiten distinguir al menos dos eventos de deformación asociados con rotaciones tectónicas de bloques. El primero de ellos asociado con la Fase Peruana, representada por las diferencias en magnitud y sentido de las rotaciones en rocas del Cretácico Inferior y Cretácico Superior. Las mismas corresponderían a rotaciones tectónicas locales. El segundo evento rotacional estaría asociado con la Fase Incaica temprana, previo al emplazamiento del Complejo Fortuna (~38 Ma).

Por otro lado, la ausencia de rotaciones en rocas cretácicas y eocenas ubicadas en el bloque oriental del Sistema de Fallas eoceno Chintoraste-Quetena-Sierra Las Rabonas-Cerro Jaspe, sugiere que el mismo escapó a la deformación comportándose como un bloque rígido que fue desplazado sinistralmente por la Falla Oeste durante el Oligoceno tardío-Mioceno.

Referencias

- Amilibia, A., Sàbat, F., McClay, K. R., Muñoz, J. A., Roca, E., y Chong, G. 2008. The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology*, 30: 1520–1539.
- Arriagada, C., Roperch, P., y Mpodozis, C. 2000. Clockwise block rotations along the eastern border Cordillera de Domeyko, Northern Chile (22° 45'-30'S). *Tectonophysics* 326 (1), 153-171.
- Arriagada, C., Roperch, P., Mpodozis, C., Dupont-Nivet, G., Cobbold, P. R., Chauvin, A., y Cortés, J. 2003. Paleogene clockwise tectonic rotations in the forearc of central Andes, Antofagasta region, northern Chile. *Journal of Geophysical Research* 108 (B1), doi:10.1029/2001JB001598 .



- Bascuñán, S., Arriagada, C., Le Roux, J. P., y Deckart, K. 2015. Unraveling the Peruvian phase of the Central Andes: stratigraphy, sedimentology and geochronology of the Salar de Atacama Basin (22°30'-23°S), northern Chile. *Basin Research: 1–28*.
- Demarest Harold H. 1983. Error Analysis for the Determination of tectonic rotation from paleomagnetic data. *Journal of Geophysical Research*, 88, 4321–4328.
- Dilles, J. H., Tomlinson, A. J., Martin, M. W., y Blanco, N. 1997. El Abra and Fortuna complexes: a porphyry copper batholith sinistrally displaced by the Falla Oeste. En VIII Congreso Geológico Chileno, pp. 1883–1887.
- Gómez, I., Peña, M., Narea, K., y Arriagada, C. 2017. Límite oriental del patrón de rotaciones tectónicas de los Andes Centrales, Norte de Chile. En XX Congreso Geológico Argentino, pp. 117–119.
- Haschke, M., y Günther, A. 2003. Balancing crustal thickening in arcs by tectonic vs. magmatic means. *Geology*, 31, 933.
- Kirschvink, J. L. 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal International*, 62, 699–718. Blackwell Publishing Ltd.
- Ladino, M., Tomlinson, A., y Blanco, N. 1997. Nuevos antecedentes para la edad de la deformación Cretácica de Sierra de Moreno, II Región de Antofagasta-Norte de Chile.pdf. En VIII Congreso Geológico Chileno, pp. 103–107.
- Maksaev, V. 1990. Metallogeny, geological evolution, and thermochronology of the Chilean Andes between latitudes 21° and 26° south, and the origin of major porphyry copper deposits. Ph.D. Thesis (Unpublished), Dalhousie University: 554 p. Halifax, Nova Scotia, Canada.
- McFadden, P. L. 1990. A new fold test for palaeomagnetic studies. *Geophysical Journal International*, 103, 163–169.
- Narea, K., Peña, M., Bascuñán, S., Becerra, J., Gómez, I., Deckart, K., Munizaga, F., Maksaev, V., Arriagada, C., y Roperch, P. 2015. Paleomagnetism of Permo-Triassic and Cretaceous rocks from the Antofagasta region, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 64, 261–272.
- Roperch, P., Sempere, T., Macedo, O., Arriagada, C., Fornari, M., Tapia, C., García, M., y Laj, C. 2006. Counterclockwise rotation of late Eocene-Oligocene fore-arc deposits in southern Peru and its significance for oroclinal bending in the central Andes. *Tectonics*, 25, 1–29.
- Rousse, S., Gilder, S., Farber, D., McNulty, B., Patriat, P., Torres, V., y Sempere, T. 2003. Paleomagnetic tracking of mountain building in the Peruvian Andes since 10 Ma. *Tectonics*, 22 (5), 1-21, doi:10.1029/2003TC001508
- Somoza, R. 2007. Eocene paleomagnetic pole for South America: Northward continental motion in the Cenozoic, opening of Drake Passage and Caribbean convergence. *Journal of Geophysical Research*, 112: B03104.
- Somoza, R., Singer, S., y Coira, B. 1996. Paleomagnetism of upper Miocene ignimbrites at the Puna: An analysis of vertical-axis rotations in the Central Andes. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 101 (5), 11387-11400
- Somoza, R., y Zaffarana, C. B. 2008. Mid-Cretaceous polar standstill of South America, motion of the Atlantic hotspots and the birth of the Andean cordillera. *Earth and Planetary Science Letters*, 271, 267–277.
- Taylor, G. K., Grocott, J., Dashwood, B., Gipson, M., y Arévalo, C. 2007. Implications for crustal rotation and tectonic evolution in the central Andes fore arc: New paleomagnetic results from the Copiapó region of northern Chile, 26°-28°S. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112, 1–22.
- Tomlinson, A., Blanco, N. P., Maksaev, V., Dilles, J. H., Grunder, A. L., y Ladino, M. 2001. Geología de la Precordillera Andina de Quebrada Blanca-Chuquicamata Regiones I y II (20°30' - 22°30' S). 1–448 pp.
- Tomlinson, A. J., y Blanco, N. 1997. Structural evolution and displacement history of the West fault System, Precordillera, Chile: Part 1, synmineral history. En VIII Congreso Geológico Chileno, pp. 1873–1877. Antofagasta.
- Tomlinson, A.J.; Blanco, N.; Dilles, J.H. 2010. Carta Calama, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Preliminar 8: 3 anexos, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago
- Watson, G. S., y Enkin, J. 1993. The Fold Test in paleomagnetism as a parameter estimation problem. *Geophysical Research Letters*, 20, 2135–2137.