

# Paleomagnetismo del Grupo Santa Victoria en la sierra de Mojotoro, Salta: aportes a la reconstrucción paleogeográfica de Pampia en el Paleozoico temprano

Constanza RODRÍGUEZ PICEDA<sup>1</sup>, Pablo R. FRANCESCHINIS<sup>1,2</sup>, Mónica P. ESCAYOLA<sup>2,3</sup> y Augusto E. RAPALINI<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Buenos Aires, Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

<sup>3</sup> Universidad Nacional de Tierra del Fuego, Ushuaia.

Email: crpiceda@gmail.com

Editor: Diego A. Kietzmann

## RESUMEN

Estudios sedimentológicos, de magnetofábrica y paleomagnéticos fueron realizados en la Formación La Pedrera (Grupo Santa Victoria) de edad ordovícica temprana en la sierra de Mojotoro, provincia de Salta. Estos estudios tienen el objetivo de contribuir al conocimiento de la posición paleogeográfica del bloque de Pampia durante el Paleozoico temprano en relación al supercontinente de Gondwana. Se coleccionaron muestras orientadas en 12 sitios distribuidos en tres localidades. Estos afloramientos consisten en depósitos de plataforma media a proximal de composición principalmente cuarcítica. Los estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) sugieren una fábrica deposicional en una de las localidades, mientras que en las otras dos no se puede descartar una cierta influencia tectónica en la fábrica. El estudio paleomagnético permitió determinar una componente magnética característica portada por hematita en los 12 sitios. A partir del promedio de los polos geomagnéticos virtuales de cada sitio, se obtuvo un polo paleomagnético para el Grupo Santa Victoria en estas localidades que se ubica en 340,4°E 38,3°N A95=8,8°. La posición de este polo sugiere que ninguna de las tres localidades sufrió rotaciones tectónicas de significación por la orogenia andina o eventos anteriores. Sin embargo, presenta una paleolatitud algo más baja que la esperada según los polos de referencia de similar edad para el Gondwana. Ensayos de magnetizaciones isotérmicas direccionadas sugieren que esta diferencia no se debería a errores de inclinación por compactación. Por su parte, el polo del Grupo Santa Victoria discrepa con los polos obtenidos para el Grupo Mesón (Cámbrico Medio a Superior) y la Formación Santa Rosita (Ordovícico basal), al norte de la zona de estudio, pero en la misma región. Estas discrepancias se pueden adjudicar a la posible presencia de rotaciones tectónicas andinas según ejes verticales en las localidades ubicadas al norte de la zona de trabajo o bien indicar que el movimiento de Pampia a lo largo del margen del Cratón del Río de la Plata ya habría concluido o estaba próximo a concluir en el Ordovícico Temprano.

**Palabras clave:** *Paleomagnetismo, Pampia, Gondwana, Grupo Santa Victoria, Sierra de Mojotoro*

## ABSTRACT

*Paleomagnetism of the Santa Victoria Group in the Mojotoro Range, Salta: contributions to the paleogeographic position of Pampia in Early Paleozoic.*

Sedimentologic, magnetofabric and paleomagnetic studies were carried out on the early Ordovician La Pedrera Formation (Santa Victoria Group) in the Mojotoro Range, Salta province. These studies aim at contributing to a better knowledge on the paleogeographic position of the Pampia block in the Early Paleozoic in relation to the Gondwana supercontinent. Oriented samples were collected from 12 sites distributed in three localities. These outcrops consist of middle to proximal shelf deposits of mainly quartzitic composition. Studies on the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) suggest a depositional fabric in one of these localities, meanwhile some tectonic influence cannot be ruled out in the magnetic fabric found in the other two. The paleomagnetic analysis permitted to determine a characteristic magnetic remanence carried by hematite at all twelve sites. From the virtual geomagnetic poles computed at each site, a paleomagnetic pole was obtained for the Santa Victoria Group at these localities which is located at 340,4°E, 38,3°N A95=8,8°. This pole position suggests that any of the three localities underwent significant tectonic rotations due to the Andean orogeny or pre-

vious tectonic events. However, it presents a somewhat lower than expected paleolatitude in comparison to coeval reference poles for Gondwana. Studies of oriented isothermal remanent magnetization suggest that this difference should not be due to inclination errors. On the other hand, the paleomagnetic pole for the Santa Victoria Group disagrees with those previously obtained for the middle to upper Cambrian Mesón Group and the lowermost Ordovician Santa Rosita Formation, to the north of our study localities but still in the same region. These discrepancies can be explained either by the presence of Andean local tectonic rotations around vertical axes in the localities to the north of our study zone or by considering that the hypothetical displacement of Pampia along the Río de la Plata craton margin was already over, or nearly so, by the Early Ordovician.

**Keywords:** *Paleomagnetism, Pampia, Gondwana, Santa Victoria Group, Mojotoro Range*

## INTRODUCCIÓN

La reconstrucción paleogeográfica de los principales bloques corticales sudamericanos durante el Paleozoico temprano ha sido sujeto de debate durante varias décadas (véase Rapalini 2005, Franceschinis *et al.* 2017). En este contexto, y aún con sus limitaciones y ambigüedades, los estudios paleomagnéticos constituyen una importante herramienta para reconstruir la evolución paleogeográfica comparada y la historia cinemática de estos bloques durante el ensamble del margen occidental del Gondwana a inicios del Paleozoico.

En el caso particular de Pampia (véase Ramos *et al.*, 2010 y referencias ahí citadas) se han planteado distintos modelos y edades para su acreción. Ramos (1988) y Escayola *et al.* (1996) propusieron una colisión frontal de Pampia con el cratón del Río de la Plata en el Neoproterozoico. Estudios más recientes (Rapela *et al.*, 2007, 2016) han sugerido un movimiento dextral de este terreno a lo largo de una falla transforme paralela al margen del Cratón del Río de la Plata desde el sur del Cratón de Kalahari (en coordenadas actuales) hasta la posición actual durante el Cámbrico tardío. Spagnuolo *et al.* (2008, 2012), a partir de un estudio en las Sierras de Santa Victoria (Jujuy), obtuvieron polos paleomagnéticos para la Formación Campanario (Cámbrico Medio a Superior), del Grupo Mesón, cuyas posiciones anómalas fueron interpretadas como representativas del desplazamiento de Pampia a lo largo del margen del cratón del Río de la Plata en el Cámbrico tardío, si bien una explicación alternativa indicando la presencia de grandes rotaciones andinas en estas rocas no pueda descartarse por completo. Spagnuolo *et al.* (2012) publicaron además un polo paleomagnético preliminar de la Formación Santa Rosita (Ordovícico In-

ferior bajo) obtenido a partir de un estudio en las localidades de Matancillas e Iruya (Jujuy). Este polo muestra una anomalía menor respecto a los polos de referencia de igual edad del Gondwana y que sugirió a estos autores el probable registro de los últimos movimientos de Pampia durante su acreción. Franceschinis *et al.* (2016), calcularon un nuevo polo paleomagnético para la Formación Campanario, en la localidad de Santa Victoria Oeste, unos 100 km al norte de las zonas de estudio previamente mencionadas. La posición de este nuevo polo resulta nuevamente anómala respecto a Gondwana, pero tampoco coincide con la de aquellos obtenidos por Spagnuolo *et al.* (2008, 2012). Los autores presentaron dos posibles interpretaciones para estos resultados. La primera propone la existencia de rotaciones tectónicas locales de distinta magnitud en las diferentes localidades de muestreo producto del levantamiento andino y asociadas al complejo patrón de rotaciones de los Andes Centrales, descrito por Somoza *et al.* (1996), Kley (1996) y Kley *et al.* (1999), entre muchos otros. La interpretación alternativa intenta explicar las diferencias en las posiciones halladas para la Formación Campanario en la localidad de Santa Victoria Oeste (Franceschinis *et al.* 2016) respecto a las de Matancillas e Iruya (Spagnuolo *et al.* 2012) como debidas a una diferencia temporal en la edad de ambos polos, representando entonces el desplazamiento de Pampia a lo largo del Cratón del Río de la Plata en el Cámbrico tardío. Dado que los datos obtenidos a partir de la Formación Santa Rosita (Spagnuolo *et al.* 2012) son escasos y de una sola localidad, un nuevo estudio paleomagnético sobre unidades del Ordovícico inferior del Noroeste Argentino puede resultar útil para arrojar información sobre la historia cinemática de Pampia en el Paleozoico

temprano y ayudar a discriminar entre ambas propuestas esbozadas más arriba. Si los polos paleomagnéticos en rocas ordovícicas en diferentes localidades muestran anomalías similares a las de los cámbricos, la hipótesis de que hay un registro paleomagnético del desplazamiento de Pampia en el Cámbrico estaría severamente comprometida, apoyando el modelo de las rotaciones andinas. Si los datos ordovícicos no muestran esa anomalía la primera hipótesis se vería reforzada.

Para alcanzar estos objetivos se llevó a cabo un estudio paleomagnético del Grupo Santa Victoria en tres localidades diferentes de la Sierra de Mojotoro (provincia de Salta). Se complementaron los resultados con estudios sedimentológicos y petrográficos y de magnetofábrica de estas unidades.

## GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se realizó un estudio geológico y paleomagnético en tres localidades de la Sierra de Mojotoro en la provincia de Salta (Fig. 1), donde se estudiaron afloramientos de la Formación La Pedrera (Moya 1998) de edad ordovícica temprana y perteneciente al Grupo Santa Victoria (Turner 1960). Estas tres localidades se denominaron informalmente "Ruta" (25° 1' 42" S, 65° 23' 20" O), "Gauchito Gil" (24° 52' 28" S, 65° 21' 30" O) y "Selva" (24° 30' 46" S, 65° 20' 37" O). La sierra de Mojotoro es un anticlinal asimétrico complejo de orientación norte-sur ubicado en la provincia geológica de Cordillera Oriental, cuya estructura se caracteriza por pliegues y sobrecorrimientos de orientación meridiana y vergencia este que afectan el basamento y la cobertura sedimentaria paleozoica (Boll y Hernández 1986, Heredia *et al.* 1997, entre

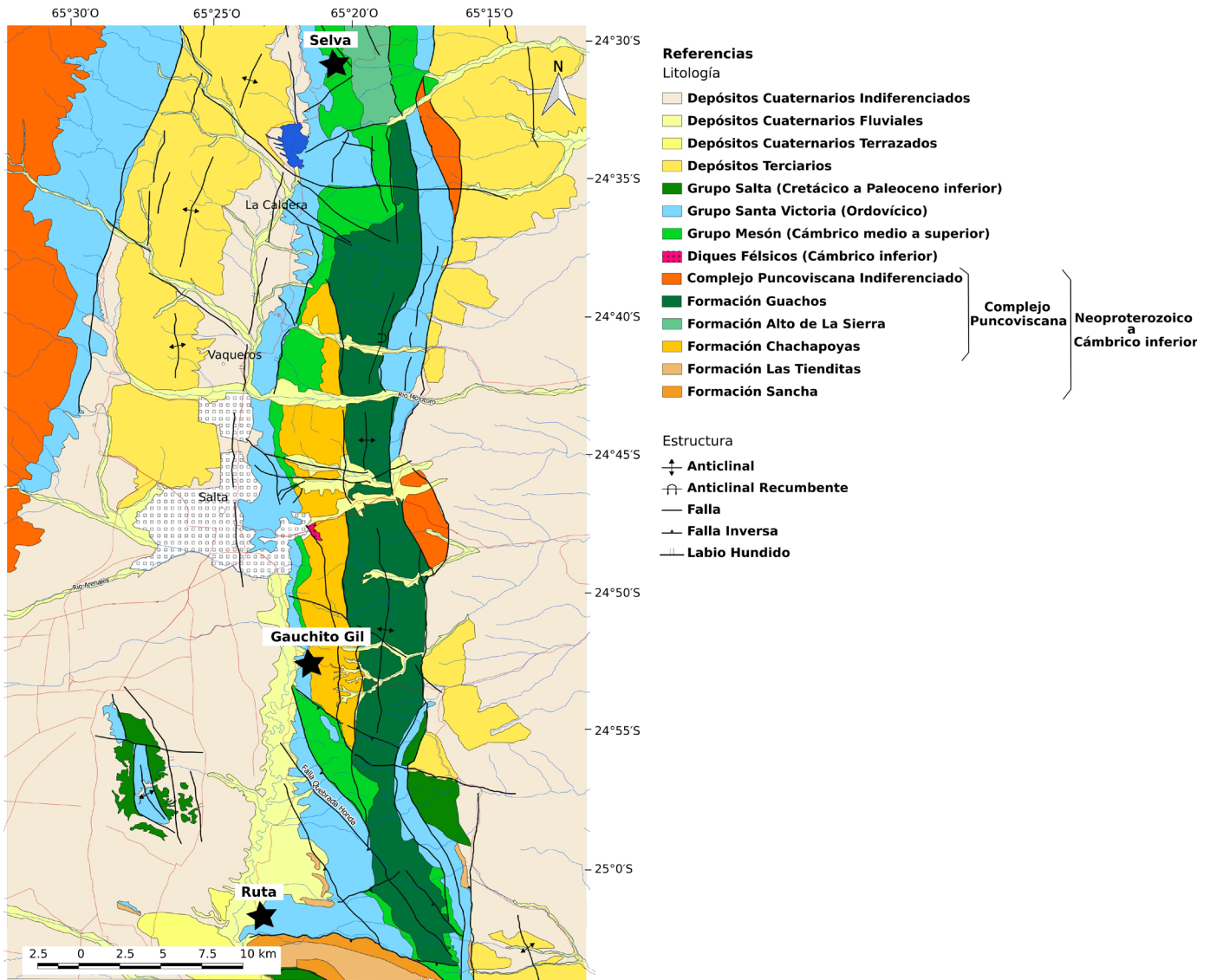


Figura 1. Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Rodríguez Picada (2017), a partir de Aparicio González *et al.* (2010) y observaciones propias.

otros). Existe también un sistema de fallas de orientación NO-SE que corta transversalmente a la sierra, interrumpiendo la continuidad lateral de las rocas paleozoicas (Moya 1998). En esta sierra, en general, los afloramientos son discontinuos y de escasas dimensiones por la abundante cobertura vegetal. Los principales asomos suelen darse sobre los cortes de caminos, en canteras, laboreos y en quebradas, lo que dificulta en muchas ocasiones la precisa asignación estratigráfica de cada uno y su correlación con otros afloramientos cercanos.

El basamento de la zona de estudio cuya edad se asigna al Neoproterozoico-Cámbrico Temprano está representado por las Formaciones Sancha, Las Tienditas (Ortiz

1962) y la Formación Puncoviscana (Turner 1960, Aceñolaza y Toselli 1976, Caminos 1979, Pankhurst y Rapela 1998). Dado que esta última unidad está conformada por un heterogéneo conjunto de rocas, se han acuñado posteriormente los términos informales de Formación Puncoviscana s.l. (Aceñolaza y Toselli 1981, Aceñolaza *et al.* 1990, Aceñolaza y Aceñolaza 2005, entre otros) y Complejo Puncoviscana (Zimmermann 2005, Aparicio González *et al.* 2014, 2017). En la zona de estudio, esta última unidad ha sido subdividida en las Formaciones Chachapoyas, Alto de la Sierra (Aparicio González *et al.* 2010) y Guachos (Moya 1998). En su conjunto, consisten en depósitos siliciclásticos, a excepción de la Formación Las

Tienditas, constituida por calizas con alto contenido de materia orgánica y bajo grado metamórfico (Do Campo y Nieto 2003, Escayola *et al.* 2011).

La cobertura sedimentaria de este basamento comienza con las cuarcitas, areniscas y pelitas del Grupo Mesón de edad cámbrica temprana a tardía que han sido interpretadas como depósitos de plataforma (Turner 1960). Le siguen en orden estratigráfico ascendente: las areniscas intercaladas con pelitas del Grupo Santa Victoria de las cuales sólo se encuentran expuestas unidades de edad ordovícica (Turner 1960); los depósitos sedimentarios y volcánicos del Grupo Salta (Cretácico-Paleoceno inferior) y los sedimentos de la cuenca de antepaís andina de edad eo-

cena-miocena tardía (Mon y Salfity 1995; Rubiolo 1997).

El Grupo Santa Victoria de edad cámbrica tardía a ordovícica tardía está conformado a escala regional por las Formaciones Santa Rosita (Harrington 1957) y Acoite (Turner 1960). En la sierra de Mojotoro, Moya (1998) subdividió al grupo en ocho formaciones, de base a techo: La Pedrera, San José, Caldera, Floresta, Áspero, San Bernardo, Mojotoro y Santa Gertrudis. La base consiste en conglomerados fluviales que gradan a depósitos marinos de plataforma (representados por areniscas cuarzosas y pelitas limosas). Estos últimos se alternan en las secciones media y superior con depósitos lutíticos y arenosos finos, correspondientes a un ambiente marino profundo.

## FORMACIÓN LA PEDRERA

### Estratigrafía

Se realizó un perfil de detalle de 13 metros de espesor sobre una de las localidades de estudio ("Ruta", 25° 1' 42" S 65° 23' 20" O) (Fig. 2), que fue asignado a la Formación La Pedrera sobre la base de bibliografía previa (Moya 1998) y las características litológicas. El depósito consiste en una sucesión de bancos tabulares y, en menor medida, lentiformes, de areniscas, limolitas y pelitas de color castaño y castaño rosado, donde no aparecen representados los niveles conglomerádicos basales (Moya 1998). Las areniscas son de grano medio a fino con algunos niveles gruesos. Los bancos son de espesor centimétrico, aumentando éste hacia el tope de la sucesión aflorante, donde alcanzan potencias decimétricas. No se observaron, en este perfil, los contactos superior e inferior con otras formaciones, ni tampoco la presencia de restos fósiles.

En base al análisis del perfil, se identificaron tres facies: F1, F2 y F3 (Fig. 3). F1 está conformada por areniscas masivas, con laminación horizontal o estratificación entrecruzada *hummocky* y pelitas masivas o laminadas. Se interpretan como depósitos de transición al *offshore*, donde los bancos de arena se habrían depositado en condiciones de tormenta, mientras que la pelita, en períodos de buen tiempo. La presencia de estratificación entrecruzada *hummocky*

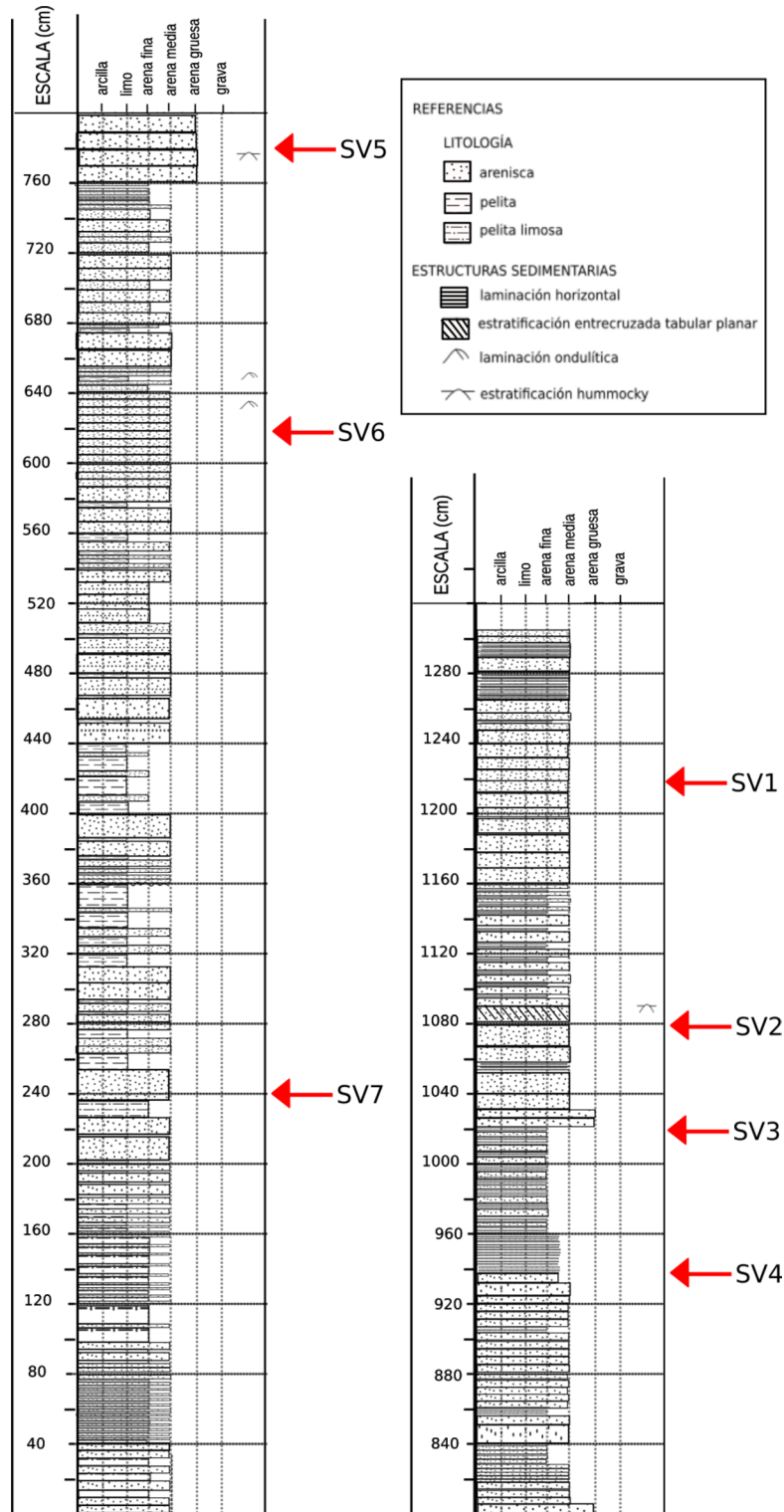
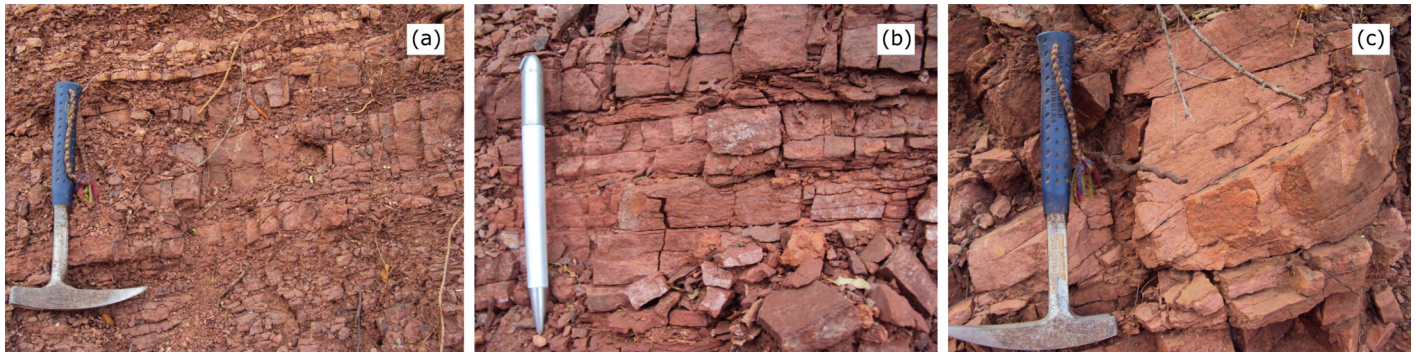


Figura 2. Perfil estratigráfico de la Formación La Pedrera en la localidad Ruta. Se indica también la ubicación de los sitios paleomagnéticos (SV).

es también un indicador de eventos de tormenta. La ausencia de laminación ondulítica, junto con la granulometría fina de los bancos indica una posición más profunda y por debajo del nivel de olas de buen tiempo. F2 presenta las mismas litofacies que F1,

pero incluye a su vez una granulometría un poco más gruesa y bancos con laminación ondulítica, lo cual indica una posición por encima del nivel de olas de buen tiempo, característica del *shoreface*. Los depósitos de tormenta son, en algunos casos, lenti-



**Figura 3.** Facies determinadas en el perfil estratigráfico de la localidad "Ruta": a) Facies F1, mostrando la presencia de bancos de granulometría fina; b) Facies F2, con laminación ondulítica; c) Facies F3, con un característico espesor decimétrico de los bancos y estratificación entrecruzada.

formes, los cuales representarían canales de retorno. La presencia de pelitas por decantación y depósitos de tormenta señalan una posición inferior del *shoreface*. Por último, F3 está conformada por depósitos de granulometría más gruesa que las anteriores (arena media a gruesa) de tipo masivos o con estratificación entrecruzada tabular planar o laminación horizontal. Estos depósitos corresponderían a barras de *longshore*. En su conjunto, las facies F1, F2 y F3, representan una sección de un ambiente de plataforma silicoclástica.

El afloramiento expuesto en la localidad "Gauchito Gil" (24° 52' 28" S 65° 21' 30" O) tiene una altura aproximada de 20 metros. La sucesión consiste en paquetes arenosos de color castaño, castaño morado y pardo amarillento. El tamaño de grano varía desde medio a fino. Por sectores, se intercalan con niveles centimétricos de pelitas rojizas laminadas. La potencia de los bancos arenosos varía desde los 5 hasta los 20 centímetros en la parte media del perfil. Los estratos son masivos, con laminación horizontal u ondulítica y en ciertos casos, con base erosiva.

Por último, en la localidad "Selva" (24° 30' 46" S 65° 20' 37" O) los afloramientos son más reducidos que las zonas de trabajo expuestas anteriormente, sin llegar a superar los 3 metros de espesor estratigráfico expuesto. Son areniscas de grano medio y, en menor medida fino, de color castaño y castaño morado. Los bancos son tabulares y, en algunos casos, lenticulares de tipo masivos, con laminación horizontal, ondulítica o estratificación entrecruzada en el caso de los bancos más potentes. También se observan otras estructuras, como calcos de carga. El espesor de los bancos varía desde 5 a 20 centímetros. Aparecen

por sectores intercalados con pelitas color castaño con laminación horizontal. La proporción arenisca-pelita es mayor que en los casos de las localidades anteriores.

### Petrografía

Según la clasificación de Folk (1974), son cuarzoarenitas y sublitoarenitas (Fig. 4) de grano fino a medio, con buena selección y una baja proporción de matriz (Fig.5). Además de cuarzo, se observan, en ciertos casos, feldespatos, micas, circones y fragmentos líticos pelíticos. El cemento es de tipo hematítico y cuarzoso (Fig.5 b, d y f). Otro rasgo distintivo en varios sitios es la orientación que presentan los granos en dirección NO-SE, la cual, al no evidenciarse otras texturas deformacionales, estaría asociada a un fenómeno depositacional y no tectónico (Fig. 5 b). Por otro lado, no se observan evidencias significativas de deformación, salvo en la localidad "Selva", donde algunos clastos de cuarzo presentan contactos triples y un empaquetamiento más compacto en comparación con los otros sitios (Fig.5 f).

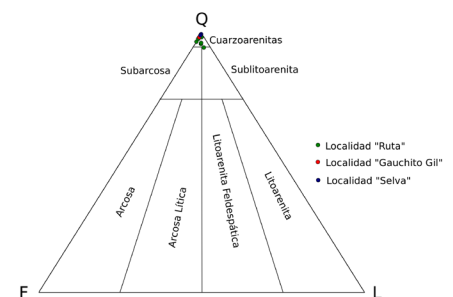
En relación a los minerales opacos, se observó que las rocas presentan magnetita primaria detritica, en general alterada a hematita (Fig. 5 e). La presencia de hematita se extiende a los contactos entre los clastos cuarzosos, formando parte de la matriz y el cemento (Fig.5 d). Esta textura junto con la presencia de cemento cuarzoso, sugieren un origen diagenético temprano (<200 °C) (Scasso y Limarino 1997).

## MUESTREO Y ESTUDIO PALEOMAGNÉTICO

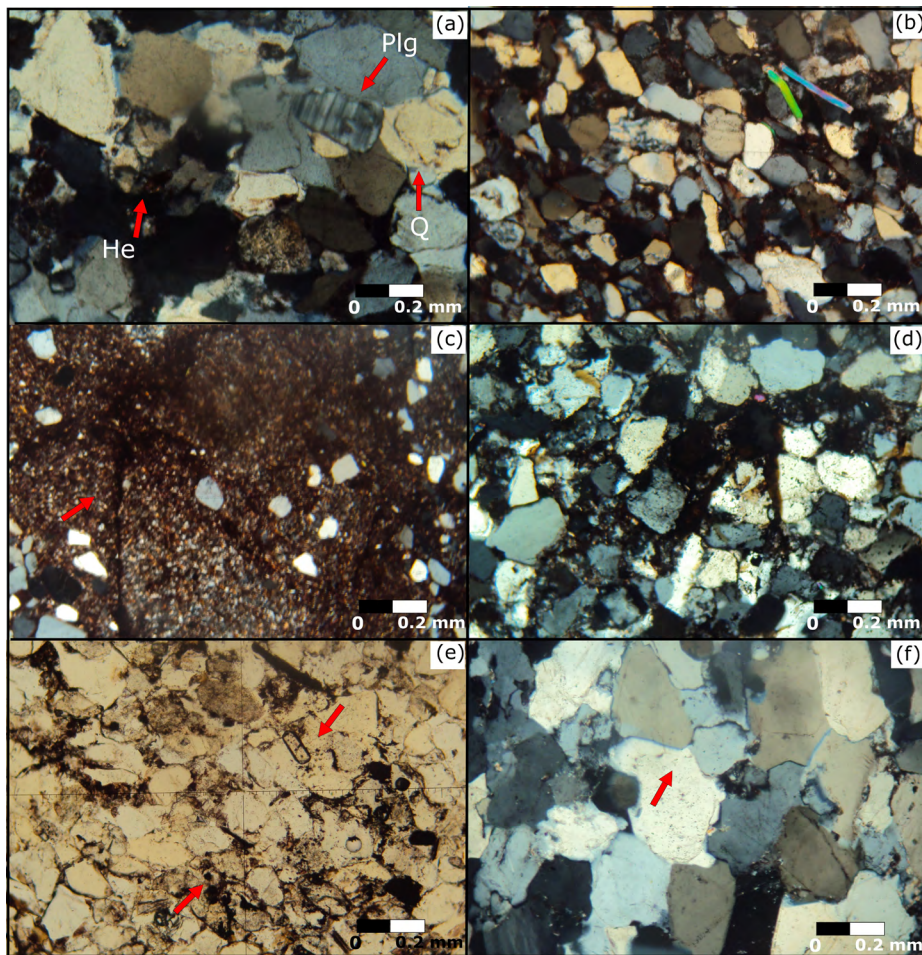
Se realizó un muestreo paleomagnéti-

co en las tres localidades denominadas "Ruta", "Gauchito Gil" y "Selva" (Fig. 1), donde se recolectaron muestras en 7, 3 y 2 sitios paleomagnéticos, respectivamente. El muestreo se realizó mediante una perforadora portátil, brújulas magnética y solar e inclinómetro, obteniéndose un total de 92 muestras orientadas independientemente. En el laboratorio se rebanaron los testigos según el tamaño estándar requerido por los equipos de medición (2,2 centímetros de alto y 2,54 centímetros de diámetro), alcanzando una colección de 106 especímenes.

En primera instancia se midió la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) en los especímenes de 11 sitios con un suceptibilímetro MFK1-FA Kappabridge de forma tal de poder determinar el elipsoide de ASM. El análisis no pudo realizarse para el caso del sitio SV 10 ("Gauchito Gil") debido a que el número de especímenes de forma y tamaño regular fue insuficiente. Posteriormente, se realizó un estudio paleomagnético piloto a razón de 2 o 4 es-



**Figura 4.** Clasificación petrográfica de las areniscas según Folk (1974). Q: cuarzo mono y policristalino (excluyendo chert); F: feldespatos; L: fragmentos líticos (ígneos, metamórficos y sedimentarios, incluyendo chert)



**Figura 5.** Fotomicrografías de muestras del Grupo Santa Victoria tomadas con microscopio petrográfico con nicoles cruzados salvo la imagen (e), que fue tomada con nicoles paralelos: a) SV1-5C grano medio con buena selección: cuarzo con crecimiento secundario, plagioclasa y hematita entre los contactos; b) SV 6-7C clastos orientados, hematita entre los contactos; c) SV 7-4B fragmento lítico de grano fino muy alterado. Sublitoarenita con moderada a baja selección; d) SV 9-6B hematita entre los contactos; e) SV 9-6B magnetita alterada a hematita, hematita entre los contactos y circón euhedral; f) SV11-1B textura compacta. Notar el empaquetamiento, el crecimiento secundario del cuarzo, los contactos triples y suturados entre clastos y la escasez de matriz fina (a), (b) y (c) pertenecen a la localidad "Ruta"; d-e) a la localidad "Gauchito Gil"; (f) a la localidad "Selva"

pecímenes por sitio. Con el objetivo de determinar cuál era el mejor método de desmagnetización, se aplicó a uno o dos especímenes por sitio una desmagnetización progresiva por campos magnéticos alternos linealmente decrecientes (AF) y a los restantes, una por altas temperaturas (Butler 1992). Finalmente, se concluyó que la desmagnetización por altas temperaturas era el método más efectivo en todos los sitios, por lo cual este método fue aplicado al total de los 106 especímenes. La desmagnetización por AF y medición de la magnetización remanente se realizó empleando un magnetómetro criogénico con desmagnetizador (Degausser) asociado (2G Enterprises) Modelo 755R (DC squids), en pasos de 3, 6, 9, 12, 15, 20, 25,

30, 40, 50 y 70 mT. La desmagnetización por altas temperaturas se llevó a cabo en un desmagnetizador térmico ASC Scientific, Model TD 48SC en pasos de 100, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 530, 560, 590, 620, 650 y 670 °C. En cada paso, se dejó enfriar en ausencia de campo magnético exterior y se midió la magnetización remanente con el magnetómetro criogénico. Una vez desmagnetizados todos los especímenes, se realizó el análisis de componentes principales o PCA para determinar la dirección y precisión de las componentes de la remanencia magnética natural de estas rocas. (Kirschvink 1980) Todos los estudios fueron realizados en el Laboratorio de Paleomagnetismo Daniel A. Valencio del Instituto de Geociencias

Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires y CONICET.

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

### Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM)

El estudio de ASM muestra resultados distintos para las tres localidades (Cuadro 1). Por un lado, en la localidad "Ruta", se observa una fábrica prolada (sitios SV1 a SV5) y oblada (sitios SV6 y SV7), susceptibilidad volumétrica del orden de  $10^{-5}$  SI y anisotropías bajas ( $\sim 4\%$ ). Después de realizada la corrección a la paleohorizontal, K3 migra a una posición subvertical, mientras que K1 y K2 están contenidos en el plano de estratificación (Fig.6 a). Estos resultados sugieren una fábrica de origen depositacional o por compactación. Sin embargo, se observa que las direcciones del eje K3 tienden a estar contenidas en un plano NE-SO y que los ejes K1 presentan un muy buen agrupamiento en una dirección NO. Esto sugiere una impronta tectónica leve en la fábrica de estas sedimentitas, consistente con la no observación de deformación en los cortes microscópicos. Para el caso de la localidad "Gauchito Gil", los resultados muestran elipsoides oblados, valores de susceptibilidad del orden de  $10^{-4}$  SI y anisotropías bajas ( $\sim 4\%$ ) (Fig.6 b). Al migrar las direcciones a la paleohorizontal, éstas resultan marcadamente diferentes a la localidad anterior. Los ejes K3 se vuelven subhorizontales y de rumbo E-O, mientras que los ejes K1 y K2 describen una "guirnalda" subvertical N-S. Estas características son típicas de una fábrica con impronta tectónica significativa (ej., Tarling y Hrouda 1993, Borradaile y Henry 1997, Tomezzoli *et al.* 2017). En este caso, la carencia de evidencia microscópica de deformación sugiere que la fábrica ha sido obtenida durante las etapas de depositación y consolidación de los sedimentos, es decir antes de la litificación de los mismos, fenómeno conocido como "criptofábrica" (Parés 2004, 2015 y referencias ahí citadas). En el caso de la localidad "Selva", se analizaron los resultados de los dos si-

tios (SV11 y SV12) por separado. Para el sitio SV11, el elipsoide medio es prolado, si bien el parámetro de forma individual de cada espécimen cae en ambos campos. El grado de anisotropía es bajo (~5%) y la susceptibilidad es del orden de 10<sup>-5</sup> SI (Fig.6 c). Los ejes K3 no tienen una orientación definida, encontrándose sobre un plano de orientación NE-SO, al igual que algunas direcciones definidas en la localidad "Ruta". Para el sitio SV12, la susceptibilidad es del orden de 10<sup>-4</sup> SI, el grado de anisotropía es bajo (<5%) y el elipsoide del sitio tiene una configuración prolada con un eje K1 apuntando con buzamiento moderado hacia el S (Fig.6 d). Los ejes K3 presentan una dirección NO, la cual no se ve modificada sustancialmente cuando se hace la corrección estructural para llevar los bancos a la paleohorizontal. La fábrica de esta localidad es anómala e inconsistente con una fábrica depositacional, infiriéndose un probable origen tectónico complejo para la misma. Recuérdese que sólo en esta localidad se observaron leves evidencias microscópicas de deformación. Las bajas susceptibilidades observadas son consistentes con las esperadas para rocas clásticas con hematita. Los valores finales de susceptibilidad son determinados posiblemente por la mayor o menor presencia de magnetita no alterada en cada sitio.

### Estudio Paleomagnético

En la mayoría de los sitios, la desmagnetización total ocurre a altas temperaturas (>650°C), lo cual indica que el principal mineral portador de la remanencia es la hematita (Butler 1992). Mayoritariamente se observa un desbloqueo abrupto de la remanencia a partir de temperaturas superiores a los 600°C (Fig.7 a-c y f). Sin embargo, en los sitios SV2 y SV3, se observan curvas de desmagnetización que también presentan temperaturas de desmagnetización correspondientes a hematita pero con un espectro mucho más distribuido de temperaturas de desbloqueo, posiblemente debido a una mayor variación en el tamaño de grano del mineral portador (Fig.7 d). En el caso del sitio SV5, se aplicó el análisis de círculos máximos o de "remagnetización" (McFadden y McElhinny 1988) ya que en algunos especímenes no pudieron aislarse componentes por PCA (Fig.7 e). En todos los sitios, a excepción de SV8, la componente característica hallada presentó inclinación positiva baja a moderada y declinación NE. El sitio SV8 se caracterizó por una dirección aproximadamente antípoda (Fig.7 f). La componente característica de alta temperatura (500°C-620°C) pudo ser aislada en todos los sitios, y fue denominada Componente B (Cuadro2). En el caso de los sitios SV3, SV4, SV6, SV7, SV10, SV11 y SV12, la componente presenta

una buena consistencia direccional indicada por una dirección media definida con un  $\alpha_{95} < 10^\circ$ , mientras que los sitios SV1, SV5, SV8 y SV9 tienen un agrupamiento moderado ( $10^\circ < \alpha_{95} < 16,2^\circ$ ). Para el cálculo de la media fisheriana de las direcciones por sitio de la componente B, aquella correspondiente al sitio SV8 fue invertida a su antípoda para que correspondiera a la misma polaridad magnética que el resto de la población. La dirección media *in-situ* es: N (sitios):12 Dec:43,6° Inc:29,7° R:11,2 k:13,3  $\alpha_{95}$ : 12,3°, mientras que la dirección media corregida a la paleohorizontal es: N(sitios):12 Dec:35,0° Inc:25,7° R:11,5 k:24,6  $\alpha_{95}$ :8,9°. El agrupamiento mejora visiblemente (el k casi se duplica) cuando se realiza la corrección por actitud estructural (Fig.8), lo cual indica que la remanencia característica del Grupo Santa Victoria es pre-tectónica.

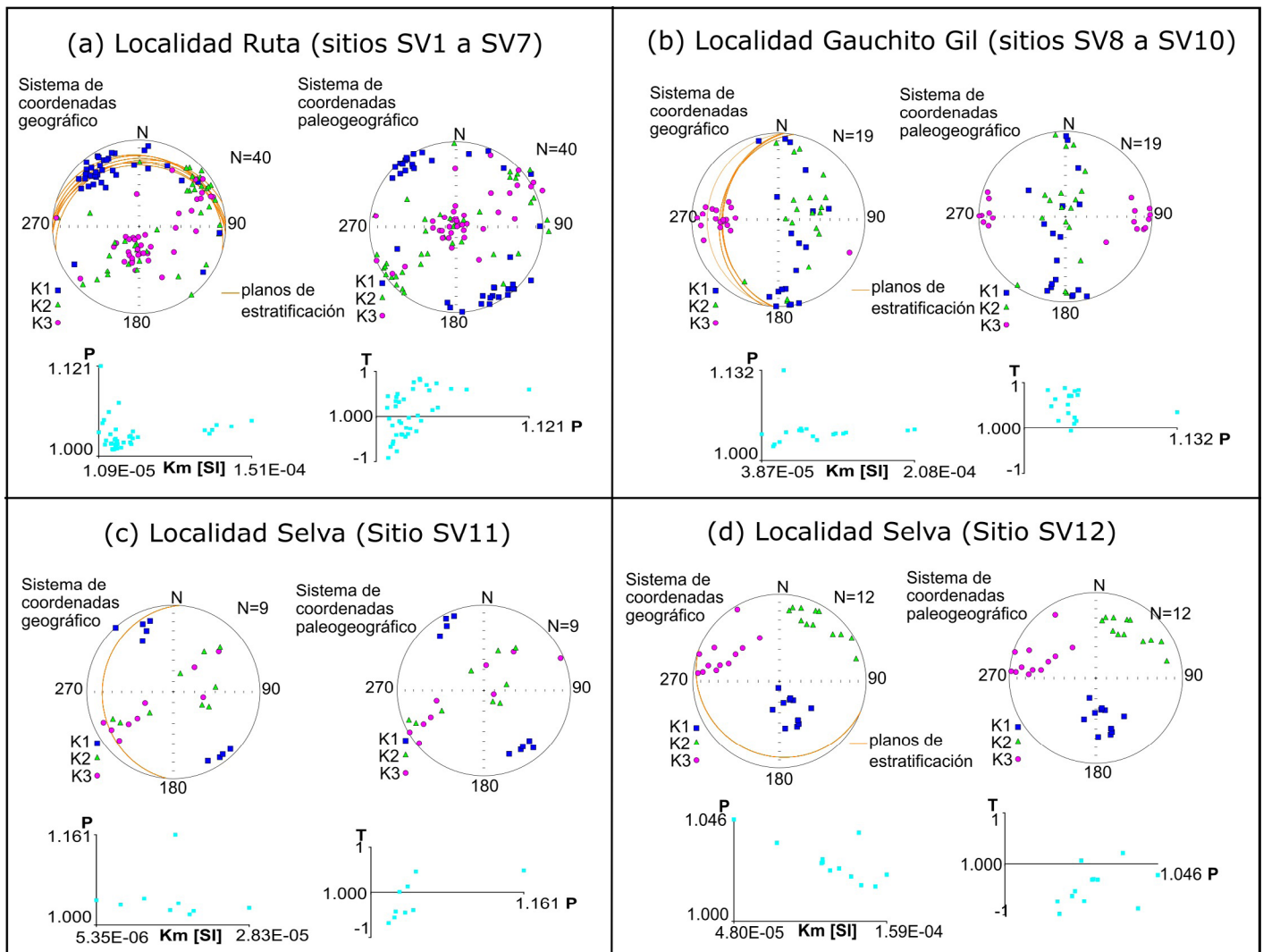
Se realizó un test de la reversión (McFadden y Lowes 1981, McFadden y McElhinny 1990), entre la dirección media del sitio SV8 y las del resto de los sitios, con resultado indeterminado.

Por otro lado, se aplicó un test de basculamiento progresivo (Enkin 2003) para determinar si la mejora en el agrupamiento de las direcciones al aplicar la corrección estructural es significativa estadísticamente o puede ser producto del azar. Además, este test permite definir cuál sería la corrección estructural necesaria para un

**CUADRO 1.** Parámetros de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) por sitio. K1, K2, K3

Localidad	Sitio	K1				K2				K3				L	F	P	T	K
		D(°)	I(°)	D'(°)	I'(°)	D(°)	I(°)	D'(°)	I'(°)	D(°)	I(°)	D'(°)	I'(°)					
Ruta	SV1	347,9	4,0	346,6	22,1	256,8	15,6	252,9	9	91,8	73,8	142	66	1,009	1,003	1,013	-0,478	2,31*10 <sup>-5</sup>
	SV2	170,4	3,2	349,6	13,9	260,4	0,5	52,7	16,2	358,5	86,8	176	62,2	1,017	1,016	1,034	-0,046	1,86*10 <sup>-5</sup>
	SV3	319,5	5,1	316	22	49,7	2,9	52	17	168,9	84,1	178,3	62,7	1,007	1,007	1,014	-0,012	2,82*10 <sup>-5</sup>
	SV4	149,1	4,6	327,6	18,6	258,7	76,7	202,8	59,5	58,1	12,5	65,9	23,3	1,015	1,011	1,026	-0,153	4,2*10 <sup>-5</sup>
	SV5	130,4	5,8	309,3	15	38,9	14,8	47,4	27,8	241,2	741,1	194,1	57,7	1,007	1,012	1,019	0,275	2,67*10 <sup>-5</sup>
	SV7	121,7	3,5	300,6	9	212,3	9,4	32,9	14,5	11,2	80,0	179,8	72,9	1,004	1,028	1,032	0,753	1,23*10 <sup>-4</sup>
	SV8	187,3	27,6	172,1	21,5	358,2	62,1	51,2	52,5	95,4	3,8	274,7	29,1	1,007	1,026	1,033	0,595	1,09*10 <sup>-4</sup>
Gauchito Gil	SV9	1,2	10,1	5,4	6,6	201,1	79,3	106,4	58,7	91,8	3,6	271,5	30,4	1,008	1,029	1,037	0,576	1,2*10 <sup>-4</sup>
Selva	SV11	149,3	0,2	330,7	10,5	239,3	6,8	236,4	22,2	57,8	83,2	84,4	65,2	1,028	1,004	1,032	-0,721	1,62*10 <sup>-5</sup>
	SV12	173,5	50,3	162	62,1	25,8	35,0	25,2	21,1	284,0	16,2	288,3	17,4	1,017	1,006	1,023	-0,489	1,19*10 <sup>-4</sup>

Ejes mayor, intermedio y menor del elipsoide de anisotropía, respectivamente. D: declinación; I: inclinación; D' e I': valores corregidos por estructura; L: Lineación; F: Foliación; P: grado de anisotropía; T: Parámetro de forma (Jelinek, 1980); K: susceptibilidad magnética media.



**Figura 6.** Representación esteogeográfica de los ejes principales de anisotropía de susceptibilidad magnética para los sitios estudiados del Grupo Santa Victoria, con orientación *in-situ* y corregido a la paleohorizontal, junto con los Gráficos de P (grado de anisotropía) vs. Km (susceptibilidad magnética media) y del parámetro de forma (T, Jelinek, 1980) vs. P. a) Sitios de la localidad "Ruta" (SV1 a SV7); b) Sitios de la localidad "Gauchito Gil" (SV8 a SV10); c) Sitio SV11; d) Sitio SV12, ambos de la localidad "Selva".

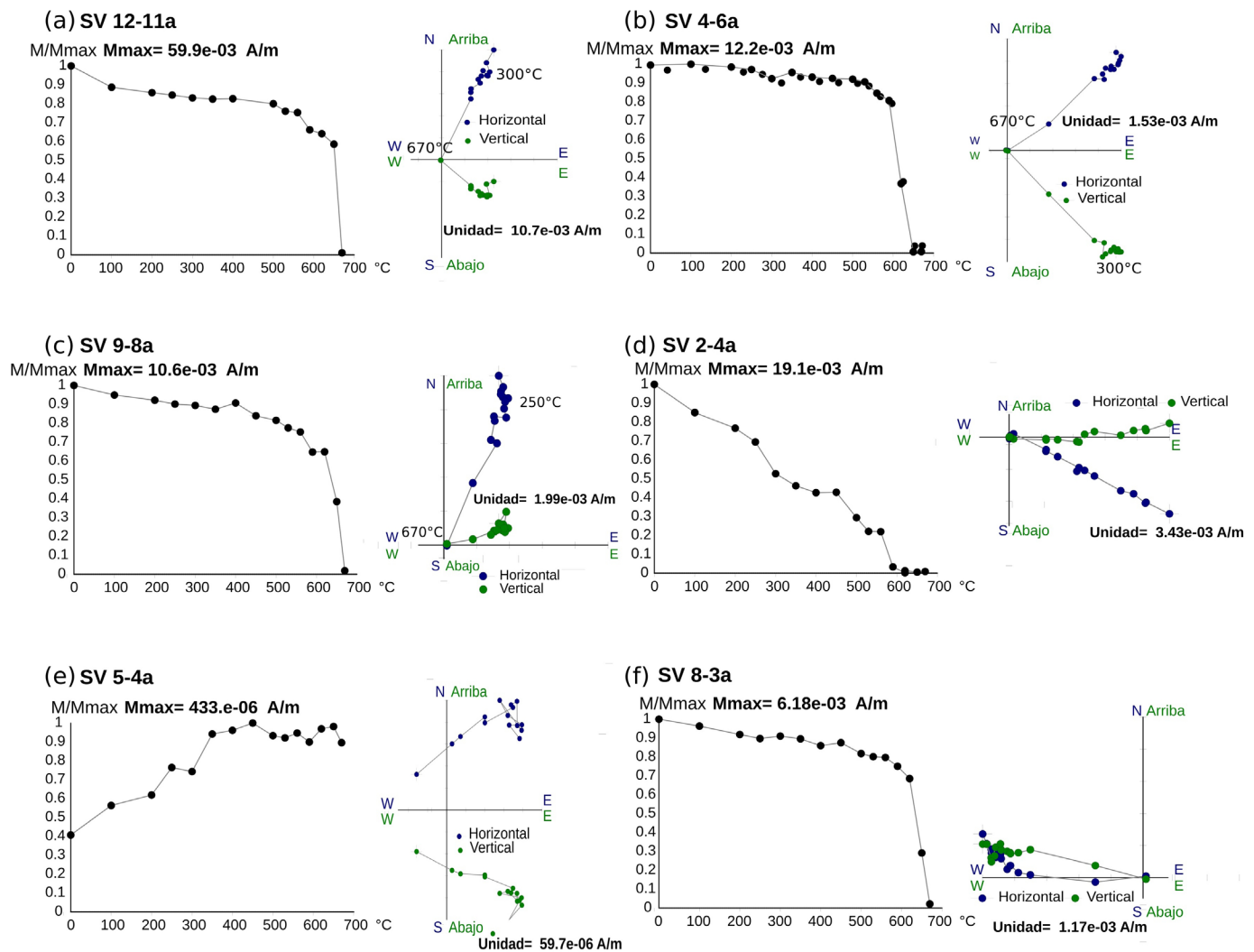
agrupamiento óptimo de las direcciones de remanencia. El resultado fue positivo con una corrección estructural cercana a la total (95%), lo cual confirma el carácter pre-tectónico de la magnetización. Considerando que las diferencias entre una corrección estructural al 95% y otra al 100% no son significativas estadísticamente, se utilizaron las direcciones corregidas al 100%, según se detalla en la Cuadro 2. El carácter pre-tectónico de la remanencia, la determinación de hematita como mineral portador de la misma y el origen diagenético temprano observado para la misma en los análisis microscópicos permite inferir que la componente magnética puede considerarse como primaria y por ende su edad cercana a la depositación del Grupo Santa

Victoria (Ordovícico Inferior). La presencia dominante de polaridades reversas en los sitios estudiados del Grupo Santa Victoria (11 sobre 12) es consistente con una edad ordovícica temprana y su correspondencia con el supercron Moyero (Pavlov y Gallet 2005) determinado entre el Tremadociano medio a tardío y el fin del Ordovícico Medio. La presencia de una polaridad opuesta en el sitio inferior de la localidad Gauchito Gil sugiere que en la misma podría estar representado el inicio de dicho supercron en el Tremadociano medio.

Obtenidas las direcciones por sitio, se procedió al cálculo de los polos geomagnéticos virtuales (PGVs, véase Butler 1992) correspondientes (Cuadro 3). De los promedios de los 12 PGVs se

obtuvo un polo paleomagnético para el Grupo Santa Victoria en la Sierra de Mojotoro que se ubica en  $340,4^{\circ}\text{E}$ ,  $38,3^{\circ}\text{N}$  (sitios)=12  $k=25,1$   $A95=8,8^{\circ}$ . El muestreo en tres localidades suficientemente distantes, la cobertura de al menos 10 metros de espesor estratigráfico en una de ellas y la presencia de un sitio con polaridad opuesta, sugiere fuertemente que las direcciones obtenidas han promediado significativamente la variación paleosecular y el polo paleomagnético calculado corresponde, dentro del intervalo de incerteza, con el polo de rotación terrestre en el Ordovícico Temprano. La posición del polo paleomagnético indica una paleolatitud media para las tres localidades de  $14,7^{\circ}$  para la depositación de los sedimentos del Grupo Santa Victoria.





**Figura 7.** Diagramas de Zijderveld junto con su correspondiente curva de desmagnetización para los especímenes: a) SV 12-11a; b) SV 4-6a; c) SV 9-8a; d) SV2-4a; e) SV5-4a y f) Sv8-3a. Observar que la desmagnetización ocurre entre los 650 y los 670°C. Notar en: (c) la presencia de dos componentes, una hasta 250°C y otra, hasta 670°C; (d) el decaimiento más progresivo de la curva de desmagnetización en comparación los casos anteriores, lo que marca la existencia de un patrón distribuido de temperatura de bloqueo; (e) no se terminan de aislar las componentes, por lo cual se aplica posteriormente el método de círculos máximos; (f) espécimen de un sitio cuya componente característica tiene una polaridad opuesta.

### ¿Error de Inclinación? Un estudio de magnetización remanente isotérmica

Las direcciones de magnetización pueden verse afectadas por efecto de la compactación de las rocas, lo cual se traduce en una deflexión de la inclinación hacia el plano de estratificación (véase Tauxe *et al.* 2008). Este efecto se verifica particularmente en rocas sedimentarias clásticas. En este sentido, la baja paleolatitud encontrada para el polo del Grupo Santa Victoria, teniendo en cuenta las litologías estudiadas, puede sugerir la presencia de estos efectos. En relación a este fenómeno, los estudios de ASM sugieren una fá-

brica depositacional pero incipientemente tectónica para la localidad “Ruta”, mientras que para las otras dos localidades, la fábrica tectónica (¿criptofábrica?) es predominante. Si bien la correlación entre la anisotropía de susceptibilidad magnética y las direcciones de remanencia es muy variable, la inexistencia de fábricas fuertemente compactacionales, pone en duda la existencia de un importante “aplastamiento” en las direcciones de remanencia. Para determinar experimentalmente la existencia de errores de inclinación debido a los efectos de compactación, se llevó a cabo un estudio de magnetización remanente isotérmica (IRM) direccional, que consiste

en magnetizar artificialmente los especímenes mediante un pulso de campo magnético intenso, siguiendo una dirección conocida respecto del plano de estratificación (preferiblemente cerca de los 45°). Si se observa una reducción sistemática en los valores de inclinación de la remanencia isotérmica adquirida artificialmente en relación al campo aplicado, entonces existe un efecto de compactación y/o deformación que puede ser corregido en la remanencia natural (Hodych y Buchan 1994). En caso de observarse una deflexión sistemática de la remanencia artificial hacia el plano de estratificación, se calcula un factor de corrección o factor  $F = \tan I_m / \tan$

**CUADRO 2.** Direcciones medias por sitio de la componente B *in-situ* y con corrección estructural y ubicación de los polos geomagnéticos virtuales (PGVs).

Sitio	N	In Situ					Con Corrección Estructural					Pgv			
		D (°)	I (°)	R	K	A95	D (°)	I (°)	R	K	A95	Actitud			
												Ru (°)	I (°)	Lat(°)	Long(°)
SV1	6	38,4	42,4	5,86	35,61	11,4	31,8	25,9	5,86	35,64	11,45	275	19,3	40,7	337,1
SV2	6	51,3	53,5	5,73	18,37	16,1	41,5	37	5,73	18,33	16,1	285,6	18,5	29,3	340
SV3	8	60,9	41,2	7,85	48,05	8,1	47,8	28,8	7,85	48,08	8,1	267,8	22,3	28,5	349,5
SV4	6	51,1	37,5	5,99	368,04	3,5	39,6	21,1	5,98	264,15	4,1	265,8	26	37,5	346,7
SV5	5(2)	40,9	39,8	4,91	33,36	14,4	28,8	24	2,94	30,96	14,4	254	24,7	43,4	334,9
SV6	8	52,3	36,2	7,97	230,4	3,7	41,5	15,3	7,97	231,84	3,6	269,8	29,5	38,1	351,2
SV7	4	56,4	35,7	3,97	90,65	9,7	46,4	17,2	3,97	90,19	9,7	273,82	27,3	33,7	354
SV8	7	255,8	-12,8	6,75	24,01	12,6	247,4	-42,1	6,75	23,99	12,6	189,9	33,2	-	-
SV8(t)	7	75,8	12,8	6,75	24,01	12,6	67,4	42,1	6,75	23,99	12,6	189,9	33,2	8,3	352,9
SV9	11	19,6	18,7	9,95	9,48	15,6	5,1	24,1	9,94	9,47	15,7	184,4	36,2	52,2	302,8
SV10	7	40	4,9	6,93	82,08	6,7	32,1	24,5	6,93	82,16	6,7	182,7	35	41	338
SV11	11	17,4	7,6	10,65	28,33	8,7	14,4	12,8	10,65	28,6	8,7	184	19,1	55,5	320,5
SV12	12	29,7	12,5	11,94	183,09	3,2	30,5	26,2	11,94	177,07	3,3	111,4	13,8	41,1	335,4

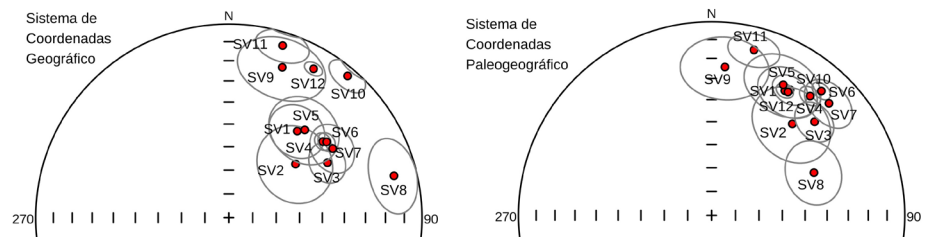
D: declinación; I: inclinación; R y K: parámetros de precisión de Fisher; Ru: Rumbo; Lat: Latitud; Long: Longitud; (t) indica la componente inversa a la calculada. En SV5, (2) indica el número de especímenes cuya componente C fue calculada con el método de círculos máximos (McFadden y McElhinny 1988).

$I_e$  (donde  $I_m$  es la inclinación medida en el experimento e  $I_e$  es la inclinación del campo magnetizante aplicado), que se aplica a la inclinación magnética calculada. Para más información acerca de este método se sugiere consultar Rapalini (2006).

Se realizó el estudio de IRM sobre un total de 13 especímenes, a partir de los cuales se calcularon los factores de corrección para las localidades "Ruta" y "Selva", pero no para la localidad "Gauchito Gil" debido a la ausencia de especímenes aptos para realizar este procedimiento (Cuadros 3 y 4).

Se magnetizó artificialmente empleando un magnetizador de pulso ASC Scientific IM-10-30 en pasos de 600, 760, 900 y 1000 mT. En cada paso se midió la magnetización remanente con un magnetómetro JR6A Dual SpeedSpinner (AGICO).

En ambas localidades el potencial error de inclinación es muy pequeño (Cuadro 3) y muestra una dispersión relativamente elevada. En el caso de la localidad Ruta la primera desviación estándar incluye a F=1, lo que implica ausencia de dicho error. A fin de evaluar, de todos modos, si los valores obtenidos podrían influir considerablemente las determinaciones de paleolatitud, se



**Figura 8.** Proyección en red estereográfica de la componente B para todos los sitios, *in-situ* (izquierda) y corregidas a la paleohorizontal (derecha). Los círculos representan el  $\alpha_{95}$  de cada sitio. Proyección en el hemisferio inferior (inclinaciones positivas). La dirección del sitio SV8 ha sido invertida. Obsérvese el mejor agrupamiento direccional cuando se aplica la corrección estructural.

aplicó la corrección de inclinación a cada sitio de estas dos localidades en base al valor promedio calculado para cada una de ellas y se recalcularon los polos geomagnéticos virtuales correspondientes. El polo paleomagnético para el Grupo Santa Victoria tras esta corrección se ubica en 339,4°E, 37,4°N,  $k=24,5$   $A95=8,9^\circ$  lo cual indica una paleolatitud media para las tres localidades de 15,9°, no diferente significativamente de la calculada sin tener en cuenta un potencial error de inclinación. La insignificancia de un eventual error de inclinación determinado mediante el estudio de la remanencia isotérmica direccional,

más allá de la imposibilidad de realizarlo en una de las localidades y el bajo número de muestras analizadas en otra, es considerada una razón suficiente para no introducir ninguna corrección en el valor final del polo paleomagnético del Grupo Santa Victoria en la Sierra de Mojotoro.

## INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

El polo paleomagnético calculado para el Grupo Santa Victoria cumple con seis de los siete criterios de confiabilidad según

Van der Voo (1990): i) la edad de la roca está bien determinada y hay diferentes tests que sugieren una magnetización primaria; ii) el resultado fue obtenido a partir de un número suficiente de muestras; iii) la desmagnetización fue adecuada e incluye tratamiento por resta vectorial (Kirschvink 1980); iv) el test de basculamiento dio positivo; v) se halló la presencia de reversiones de polaridad y vi) la posición polar no coincide con la de polos paleomagnéticos más jóvenes para América del Sur. A partir de estos criterios, puede considerarse al polo paleomagnético obtenido como un registro confiable del campo magnético promedio en el Ordovícico Inferior de la Cordillera Oriental.

Si se compara la posición polar del Grupo Santa Victoria obtenida en este trabajo con las de los polos del Cámbrico Medio a Ordovícico Temprano obtenidos por Spagnuolo *et al.* (2008, 2012) y Franceschinis *et al.* (2016), se observa una marcada diferencia (Fig. 9). Sin embargo la paleolatitud calculada para el Grupo Santa Victoria en la Sierra de Mojotoro ( $14,7^\circ \pm 8,8^\circ$ ) es casi idéntica a la que correspondería para el Cámbrico Medio a Tardío a partir del polo paleomagnético obtenido para la Formación Campanario por Franceschinis *et al.* (2016) en la localidad Santa Victoria Oeste ( $15,7^\circ \pm 3,9^\circ$ ) y difiere en  $7^\circ$  y  $9^\circ$  con aquellas correspondientes a los polos obtenidos por Spagnuolo *et al.* (2012), tanto para el Cámbrico medio a tardío de la Formación Campanario ( $21,7^\circ \pm 9,2^\circ$ ), como el Ordovícico Temprano de la Formación Santa Rosita ( $23,8^\circ \pm 10,1^\circ$ ). En todos los casos, los márgenes de incerteza en el cálculo de la paleolatitud se superponen, sugiriendo que las diferencias paleolatitudinales menores observadas podrían no ser significativas. Por otro lado, se observa, a partir de los polos paleomagnéticos de referencia para el Gondwana (Fig. 9), más allá de las discrepancias entre autores ilustradas en la figura, que este supercontinente habría sufrido un desplazamiento paulatino hacia paleolatitudes más bajas entre el Cámbrico Medio y el Ordovícico Temprano. La aparente disminución en paleolatitud observada en el Grupo Santa Victoria sería consistente con esta observación.

Si bien no existe consenso sobre la exacta traza de la curva de deriva polar aparente

**CUADRO 3.** Resultados obtenidos a partir del estudio de magnetización remanente isotérmica (IRM) direccionada.

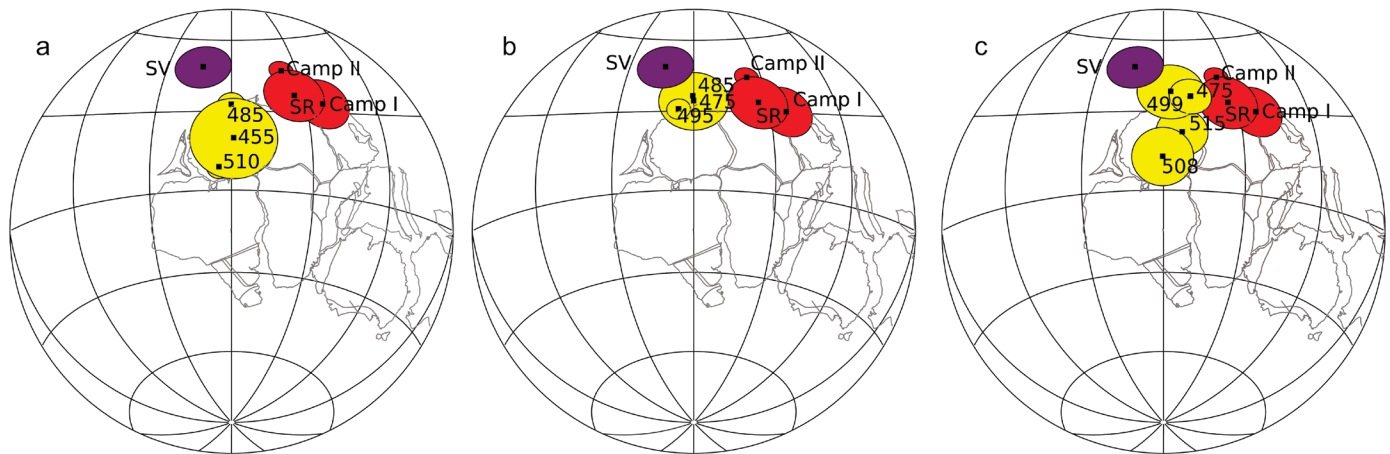
Localidad	Especimen	i esperada (°)	i IRM (°)	1/F	F Localidad	D
Ruta	SV1-2b	61,7	67,8	0,76	1,13	0,25
	SV2-1a	46,4	49,5	0,90		
	SV2-1b	46,4	45,7	1,02		
	SV3-2b	45,5	33,2	1,56		
	SV4-4a	59,3	58,2	1,04		
	SV5-3a	64,7	67	0,90		
	SV5-4a	65,9	58,4	1,38		
	SV7-2a	67	63,6	1,17		
	SV7-5b	59,5	49,9	1,43		
Selva	SV11-4a	31,2	28,1	1,13	1,08	0,04
	SV12-7a	55	49,8	1,21		
	SV12-3a	54,1	56,8	0,90		

La inclinación (i) es relativa al plano de estratificación. F: factor de corrección de cada espécimen. F localidad: factor de corrección por localidad junto con la desviación estándar (D\*). No se pudo calcular el factor para "Gaucho Gil" debido a la falta de especímenes aptos para el estudio

**CUADRO 4.** Resultados obtenidos a partir del estudio de magnetización remanente isotérmica direccionada (IRM) por sitio.

Sitio	i (°)	1/F localidad	i* (°)	A95 (°)	Lat PGV (°)	Long PGV (°)	Dp	Dm
SV1	25,9	1,13	28,71	11,45	40,2	336,7	6,7	12,4
SV2	37		40,36	16,1	29,4	340,3	10,8	18,7
SV3	28,8		31,80	8,1	23	342,3	5,9	9,8
SV4	21,1		23,52	4,1	47,9	326,4	2,3	4,3
SV5	24		26,66	14,4	41,6	333,2	8,5	15,6
SV6	15,3		17,15	3,6	37,8	350,8	1,9	3,7
SV7	17,2		19,25	9,7	31,8	351,3	5,4	10,2
SV11	12,8	1,08	13,81	8,7	55,2	320,3	4,6	8,9
SV12	26,2		28,02	3,3	40,9	335,2	2	3,6

i: inclinación; F: factor de corrección; A95: semieje del círculo de 95% de confianza de la dirección media de remanencia del sitio; Lat: latitud; Long: longitud; Dp y Dm: semiejes de la elipse de confianza de la ubicación del polo paleomagnético virtual (PGV).



**Figura 9.** Polos paleomagnéticos del Paleozoico Inferior del Noroeste Argentino y el Gondwana. En (a), (b) y (c): SV es el polo obtenido en este trabajo; Camp II es el polo obtenido en la Formación Campanario por Franceschinis *et al.* (2016); Camp I y SR son los polos de Formación Campanario y Santa Rosita, respectivamente (Spagnuolo *et al.*, 2012). En amarillo, los polos de referencia de la curva de deriva polar aparente de Gondwana: a) según McElhinny *et al.* (2003); b) según Spagnuolo (2009); c) según varios autores, a saber: 475 Ma y 515 Ma: Grunow (1995), 508 Ma: Meert *et al.* (2001), 499 Ma: Grunow y Encarnación (2000) Los polos están en coordenadas sudafricanas según Lottes y Rowley (1990).

de Gondwana entre el Cámbrico Medio y el Ordovícico Medio (Fig. 9), la posición del polo paleomagnético obtenido para el Grupo Santa Victoria no es consistente (Fig. 9a) o lo es sólo marginalmente (Fig. 9b, c) con los polos de referencia aproximadamente coetáneos. La discrepancia se observa básicamente en paleolatitud, sugiriendo la inexistencia de rotaciones tectónicas significativas según ejes verticales en la sierra de Mojotoro. Los ensayos realizados con magnetizaciones isotérmicas direccionadas sugieren que no hay evidencias de un importante “error de inclinación”, por lo que la discrepancia podría deberse a incertezas en los polos de referencia del Gondwana o a un desplazamiento relativo menor hacia el norte del terreno Pampia con posterioridad al Ordovícico Temprano. La última alternativa no ha sido prevista en ningún modelo tectónico previo para esta región. Por otra parte, es significativa la diferencia en la posición del polo SV con los de las Formaciones Campanario (Camp I y Camp II) del Cámbrico Medio a Tardío y Santa Rosita (SR) del Ordovícico Temprano. Como ya se mencionó, en este caso las diferencias en paleolatitud son menores y posiblemente no significativas, observándose sin embargo una significativa anomalía en posición debido a declinaciones magnéticas muy distintas (Fig. 9). En el caso de SV, no se repiten las posiciones aparentemente “rotadas” de forma horaria de los

polos de la Formación Campanario y de la Formación Santa Rosita obtenidos con anterioridad en las localidades de Santa Victoria Oeste e Iruya y Matancillas (Spagnuolo *et al.* 2008, 2012 y Franceschinis *et al.* 2016), respectivamente. Nuestro resultado puede ser explicado en el marco de las dos hipótesis señaladas previamente por Franceschinis *et al.* (2016) para explicar dichas posiciones anómalas, a saber: i) rotaciones tectónicas locales según ejes verticales (probablemente andinas) que afectaron las localidades de Matancillas, Iruya y Santa Victoria Oeste o ii) el registro del desplazamiento de Pampia a lo largo del margen del cratón del Río de la Plata entre el Cámbrico Medio y el Ordovícico Temprano. En la primera hipótesis nuestros resultados indican la inexistencia de rotaciones tectónicas andinas en las tres localidades de la sierra de Mojotoro, restringiéndose las mismas a las localidades de los estudios previos. En el caso de la segunda hipótesis, la posición del polo del Grupo Santa Victoria sugiere que dicho desplazamiento ya había virtualmente concluido para el momento de adquisición de la remanencia por parte de las rocas estudiadas en el Ordovícico Temprano. Una determinación más precisa y robusta de la curva de deriva polar aparente de Gondwana en el Paleozoico inferior aparece como crítica para realizar interpretaciones paleogeográficas más confiables y discriminar entre ambas hipótesis. Asimismo,

nuevos estudios paleomagnéticos sobre el Grupo Mesón y otras unidades del Paleozoico temprano en otras localidades, resultarán útiles para restringir la probabilidad de las hipótesis mencionadas.

## CONCLUSIONES

Se realizó un relevamiento sedimentológico y estudio paleomagnético de la Formación La Pedrera, integrante del Grupo Santa Victoria, de edad ordovícica temprana en tres localidades de la Sierra de Mojotoro, Cordillera Oriental. El perfil analizado sobre una de las localidades de estudio consiste en una sucesión de areniscas cuarcíticas y sublitoarenitas interpretada como una plataforma silicoclástica proximal. En relación a los minerales opacos, se observa magnetita y hematita de alteración interestratal (diagenética). Se aisló una componente magnética pre-tectónica de alta temperatura portada por hematita. En 11 de los 12 sitios se observó una polaridad reversa, mientras que un sitio portó polaridad normal, compatible con una edad tremadociana media a tardía para la remanencia. A partir de las direcciones de los 12 sitios se calculó un polo paleomagnético (Long=340,4°E Lat=38,3°N; N (sitios)=12 k=25,13 A95=8,8°) para el Grupo Santa Victoria en la Sierra de Mojotoro. La ubicación del polo es discordante con las obtenidas anteriormente

para las Formaciones Campanario y Santa Rosita en otras localidades de la Cordillera Oriental y es más cercana a los polos de referencia de Gondwana del Ordovícico Inferior a Medio. El polo paleomagnético obtenido indica que los sedimentos se habrían depositado en una paleolatitud de  $13,5^\circ \pm 8,8^\circ$ . Se determinó que la baja paleolatitud encontrada para esta unidad no se debería a efectos significativos de compactación y/o deformación. La interpretación de la posición del polo del Grupo Santa Victoria se torna ambigua ante las diferencias que presentan las distintas curvas de deriva polar aparente de Gondwana para el Paleozoico inferior propuestas en las últimas décadas. Sin embargo, la posición del polo sugiere que las localidades estudiadas en la sierra de Mojotoro no han sido afectadas significativamente por rotaciones tectónicas andinas (ni previas). Si Pampia sufrió un desplazamiento paralelo al margen del Cratón del Río de la Plata en el Cámbrico, como ha sido propuesto en trabajos anteriores, los resultados de nuestro estudio sugieren que dicho movimiento habría virtualmente concluido con anterioridad a la adquisición de la remanencia del Grupo Santa Victoria (posiblemente en el Ordovícico Temprano).

## AGRADECIMIENTOS

La mayor parte de los estudios aquí presentados constituyeron el trabajo Final de Licenciatura de Constanza Rodríguez Piceda en el Departamento de Ciencias Geológicas (FCEN-UBA), institución que aportó apoyo financiero parcial e infraestructura para la realización del mismo. El Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber facilitó el uso del vehículo todo terreno para el trabajo de campo. Los trabajos de laboratorio y el instrumental para el campo fueron aportados por el Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires. La mayor parte del financiamiento para este estudio provino de un proyecto UBACyT 20020130100465BA y de un proyecto PIP-CONICET 11220150100556. Los autores agradecen al equipo editorial (Dr. Diego Kietzmann y Dra. Carmen Martínez Dopico) y a las Dras. Silvana Geuna

y Cecilia Spagnuolo por sus comentarios, los cuales ayudaron a mejorar este trabajo.

## REFERENCIAS

- Aceñolaza, F.G. y Aceñolaza, G.F. 2005. La Formación Puncoviscana y unidades estratigráficas vinculadas en el Neoproterozoico - Cámbrico Temprano del Noroeste Argentino. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 12: 65-87.
- Aceñolaza, F.G. y Tosselli, A.J. 1976. Consideraciones estratigráficas y tectónicas sobre el Paleozoico inferior del Noroeste argentino. 2° Congreso Latinoamericano de Geología, Tomo 2: 755-763, Caracas.
- Aceñolaza, F.G. y Toselli, A.J. 1981. Geología del Noroeste Argentino. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán, Publicación Especial 1287: 1-212.
- Aceñolaza, F.G., Miller, H. y Toselli, A.J. 1990. El Ciclo pampeano en el Noroeste Argentino. Instituto Superior de Correlación Geológica, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán, 227 p., San Miguel de Tucumán.
- Aparicio González, P.A., Moya, M.C., e Impiccini, A. 2010. Estratigrafía de las rocas meta-sedimentarias (Neoproterozoico-Cámbrico) de la Sierra de Mojotoro, Cordillera Oriental Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin analysis* 17: 65-83.
- Aparicio González, P.A., Pimentel, M.M., Hauser, N. y Moya, M.C. 2014. U-Pb LA-ICP-MS geochronology of detrital zircon grains from low-grade metasedimentary rocks (Neoproterozoic – Cambrian) of the Mojotoro Range, northwest Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 49: 39-59.
- Aparicio González, P.A., Garban, G., Hauser, N. y Gigena, L. 2017. Geochemistry of meta-sedimentary rocks from the Puncoviscana Complex in the Mojotro Range, NW Argentina: implications for provenance and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 78: 1-14.
- Boll A. y Hernández, M. 1986. Interpretación Estructural del área Tres Cruces-Provincia de Jujuy- Argentina. *Boletín de Información Petrolera* 7: 2-14.
- Borradaile, G.J. y Henry, B. 1997. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth-Science Reviews* 42: 49-93.
- Butler, R. 1992. *Palaeomagnetism: Magnetic Domains to Geological Terranes*. Blackwell Scientific Publications, 319 p., Oxford.
- Caminos, R. 1979. Sierras Pampeanas Noroccidentales. Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. En: Leanza, E.F. (ed.) 2° Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias: 225-291, Córdoba.
- Do Campo, M., y Nieto, F. 2003. Transmission electron microscopy study of very low-grade metamorphic evolution in Neoproterozoic pelites of the Puncoviscana formation (Cordillera Oriental, NW Argentina). *Clay Minerals* 38: 459-481.
- Enkin, R.J. 2003. The direction-corrected tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies. *Earth and Planetary Science Letters* 212: 151-166.
- Escayola, M.P., Ramé, G. y Kraemer, P.E. 1996. Caracterización y significado geotectónico de las fajas ultramáficas de las Sierras Pampeanas de Córdoba. 13° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 421-438, Buenos Aires.
- Escayola, M.P., Van Staal, C.R., y Davis, W.J. 2011. The age and tectonic setting of the Puncoviscana Formation in northwestern Argentina: An accretionary complex related to Early Cambrian closure of the Puncoviscana Ocean and accretion of the Arequipa-Antofalla block. *Journal of South American Earth Sciences* 32: 438-459.
- Folk, R.L. 1974. Petrography of sedimentary rocks. University of Texas, 180 p., Austin.
- Franceschinis, P.R., Rapalini, A.E., Spagnuolo, C.M. y Geuna, S.E. 2017. Paleomagnetismo y paleogeografía del Paleozoico inferior del noroeste argentino. En: Muruaga, C.M. y Grosse, P. (eds.), *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA*. 20° Congreso Geológico Argentino, Relatorio 85-101. San Miguel de Tucumán.
- Franceschinis, P.R., Rapalini, A.E., Escayola, M.P., y Lippo, T. 2016. Paleomagnetic studies on the late Ediacaran–Early Cambrian Puncoviscana and the late Cambrian Campanario formations, NW Argentina: New paleogeographic constraints for the Pampia terrane. *Journal of South American Earth Sciences* 70: 145-161.
- Grunow, A.M. 1995. Implications for Gondwana of new Ordovician paleomagnetic data from igneous rocks in southern Victoria Land, East Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 100: 12589-12603.

- Grunow, A.M. y Encarnación, J.P., 2000. Cambro-Ordovician palaeomagnetic and geochronologic data from southern Victoria Land, Antarctica: revision of the Gondwana apparent polar wander path. *Geophysical Journal International* 141: 392-400.
- Harrington, H.J., 1957. Ordovician Formations of Argentina. En: Harrington, H.J., Leanza, A.F. (eds.), *Ordovician Trilobites of Argentina*. Department of Geology, University of Kansas Press, Special Publication 1: 1-276.
- Heredia, N., Fernández, R.R., Seggiaro, R.E. y González, M.A., 1997. Estructura de inversión tectónica en la Cordillera Oriental de los Andes, entre 23° y 24° S, Provincia de Jujuy, NO de Argentina. *Acta geológica hispánica* 32: 93-102.
- Hodych, J.P. y Buchan, K.L. 1994. Early Silurian palaeolatitude of the Springdale Group redbeds of central Newfoundland: a palaeomagnetic determination with a remanence anisotropy test for inclination error. *Geophysical Journal International* 117: 640-652.
- Jelinek, V. 1978. Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens and its applications. *Studies Geophysical Geodesy* 22: 50-62
- Kirschvink, J.L., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 62: 699-718.
- Kley, J., Monaldi, C.R. y Salfity, J.A. 1999. Along-strike segmentation of the Andean foreland: causes and consequences. *Tectonophysics* 301: 75-94.
- Kley, J. 1996. Transition from basement-involved to thin-skinned thrusting in the Cordillera Oriental of southern Bolivia. *Tectonics* 15: 763-775.
- Lottes, A.L. y Rowley, D.B. 1990. Reconstruction of the Laurasian and Gondwanan segments of Permian Pangaea. *Geological Society of London Memoirs* 12: 383-395.
- McFadden, P.L. y Lowes, F.J. 1981. The discrimination of mean directions drawn from Fisher distributions. *Geophysical Journal International* 67: 19-33.
- McFadden, P.L. y McElhinny, M. W., 1988. The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in palaeomagnetism. *Earth and Planetary Science Letters* 87: 161-172.
- McFadden, P.L. y McElhinny, M.W. 1990. Classification of the reversal test in palaeomagnetism. *Geophysical Journal International* 103: 725-729.
- McElhinny, M.W., Powell, C.M. y Pisarevsky, S.A. 2003. Paleozoic terranes of eastern Australia and the drift history of Gondwana. *Tectonophysics* 362: 41-65.
- Meert, J.G., Nédélec, A., Hall, C., Wingate, M.T. y Rakotondrazafy, M. 2001. Paleomagnetism, geochronology and tectonic implications of the Cambrian-age Carion granite, Central Madagascar. *Tectonophysics* 340: 1-21.
- Mon, R. y Salfity, J.A. 1995. Tectonic evolution of the Andes of northern Argentina. En: Tankard, A.J., Suarez Soruco, R. y Welsink, H.J. (eds.) *Petroleum basins of South America*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 62: 269-283, Tulsa.
- Moya, M.C. 1998. El Paleozoico inferior en la sierra de Mojotoro, Salta-Jujuy. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 53: 219-238.
- Ortiz, A. 1962. Estudio geológico de la sierra de Castillejo, departamento Capital, Salta. Facultad de Ciencias Naturales de Salta. Tesis doctoral (inédita), 60 p., Salta.
- Pankhurst, R.J. y Rapela, C.W. 1998. The proto-Andean margin of Gondwana: an introduction. En Pankhurst, R.J. y Rapela, C.W. (eds.). *The Proto-Andean Margin of Gondwana*, Geological Society of London, Special Publication 142: 1-9.
- Parés, J.M. 2004. How deformed are weakly deformed mudrocks? Insights from magnetic anisotropy. *Geological Society of London, Special Publication* 238: 191-203.
- Parés, J.M., 2015. Sixty years of anisotropy of magnetic susceptibility in deformed sedimentary rock. *Frontiers in Earth Science* 3: 1-13.
- Pavlov, V. y Gallet, Y. 2005. A third superchron during the Early Paleozoic. *Episodes-News magazine of the International Union of Geological Sciences* 28: 78-84.
- Ramos, V.A. 1988. Tectonics of the Late Proterozoic early Paleozoic: a collisional history of southern South America. *Episodes* 11: 168-174.
- Ramos, V.A., Vujovich, G., Martino, R. y Otamendi, J. 2010. Pampia: a large cratonic block missing in the Rodinia supercontinent. *Journal of Geodynamics* 50: 243-255.
- Rapalini, A.E. 2005. The accretionary history of southern South America from the latest Proterozoic to the Late Palaeozoic: some palaeomagnetic constraints. *Geological Society of London, Special Publications* 246: 305-328.
- Rapalini, A.E. 2006. New Late Proterozoic paleomagnetic pole for the Rio de la Plata craton: implications for Gondwana. *Precambrian Research* 147: 223-233.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Casquet, C., Fanning, C.M., Baldo, E.G., González-Casado, J.M., y Dahlquist, J. 2007. The Río de la Plata craton and the assembly of SW Gondwana. *Earth-Science Reviews* 83: 49-82.
- Rapela, C.W., Verdecchia, S.O., Casquet, C., Pankhurst, R.J., Baldo, E.G., Galindo, C. y Fanning, C.M. 2016. Identifying Laurentian and SW Gondwana sources in the Neoproterozoic to Early Paleozoic metasedimentary rocks of the Sierras Pampeanas: Paleogeographic and tectonic implications. *Gondwana Research* 32: 193-212.
- Rodríguez Picada, C. 2017. Geología y Paleomagnetismo del Grupo Santa Victoria en sierra de Mojotoro, provincia de Salta. Trabajo Final de Licenciatura, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (inédito), 94 p., Buenos Aires.
- Rubiolo, D.G. 1997. Esquema de evolución tectono-sedimentaria para las Cuencas Cenozoicas de la Cordillera Oriental (22° a 23° lat. S.), Argentina. *Acta geológica hispánica* 32: 77-92.
- Scasso R.A. y Limarino, C.O. 1997. Petrología y diagénesis de rocas clásticas. *Asociación Argentina de Sedimentología. Publicación Especial* 1, 259 p., Buenos Aires.
- 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: Solid Earth* 101: 11387-11400.
- Spagnuolo, C.M. 2009. Evolución Paleogeográfica del Noroeste Argentino en el Paleozoico temprano en base a estudios paleomagnéticos. Tesis de doctorado, Universidad de Buenos Aires (inédita), 324 pp., Buenos Aires.
- Spagnuolo, C.M., Rapalini, A.E., y Astini, R.A. 2008. Paleogeographic and tectonic implications of the first paleomagnetic results from the Middle-Late Cambrian Mesón Group: NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 25: 86-99.
- Spagnuolo, C.M., Rapalini, A.E., y Astini, R.A. 2012. Assembly of Pampia to the SW Gondwana margin: A case of strike-slip docking?. *Gondwana Research* 21: 406-421.
- Tarling, D.H. y Hrouda, F. 1993. The magnetic anisotropy of rocks, Chapman & Hall Eds. 217 pp., Londres.
- Tauxe, L., Kodama, K.P. y Kent, D.V. 2008. Tes-

- ting corrections for paleomagnetic inclination error in sedimentary rocks: a comparative approach. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 169: 152-165.
- Tomezzoli, R.N., Arzadún, G. y Cristallini, E.O. 2017. Anisotropía de susceptibilidad magnética y paleomagnetismo en la Formación Lolén de edad devónica. Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74: 326-337.
- Turner, J.C.M. 1960. Estratigrafía de la Sierra de Santa Victoria y adyacencias. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba* 41: 163-19.
- Van der Voo, R. 1990. The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics* 184: 1-9.
- Zimmermann, U., 2005. Provenance studies of very low to low-grade metasedimentary rocks of the Puncoviscana Complex, northwest Argentina. En Vaughan, A.P.M., Leat, P.T. y Pankhurst R.J. (eds.), *Terrane Processes at the margins of Gondwana*. Geological Society of London, Special Publications 246: 381-416.

Recibido: 16 de mayo, 2018

Aceptado: 31 de agosto, 2018