

UBICACIÓN CRONOESTRATIGRÁFICA DE LAS UNIDADES DEL PALEOZOICO SUPERIOR DE LA CUENCA DE TARIJA A PARTIR DE DATOS PALEOMAGNÉTICOS

Leandro Gallo¹, Renata N. Tomezzoli¹, Alejandra Dalenz Farjat², Roberto M. Hernández²

1: Laboratorio de Paleomagnetismo Daniel A. Valencio, IGEBA, CONICET.

len.gallo@gmail.com, renata@gl.fcen.uba.ar

2: XR-GEOMAP. Avenida Ricardo Durand 397. Salta.

alejandra@xrgeomap.net, hernandezr@xrgeomap.net

Palabras clave: Cuenca de Tarija, Paleozoico Superior, Magnetoestratigrafía, Anisotropía de Susceptibilidad Magnética

ABSTRACT

Cronostratigraphic location of Upper Paleozoic units of the Tarija Basin in the light of paleomagnetic data

We carried out a magnetostratigraphic and anisotropy of magnetic susceptibility study of late Paleozoic sediments of the Tarija Basin. A continuous section of about 800 m including several sedimentary facies in a decametric scale in the vicinity of the town of San Alberto, located in Bolivia on the border with Argentina was sampled.

The paleomagnetic analysis revealed a highly stable component with blocking temperatures above 620 °C. This magnetization is interpreted as a characteristic remanent magnetization, carried by hematite, was acquired during the deposition of sediments and prior to deformation, on the basis of a positive fold test (Enkin, 2003). The presence of reverse polarity magnetizations along the entire profile indicates its deposition and diagenesis during the Kiaman Superchron (319-269 Ma). Toward the top of the sequence the first normal site appears in Ipaguazú Formation allowing time limit within the depositional sequence.

We interpreted based on the arrangement of the axes of AMS that deformational fabric was not produced exclusively by the Andic orogenic cycle, but a previous deformation of Gondwanan origin may have occurred in accordance with equivalent neighboring factories found in Paleozoic basins. This ancient strain seems to affect only Cangapi assigned to the Permian Formation, not to Vitiacua Ipaguazú Formations and younger.

INTRODUCCIÓN

Grandes descubrimientos de petróleo y gas fueron desarrollados en los últimos 40 años en las Sierras Subandinas, la investigación enfocada en la exploración de hidrocarburos ha incrementado el conocimiento de manera exponencial. No obstante, el conocimiento de la estratigrafía del

Paleozoico superior de la Cuenca de Tarija (Figura 1) en las Sierras Subandinas presenta serios problemas geológicos, tales como la falta de dataciones radiométricas y paleontológicas. La dificultad de relacionar el contenido de polen con cuencas adyacentes por ser especies endémicas, los cambios climáticos bruscos en períodos cortos de tiempo y los cambios faciales muy marcados en las unidades mapeables, conforman los principales obstáculos para correlacionar las unidades que integran la cuenca.

El conocimiento detallado de la distribución de facies, tasas de sedimentación y configuración de las cuencas es fundamental para entender la historia de maduración, migración y entrapamiento de hidrocarburos, dado que la madurez de la materia orgánica y la generación de hidrocarburos están en estrecha relación con la profundidad de soterramiento.

En esta cuenca, las rocas generadoras de hidrocarburos son Devónicas y entraron en ventana de generación en dos fases. La primera abarca el Devónico hasta el Carbonífero y se debe a la profundización de la cuenca Paleozoica (Baby *et al.* 1995, Moretti *et al.*, 1996; Di Salvo and Villar, 1999; Starck, 1999). Durante la segunda fase se cree que los hidrocarburos expelidos antes del Triásico rellenaron trampas estratigráficas o las posiciones altas de las estructuras pre-andinas.

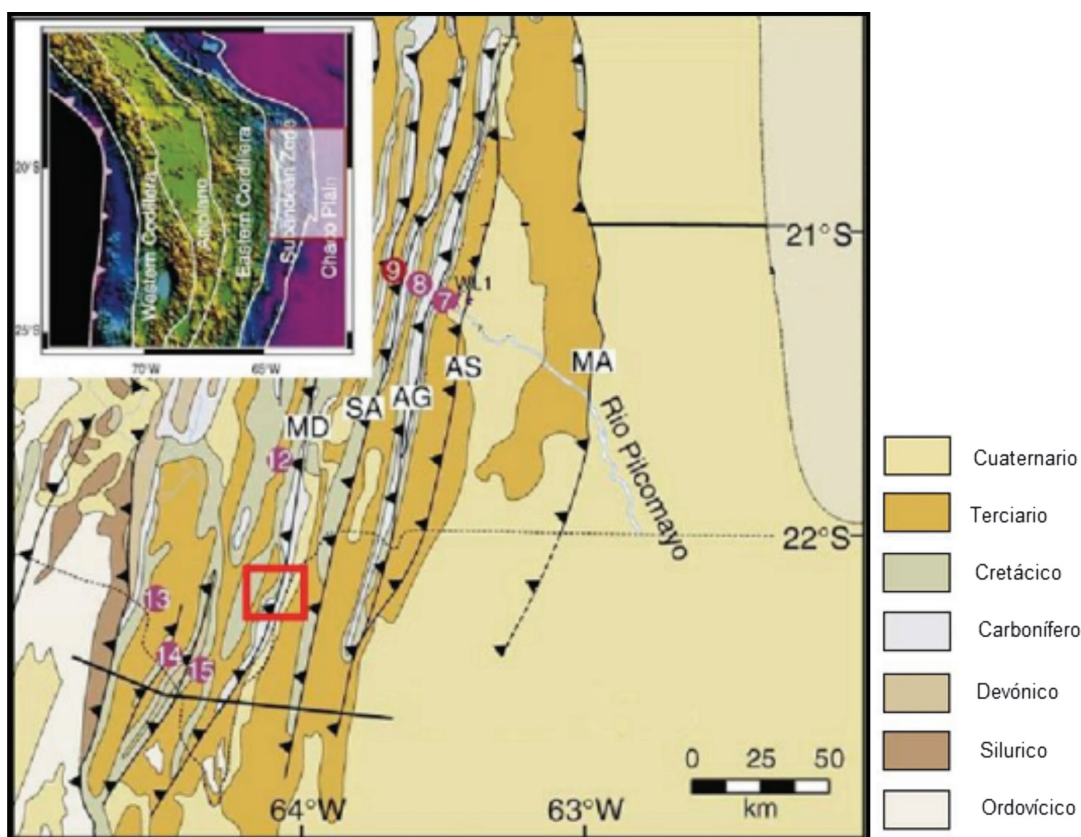


Figura 1. Mapa geológico – estructural de los Andes Centrales en los que se ubica el área de estudio (recuadro rojo) en un contexto regional. Modelo de elevación digital de los Andes Centrales con las principales provincias morfoestructurales (arriba-izquierda). MD: Falla Mandiyuti; SA: Falla San Antonio; AG: Aguarañe; AS: Agua Salada; MA: Mandayapecua. Modificado de Uba (2009)

Por estas razones la determinación de polos paleomagnéticos de calidad, la realización de columnas magnetoestratigráficas y el estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética complementado con otros estudios de mineralogía magnética, pueden servir como herramientas únicas de correlación y posible datación. Además se pretende a partir del estudio de las unidades del Paleozoico Superior acotar las edades en la evolución de la cuenca, y correlacionarlas con otras del Paleozoico - Triásico de Argentina, sur de Bolivia. El paleomagnetismo permite ubicar cronoestratigráficamente a partir de la obtención de un registro de polaridades del campo magnético terrestre.

La zona de estudio se enmarca en el flanco occidental del anticlinal Iñiguazú – Boyuy en una posición cercana al hundimiento sur del eje (Figura 2) con un rumbo 170° y un buzamiento de 3° a 5°.

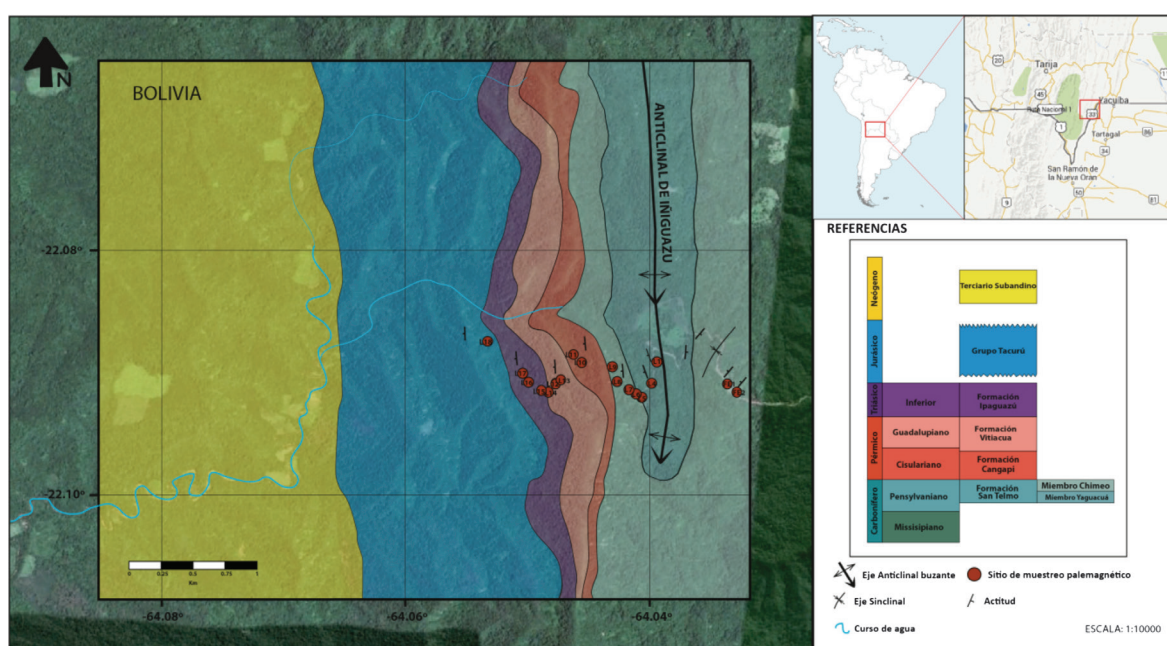


Figura 2. Mapa geológico del anticlinal de Iñiguazú – Boyuy donde se observan con círculos rojos los sitios donde se realizó el estudio paleomagnético (Gallo, 2014).

ESTUDIO MAGNETOESTRATIGRÁFICO

El supercron magnético reverso Carbonífero-Pérmico, conocido como Kiaman marca un período de 40-50 Ma en el cual el campo magnético terrestre estuvo caracterizado por conservar su polaridad reversa. Opdyke *et al.* (2001) establecen el inicio del intervalo Kiaman en 319 Ma y su final en 265 Ma (Carbonífero-Pérmico). El regreso al geodínamo con reversiones regulares y aperiódicas se conoce como intervalo Illawarra y se inició a los 265 Ma (Steiner, 2006; Lanci *et al.*, 2013; Figura 2). De esta manera el Kiaman se puede utilizar como un marcador temporal para correlacionar secuencias estratigráficas de escala local a global.

El análisis paleomagnético revela una componente de gran estabilidad con temperaturas de bloqueo por encima de los 620° C, indicando que el mineral portador de la magnetización es la hematita. Esta magnetización es interpretada como una magnetización remanente característica adquirida durante la depositación de la secuencia y previo al plegamiento (pre-tectónica en base a los resultados positivos obtenidos del test de plegamiento (Enkin, 2003).

Con los resultados obtenidos hasta el momento, se realizó la secuencia de polaridades magnéticas usando la inclinación promedio de Polos Geomagnéticos Virtuales (PGV's) por sitio de muestreo (Figura 3). Todos los sitios de muestreo presentan polaridad reversa hasta la mitad del espesor muestreado de la Formación Ipaguzú (Gallo, 2014).

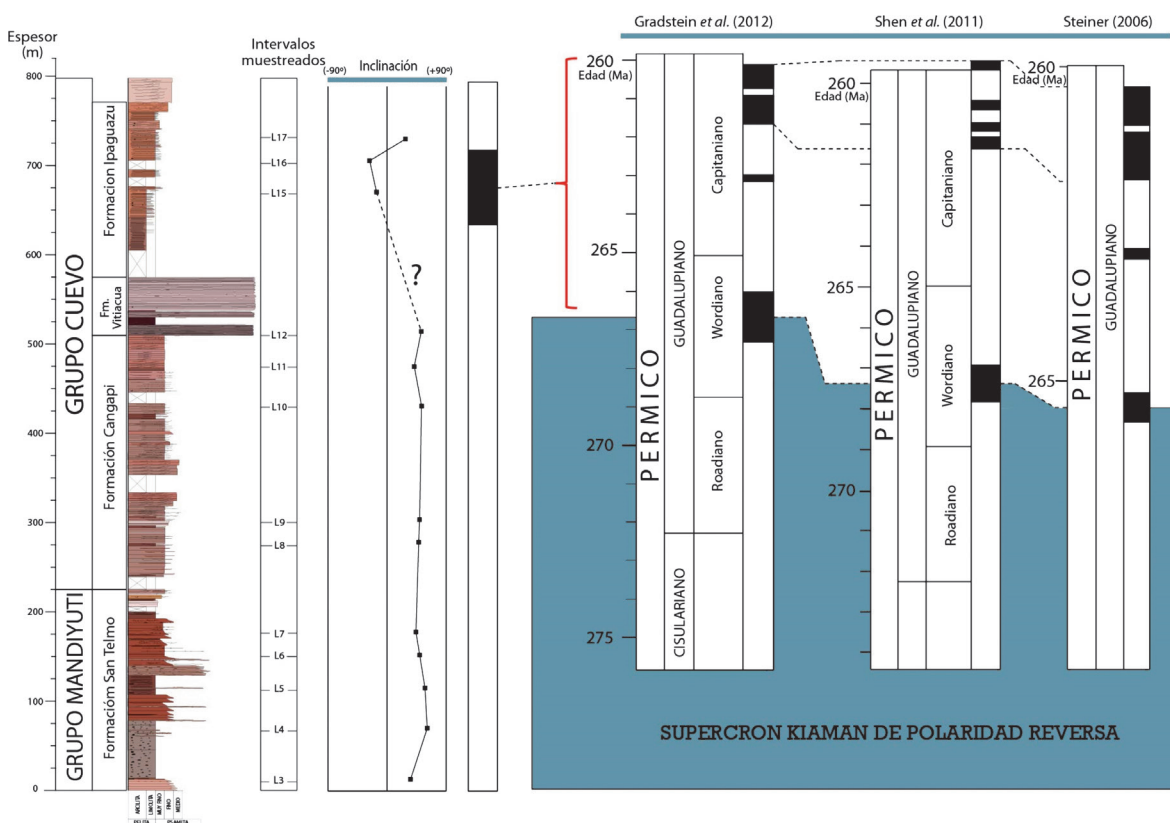


Figura 3. Resultados magnetoestratigráficos de la sección estudiada. La secuencia de polaridades es comparada con una presentada por Steiner (2006), Shen *et al.* (2011) y Gradstein *et al.* (2012). Figura adaptada de Lanci *et al.* (2013). Blanco /negro: inclinación positiva/negativa: reverso/normal para el hemisferio Sur.

De acuerdo a la edad estimada para las formaciones involucradas y el espesor muestreado, que representa varios millones de años, se interpreta que esta magnetización, fue adquirida durante el superchron Kiaman. El primer sitio con polaridad normal se encuentra dentro de la Formación Ipaguzú y si bien la densidad de muestreo es baja y no permite definir con precisión el inicio del intervalo Illawarra, permite asignarle a esta parte del perfil una edad máxima de 269 Ma, o sea post-Kiaman (Figura 3).

ESTUDIO DE ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

La susceptibilidad magnética es una propiedad física de los minerales magnéticos que forman las rocas y representa la capacidad de éstas a ser magnetizadas bajo un campo magnético débil predeterminado.

La anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) puede ser descripta como un tensor simétrico de segundo orden al cual puede asociarse un elipsoide definido por las orientaciones de las susceptibilidades principales $K1 = K_{máx}$, $K2 = K_{int}$ y $K3 = K_{min}$ (Figura 4).

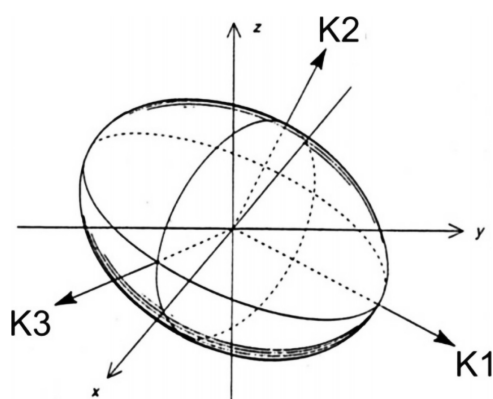


Figura 4. Representación gráfica del elipsoide de susceptibilidad magnética, definido por los ejes de máximo (K1), intermedio (K2) y mínimo (K3) de susceptibilidad (Tarling y Hrouda 1992)

El elipsoide de anisotropía responde al arreglo mineralógico interno de las rocas. En aquellas rocas que no presentan ningún tipo de anisotropías internas, la resultante sería una esfera. Este elipsoide se puede corresponder con la orientación de las fábricas sedimentaria o tectónica de las rocas (Hamilton y Rees, 1970; Hrouda y Stranik, 1985; Lowrie y Hirt, 1987). En el caso de rocas deformadas, las susceptibilidades principales, a menudo tienen conexión con las direcciones principales de la deformación, determinadas a partir de marcadores convencionales. Por lo tanto, el elipsoide de susceptibilidad magnética podría ser coaxial con el elipsoide de deformación finita (Borradaile, 1988). En este caso K_{min} coincidiría con el eje de deformación máximo y $K_{máx}$ y K_{int} podrían corresponder indistintamente a los ejes de deformación intermedios y mínimos. También se ha demostrado que la forma de ambos elipsoides es coaxial (Borradaile, *et al.*, 1987; Borradaile y Alford, 1987; etc).

Graham (1966) fue el primero en establecer una conexión entre la fábrica de ASM y la fábrica de rocas con acortamiento paralelo a la estratificación (APE), que es una componente del tensor de deformación interna finita acumulada en la historia de deformación de las fajas plegadas y

corridas (Geiser, 1988). Numerosos estudios en fajas plegadas y corridas antiguas y activas, demostraron que la ASM es útil para interpretar fábricas deformadas, pero el significado tectónico de la foliación y lineación magnética varía con la litología y la ubicación (Figura 5).

La foliación magnética (plano normal al K_{min}) coincide típicamente con la estratificación en rocas poco deformadas y resulta paralela al clivaje en rocas fuertemente deformadas. La lineación magnética (K_{max}) traza típicamente la intersección entre fábricas con APE y fábricas sedimentarias no deformadas, y es subparalela al rumbo general de la estructura (Figura 5; Borradaile and Tarling, 1981; Bakhtari *et al.*, 1998).

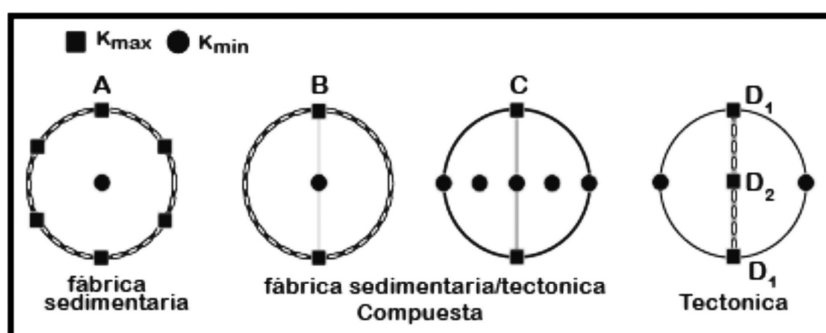


Figura 5. Modelo conceptual de la evolución de la fábrica de ASM desde una fábrica sedimentaria sin deformación a una fábrica tectónica (modificado de Weil y Yonkee, 2009).

Como consecuencia de ello la medida de la ASM se ha convertido en una técnica alternativa en el estudio y cuantificación de la deformación en las rocas. Además, el análisis de la fábrica magnética es una técnica no destructiva y está siendo de gran aceptación entre geólogos estructuralistas y sedimentólogos.

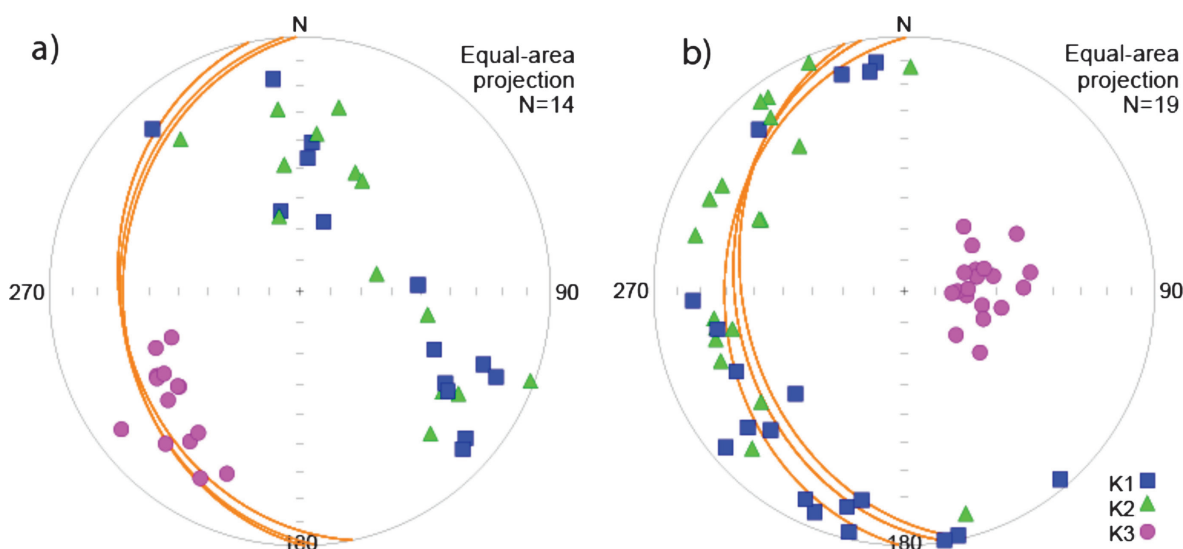


Figura 6. Proyecciones estereográficas "in situ" de los sitios correspondientes a las dos improntas características (Gallo, 2014).

Del análisis direccional de la fábrica se ve que hay dos improntas claramente definidas (Figura 6). En una de las poblaciones, los ejes K_{min} de ASM tienden a disponerse groseramente paralelos a los polos de los planos de estratificación con una imbricación leve menor a los 10° respecto al mismo (Figura 6b). En la otra población en cambio, los K_{min} están contenidos en los planos de estratificación y siempre hacia el SO (Figura 6a).

Es interesante observar que en aquellos sitios donde el K_{min} es perpendicular a la estratificación (Figura 6b), el grado de anisotropía es bajo (menor al 6%). Estas características permiten definirla como una fábrica de tipo sedimentaria típica.

En aquellos sitios donde el K_{min} está contenido en el plano de estratificación (Figura 6a), el grado de anisotropía es mayor (entre 15% y 41%) y se dio principalmente en las areniscas. Dichas características se enmarcan una fábrica de tipo tectónica.

La fábrica esperada para sedimentos con APE es de tipo sedimentaria a tectónica, pasando por una fábrica transicional, donde el K_{max} migra hasta disponerse paralelo al rumbo de la estructura y al finalizar el ciclo, el K_{min} se acomoda paralelo a la dirección de máximo acortamiento en la horizontal (Figura 5).

Hasta el presente, el APE documentado y aceptado en el área de estudio se asigna al Ciclo Ándico, que comienza a estructurar a las Sierras Subandinas con posterioridad a los 9 Ma (Hernández y Echavarría, 2009) y no habría evidencias de deformación previas, más que las discordancias intracarboníferas de supuesto origen glaciar. Sin embargo, si la deformación hubiese sido únicamente de origen andino, en el caso de los sitios cuya fábrica es de origen tectónico, el producto del APE debería haber concluido con un K_{max} agrupado con un rumbo paralelo a la estructura N-S de las sierras en la zona de estudio. Por otro lado, para todos los intervalos muestreados, si la fábrica fuese producto del acortamiento andino, el K_{min} debería ser perpendicular al rumbo de la estructura. Sin embargo, este factor no se desprende de ninguno de los intervalos muestreados, el K_{min} no es perpendicular a la estructura y el K_{max} no tiene el mismo rumbo que la estructura actual (Figura 6). De este análisis se desprende que la fábrica de ASM encontrada no es producto del ciclo ándico exclusivamente, sino que sería previa el producto de al menos dos orogenias distintas.

O sea que la estructura actual del área sería la consecuencia de al menos dos fases de deformación distintas. Una deformación pre-Andina, que dio como resultado la fábrica tectónica que contiene al K_{min} contenido en el plano de estratificación, con dirección SO, indicando una dirección de máximo esfuerzo “*paleo* σ_1 ” (SO-NE) y una segunda fase de deformación que correspondería al ciclo Andino, que habría comenzado a estructurar a las Sierras Subandinas hace 9 Ma (Hernández y Echavarría, 2009) y tiene como resultado en el área que nos compete, la estructuración del anticlinal de Iñiguazu-Boyuy con rumbo N-S. Posiblemente la primer deformación haya sido de origen Gondwánico en concordancia con patrones de ASM similares documentados en otras cuencas paleozoicas vecinas (Tomezzoli *et al.*, 2006 y 2013). Es interesante notar que esta deformación “*gondwánica*” afecta únicamente hasta la Formación Cangapi, asignada hasta el presente al Pérmico, no así a las Formaciones Vitiacua e Ipaguezú más jóvenes.

CONCLUSIONES

A partir del estudio paleomagnético de las unidades aflorantes en el anticlinal de Iñiguazú fue posible realizar una secuencia de polaridades que facilitó la construcción de una columna magnetoestratigráfica preliminar. La misma se caracteriza por presentar magnetizaciones de polaridad reversa hasta el primer sitio con polaridad normal dentro de la Formación Ipaguazú, sugiriendo que la deposición y diagénesis de los sitios con polaridad reversa fue dentro del supercrón Kiaman (pre-269 Ma). Conforme las edades aceptadas hasta el momento, la edad de la Formación Ipaguazú sería post 269 Ma.

Del estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética surge que hay dos improntas magnéticas distintas: una fábrica de tipo sedimentaria y otra fábrica de tipo tectónica. En los sitios con fábrica sedimentaria el grado de anisotropía es muy bajo y varía entre 3% y 10%, indicando una baja excentricidad del elipsoide de ASM. En los sitios con fábrica tectónica la anisotropía es alta y varía entre 15% y 41%, típico de rocas deformadas. Hay un control litológico en las fábricas observadas. Las areniscas presentaron mayor deformación que las pelitas (Gallo 2014).

Del análisis direccional de los ejes de anisotropía surge que la fábrica de ASM encontrada no es producto del Ciclo Ándico, sino que sería previa. La disposición de los ejes de ASM de los sitios de impronta tectónica no es coaxial con la distribución actual de esfuerzos evidenciando una fase de deformación previa. Ponemos de manifiesto que la estructura actual del área sería la consecuencia de al menos dos fases de deformación distintas. Una deformación pre-Andina cuya dirección de máximo esfuerzo "*paleo* σ_1 " proviene del SO, y por lo tanto sería de posible de origen gondwánico en concordancia con la deformación documentada en otras cuencas paleozoicas vecinas y una fase posterior que correspondería al Ciclo Andino. Esta deformación antigua parecería afectar únicamente hasta la Formación Cangapi asignada al Pérmico, no así a las Formaciones Vitiacua e Ipaguazú más jóvenes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con la colaboración y logística de XR-GeoMap y financiado con los Proyectos de Investigación UBACyT 894, PICT 2272 y Proyecto de Vinculación Tecnológica "Ing. E. Mosconi".

REFERENCIAS CITADAS

- Baby, P., G. Herail, R. Salinas, y T. Sempere, 1992, Geometry and kinematic evolution of passive roof duplexes deduced from section balancing: example from the Foreland thrust system of the southern Bolivia Subandean zone: *Tectonics*, v. 11, p. 523 – 536.
- Bakhtari, H.R., Frizon de Lamotte, D., Aubourg, C., y Hassanzadeh, J., 1998. Magnetic fabrics of Tertiary sandstones from the arc of Fars (eastern Zagros, Iran). *Tectonophysics* 284, 299–316.
- Borradaile, G.J., 1988. Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain: *Tectonophysics*, 156, 1–20.
- Borradaile, G., 1987. Anisotropy of magnetic susceptibility: rock composition versus strain. *Tectonophysics*, 138 (2), 327-329.
- Borradaile, G., y Alford, C., 1987. Relationship between magnetic susceptibility and strain in laboratory experiments. *Tectonophysics*, 133 (1), 121-135.
- Borradaile, G.J., y Tarling, D.H., 1981, The influence of deformation mechanisms on magnetic fabrics in weakly deformed rocks: *Tectonophysics*, v. 77, p. 151–168.
- Di Salvo, A., y H. J. Villar, 1999, Los sistemas petrolíferos del área oriental de la Cuenca Paleozoica Noroeste, Argentina: IV Congreso de Exploración y desarrollo de hidrocarburos Acta, Mar del Plata, Argentina: Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, p. 83 – 100.
- Enkin, R. J. (2003). The direction–correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 212(1), 151-166.
- Gallo, L. C., 2014. Paleomagnetismo del Paleozoico Superior en el Anticlinal de Iñiguazu, Sierras Subandinas. Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias Geológicas. Trabajo Final de Licenciatura, 100 páginas. Inédito.
- Geiser, P.A., 1988, Mechanisms of thrust propagation; some examples and implications for the analysis of overthrust terranes: *Journal of Structural Geology* 10, 829–845.
- Graham, J.W., 1966, Significance of magnetic susceptibility in Appalachian sedimentary rocks, in Steinhart, J.S., and Smith, T.J., eds., *The Earth Beneath the Continents: American Geophysical Union Geophysical Monograph* 10, 327–348.
- Hamilton, N., and Rees, A. I., 1971. The anisotropy of magnetic susceptibility of the Franciscan rocks of the Diablo Range, Central California. *Geologische Rundschau* 60 (3), 1103-1124.
- Hernández, R.M. y Echavarría, L., 2009. Faja plegada y corrida subandina del Noroeste Argentino: estratigrafía, geometría y cronología de la deformación. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (1): 68-80.
- Hrouda, F., and Stráník, Z., 1985. The magnetic fabric of the Ždánice thrust sheet of the Flysch Belt of the West Carpathians: sedimentological and tectonic implications. *Sedimentary Geology*, 45 (1), 125-145.
- Lanci, L., Tohver, E., Wilson, A., and Flint, S., 2013. Upper Permian magnetic stratigraphy of the lower Beaufort Group, Karoo Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 375, 123-134.
- Lowrie, W., and Hirt, A.M., 1987, Anisotropy of magnetic susceptibility in the Scaglia Rossa pelagic limestone: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 82, p. 349–356.
- Moretti, I., P. Baby, E. Méndez, y D. Zubieta, 1996, Hydrocarbon generation in relation to thrusting in the Sub-Andean zone from 18° to 22°S, Bolivia: *Petroleum Geoscience*, v. 2, p. 17– 28.

- Opdyke, N.D., Mushayandebvu, M., De Wit, M.J., 2001. A new palaeomagnetic pole for the Dwyka System and correlative sediments in sub-Saharan Africa. *Journal of African Earth Sciences* 33 (1): 143–153.
- Starck, D., 1999, Los sistemas petroleros de la Cuenca de Tarija: IV Congreso de Exploración y desarrollo de hidrocarburos Acta, Mar del Plata, Argentina: Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, p. 63 – 82.
- Steiner, M.B., 2006. The magnetic polarity timescale across the Permian–Triassic boundary. en: Lucas, S.G., Cassinis, G., Schneider, J.W. (Eds.), *Non-Marine Permian Biostratigraphy and Biochronology*. Geological Society of London 15–38.
- Tarling, D. H. y Hrouda, F. 1993. *The magnetic anisotropy of rocks*. Chapman & Hall. London. Se1 8 Hn. 217 p.
- Tomezzoli, R.N., Vizán, H., Tickyj, H., Woroszylo, ME., 2013. Revisión de la posición del polo paleomagnético de Sierra Chica en la curva de desplazamiento polar aparente del Gondwana. *Proceedings of Third Biennial Meeting of Latinmag, Volumen 3, Special Issue Montevideo*. <http://www.geofisica.unam.mx/LatinmagLetters/LL13-03-SP/LLv3spIndex.html>
- Tomezzoli, R.N., Saint Pierre, T., and Valenzuela, C., 2009. New Palaeomagnetic results from Late Paleozoic volcanic units along the western Gondwana in La Pampa, Argentina. *Earth and Planets Space*, 60, 1-7.
- Uba, C. E., Kley, J., Strecker, M. R., and Schmitt, A. K., 2009. Unsteady evolution of the Bolivian Subandean thrust belt: the role of enhanced erosion and clastic wedge progradation. *Earth and Planetary Science Letters* 281(3): 134-146.
- Weil, A. B., and Yonkee, A., 2009. Anisotropy of magnetic susceptibility in weakly deformed red beds from the Wyoming salient, Sevier thrust belt: Relations to layer-parallel shortening and orogenic curvature. *Lithosphere* 1(4): 235-256.