

CONTROLES DE LA FÁBRICA MAGNÉTICA EN ARENISCAS DE LA FORMACIÓN CUCULÍ (MIOCENO, PRECORDILLERA DE SAN JUAN)

CUCULÍ FORMATION SANDSTONES (MIOCENE, SAN JUAN PRECORDILLERA): MAGNETIC FABRIC CONTROLS

Oriolo, Sebastián¹, Ré, Guillermo Héctor², Japas, María Silvia², Cristallini, Ernesto Osvaldo³

¹ Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Buenos Aires.
soriolo@gwdg.de

² Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (CONICET–UBA).
indio@gl.fcen.uba.ar
msjapas@gl.fcen.uba.ar

³ Laboratorio de Modelado Geológico, Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber (CONICET–UBA).
ernesto@gl.fcen.uba.ar

RESUMEN

Se llevó a cabo un estudio preliminar de fábrica magnética y petrofábrica en areniscas de la Formación Cuculí (Mioceno) en dos localidades de la Precordillera de San Juan y sus resultados fueron comparados con datos obtenidos a partir de estudios cinemáticos de otros autores en el mismo sector. El estudio de la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) revela elipsoides triaxiales con grados muy bajos de anisotropía. Dado que las rocas analizadas no presentan evidencias macro– o microscópicas de deformación interna, se interpreta que los elipsoides de ASM representan fábricas magnéticas compuestas incipientes, donde la fábrica sedimentaria es un importante factor de control en su desarrollo.

Palabras claves: anisotropía de susceptibilidad magnética, petrofábrica, cinemática, Andes Centrales, faja plegada y corrida

ABSTRACT

A preliminary study of magnetic fabric and petrofabric in sandstones from the Cuculí Formation (Miocene) was carried out in two localities from the Precordillera of San Juan and the results were compared with studies based on kinematic data obtained by other authors in the same localities. The study of the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) shows triaxial ellipsoids with very low degrees of anisotropy. Due to the lack of macro– or microscopic evidences of strain, it is interpreted that the AMS ellipsoids represent incipient composite magnetic fabrics, whose development is significantly influenced by the sedimentary fabric.

Keywords: anisotropy of magnetic susceptibility, petrofabric, kinematics, Central Andes, fold and thrust belt

INTRODUCCIÓN

El concepto de petrofábrica refiere al ordenamiento, geometría y relación espacial de los elementos constitutivos de una roca, independientemente de la escala de observación. En particular, la fábrica magnética es el resultado de la orientación preferencial de los granos de aquellos minerales que contribuyen a la susceptibilidad magnética de una roca. Por lo tanto, los estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) constituyen una herramienta fundamental en el conocimiento de la petrofábrica, la cual resulta de la génesis y posterior historia evolutiva de la roca. En las últimas décadas, esta metodología se ha utilizado ampliamente en el estudio de la

deformación interna de las rocas, pues se considera que el elipsoide de ASM y el elipsoide de deformación interna finita son coaxiales.

La ASM se ha empleado para analizar la fábrica tectónica de rocas sedimentarias que no presentan evidencias de deformación interna macro- o microscópica (Kissel *et al.*, 1986; Lee *et al.*, 1990; Sagnotti y Speranza, 1993; Scheepers y Langereis, 1994; Mattei *et al.*, 1997; Olivia-Urcía *et al.*, 2009). Sin embargo, la fábrica magnética puede también ser controlada por los procesos depositacionales y diagenéticos, tal como lo han mostrado Hrouda y Janák (1971), Hrouda y Stráník (1985), Park *et al.* (2000), Goddu *et al.* (2007) y Meissl *et al.* (2011). Si bien algunos autores han analizado el control ejercido simultáneamente por fábricas primarias y tectónicas en el desarrollo de la fábrica de ASM (Hirt *et al.*, 1995; Mattei *et al.*, 1997; Sagnotti *et al.*, 1998; Luo *et al.*, 2009; Mallik *et al.*, 2009; Soto *et al.*, 2009; Oliva-Urcía *et al.*, 2010), los factores de control en el desarrollo de fábricas magnéticas compuestas son aún poco conocidos.

Los antecedentes en el estudio de magnetofábricas en rocas sedimentarias de la Precordillera son escasos. Entre ellos, pueden mencionarse los trabajos de Terrizzano *et al.* (2011) en Precordillera Sur, y Fazzito (2011) y Fazzito *et al.* (2011) en relación a la falla El Tigre.

En la presente contribución se presentan resultados preliminares de fábrica magnética en areniscas de la Formación Cuculí ubicadas en la localidad de Hualilán. Los resultados obtenidos se comparan con la fábrica sedimentaria de las areniscas e información cinemática del área de estudio, de modo de establecer el control que habrían ejercido las fábricas primarias y tectónicas en la fábrica magnética de las rocas analizadas.

MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio se ubica en la región de Hualilán, localizada en el sector central de la Precordillera de San Juan (Fig. 1). Dicha unidad morfoestructural se encuentra limitada por los valles de Iglesia-Uspallata y Bermejo-Tulum, que la separan de la Cordillera Frontal al oeste y las Sierras Pampeanas al este, respectivamente. Asimismo, la Precordillera constituye una faja plegada y corrida estructurada como consecuencia de la migración de la deformación andina hacia el antepaís a partir del Mioceno (Baldis y Chebli, 1969; Ortiz y Zambrano, 1981; Allmendinger *et al.*, 1990; Cristallini y Ramos, 2000). Como resultado, se han acumulado potentes depósitos continentales sinorogénicos en la extensa cuenca de antepaís del Bermejo (Johnson *et al.*, 1986; Jordan *et al.*, 1990, 1993; Milana *et al.*, 2003).

Dentro del área de estudio (Fig. 2), las unidades miocenas se disponen sobre un basamento paleozoico, constituido por rocas de las formaciones San Juan, Sierra de la Invernada, Los Espejos, Talacasto y Punta Negra (Furque, 1983; Furque *et al.* 2003). Las unidades miocenas están representadas por rocas volcánicas y subvolcánicas neógenas, y sedimentitas de las formaciones Cuculí (Cuerda y Furque, 1981) y El Corral (Furque, 1963).

La Formación Cuculí forma parte de las secuencias sinorogénicas de la Cuenca del Bermejo y ha sido dividida en tres miembros por Furque (1983): arenoso basal, conglomerádico y arenoso superior. Los miembros arenosos están constituidos por alternancias de areniscas y limonitas estratificadas rojizas y castañas. El nivel superior posee también escasos niveles lenticulares de conglomerados. El miembro conglomerádico está formado por ortoconglomerados lenticulares de base erosiva, intercalados con niveles de areniscas grises. Jordan y Damanti (1990) y Jordan *et al.* (1990) han interpretado los depósitos de esta unidad como el resultado de actividad fluvial, que habría dado lugar a la generación de canales y planicies de inundación. Las etapas de relativa estabilidad habrían permitido el desarrollo de paleosuelos en las planicies de inundación. La base de la Formación Cuculí tendría una edad entre 15 y 17 Ma, mientras que la edad de su techo se ubica en el intervalo 10,8–10,4 Ma, de acuerdo a estudios magnetoestratigráficos y edades obtenidas en tobos mediante trazas de fisión (Jordan y Damanti, 1990; Jordan *et al.*, 1990).

Desde el punto de vista estructural, el área presenta dos sistemas de estructuras diferentes. El primero está conformado por una serie de corrimientos de rumbo NNE a NNO con vergencia al este, que forman parte de la faja plegada y corrida de la Precordillera. En contraposición, el segundo sistema está constituido por fallas subverticales de rumbo ONO a ENE, que presentan desplazamiento de rumbo dominante y afectan a las estructuras de rumbo submeridional (Oriolo, 2012; Oriolo *et al.*, 2014). Estas últimas se encuentran particularmente concentradas en la Sierra de la Mina (Fig. 2), donde también controlan el emplazamiento de los cuerpos miocenos volcánicos y subvolcánicos y la mineralización asociada (Oriolo, 2012; Oriolo *et al.*, 2014). Asimismo, estos autores han reconocido mediante información geofísica la continuidad de estas estructuras y los cuerpos ígneos bajo los depósitos cuaternarios del bolsón intermontano de Hualilán.

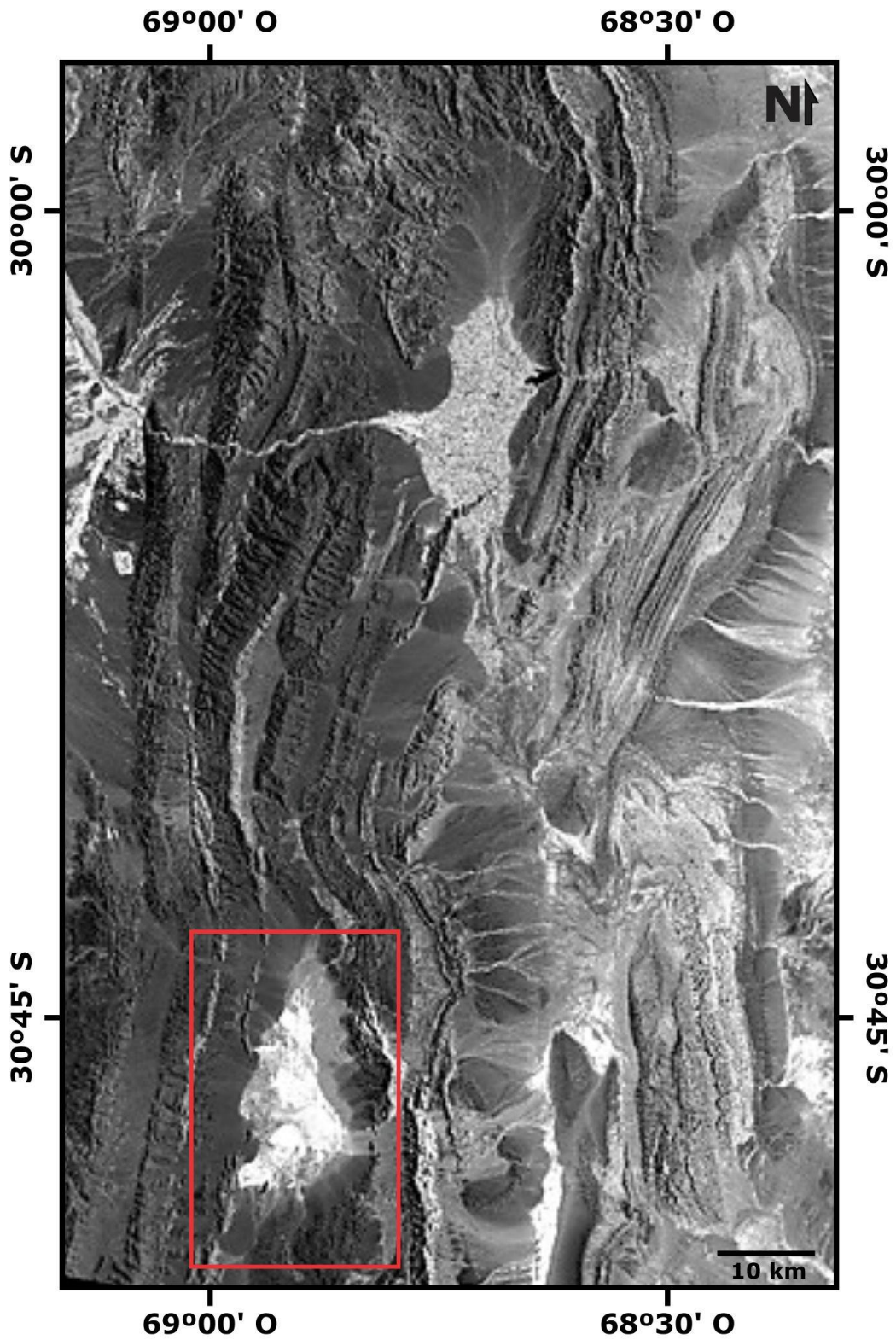


Fig. 1: Imagen Landsat ETM+ de la Precordillera de San Juan (NASA Landsat Program, 2003). El recuadro indica el área de estudio.

Fig. 1: Landsat ETM+ image of the Precordillera of San Juan (NASA Landsat Program, 2003). The rectangle indicates the study area.

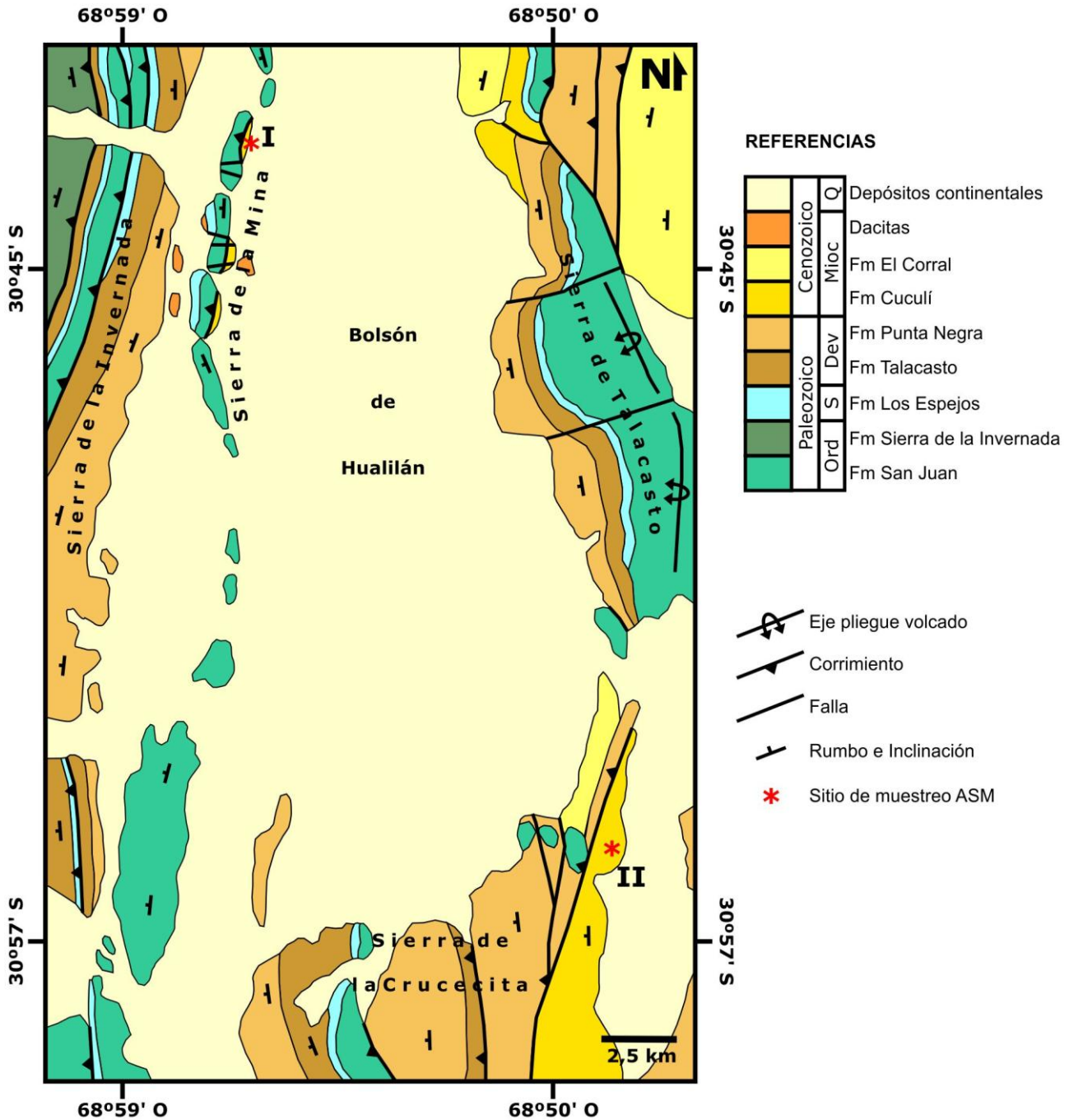


Fig. 2: Mapa geológico del área de estudio (modificado de Furque *et al.*, 2003).
 Fig. 2: Geological map of the study area (modified from Furque *et al.*, 2003).

METODOLOGÍA

El muestreo para el estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética se realizó en dos sitios, en cada uno de los cuales se obtuvieron 10 muestras de mano orientadas. El sitio I se ubica en el extremo norte de la sierra de la Mina y los intervalos muestreados corresponden a areniscas finas muy consolidadas con laminación horizontal, intercaladas con numerosos bancos de pelitas y escasas lentes de conglomerados (Fig. 3). No pudo determinarse la posición estratigráfica de la sección analizada dentro de la Formación Cuculí debido a la falta de estudios de detalle

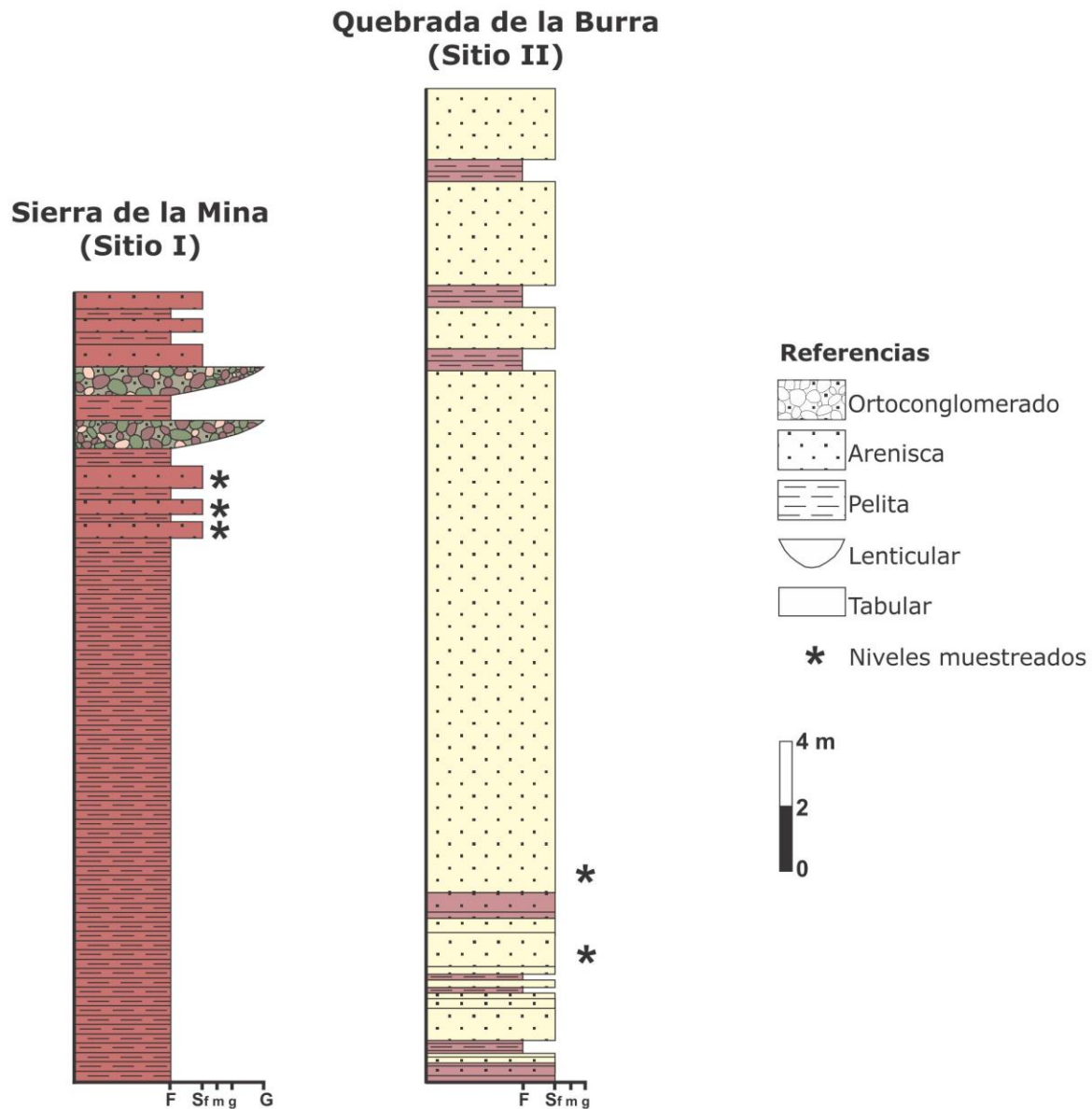


Fig. 3: Perfiles sedimentarios esquemáticos de las sucesiones correspondientes a los sitios de muestreo.
Fig. 3: Schematic sedimentary profiles of the sequences where the samples were collected.

en ese sector. El sitio II se localiza en la quebrada de la Burra, en el extremo sudeste del área de estudio. Allí se muestrearon areniscas finas masivas poco consolidadas del miembro arenoso superior, que se encuentran comprendidas dentro de una extensa sucesión de areniscas con delgadas intercalaciones de pelitas (Fig. 3). Las muestras obtenidas en ambos sitios fueron analizadas macro- y microscópicamente a fin de reconocer y caracterizar otros aspectos de la petrofábrica que pudieran compararse con la fábrica de ASM. Para ellos, se levantaron perfiles sedimentarios en ambos sitios y se confeccionaron láminas delgadas orientadas de forma perpendicular a la estratificación.

A partir de las muestras de mano, se extrajeron un total de 50 especímenes cilíndricos de 2,2 cm de altura y 2,54 cm de diámetro. La anisotropía de susceptibilidad magnética fue medida mediante un susceptibilímetro AGICO MFK1-B de acuerdo al protocolo de medición en 15 posiciones establecido por Tauxe (2002). Los resultados de las mediciones fueron procesados mediante el software Safyr4W a partir de los métodos estadísticos propuestos por Jelinek (1978), que permitieron determinar la orientación de los semiejes del elipsoide de ASM así como sus respectivas elipses de confianza. Del mismo modo, se calcularon la susceptibilidad magnética media K_m (Nagata 1961, Janák 1965), el parámetro de forma T y el grado de anisotropía corregido P_j (Jelinek, 1981). Estos dos últimos

términos se utilizaron como indicadores de intensidad de la fábrica y su forma, según las recomendaciones de Jelinek (1981) y Hrouda (1982). De acuerdo a Jelinek (1981), el parámetro T toma valores entre -1 y $+1$, donde $T=0$ representa elipsoides isotropos mientras que $T>0$ y $T<0$ corresponden a formas oblatas y proladas, respectivamente. Asimismo, el grado de anisotropía corregido P_j muestra el grado de orientación preferencial de los minerales que generan la fábrica magnética (Jelinek, 1981).

RESULTADOS

Análisis petrográfico

Los intervalos muestreados en el sitio I están constituidos por areniscas finas muy consolidadas, con laminación horizontal y fábrica clasto–sostén formada por clastos (95%) de tamaño medio de $0,1$ mm y material ligante (5%). Los clastos son subredondeados y están compuestos fundamentalmente por fragmentos líticos sedimentarios, cuarzo, feldespato y fragmentos líticos volcánicos. Los fragmentos líticos sedimentarios (46%) están representados por clastos de grano muy fino por lo que no puede reconocerse su mineralogía a excepción de aquellos constituidos por chert, mientras que los fragmentos líticos volcánicos son muy escasos y comprenden rocas volcánicas formadas por pasta de plagioclasa y minerales opacos. Los clastos de cuarzo (26%) presentan extinción relámpago, mientras que los de feldespato corresponden a plagioclasa (21%) con maclas polisintéticas, si bien también se observan algunos cristales de feldespato potásico. Como componentes accesorios, se encuentran clastos de minerales opacos (7%) que suelen concentrarse en láminas delgadas que definen la laminación horizontal (Fig. 4a). El material ligante está formado por una matriz (5%) de arcillas de color castaño, mientras que el cemento es escaso y sólo se manifiesta como pátinas y parches de carbonatos y óxidos de hierro. De acuerdo a los porcentajes modales recalculados, estas rocas se clasifican como litoarenitas feldespáticas según la clasificación de Folk *et al.* (1970).

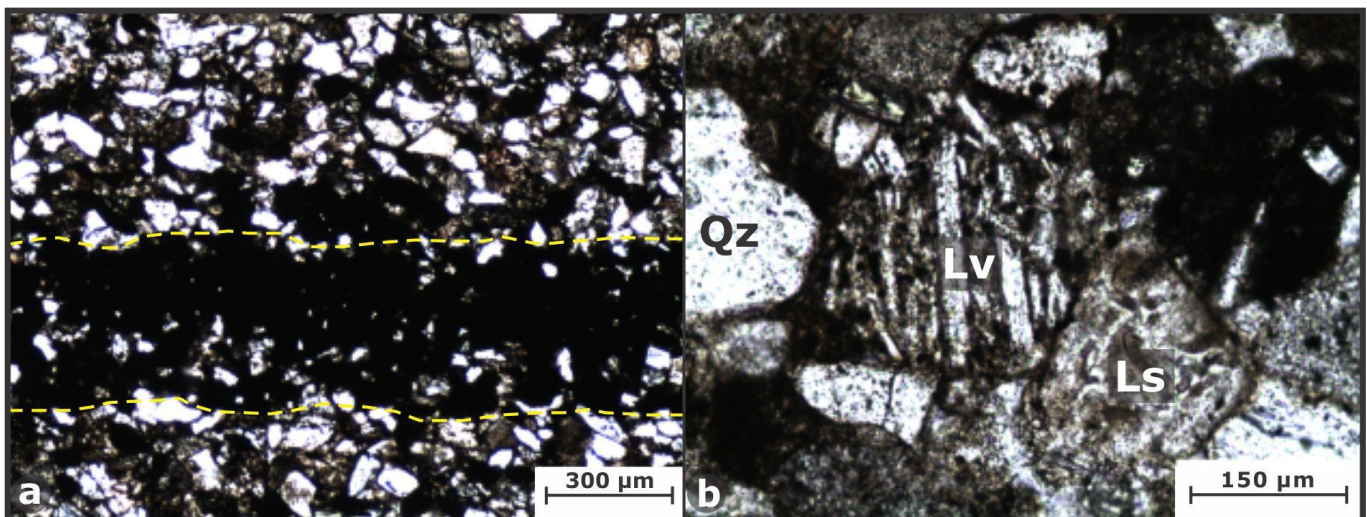


Fig. 4: Fotomicrografías de las rocas analizadas (nicoles paralelos). a) Laminación horizontal en las areniscas del sitio I con detalle de las láminas ricas en minerales opacos. b) Clastos de las areniscas del sitio II (Qz: cuarzo, Lv: lítico volcánico, Ls: lítico sedimentario).

Fig. 4: Photomicrographies of the studied rocks (parallel nicols). a) Horizontal lamination in the sandstones from site I, where the opaque minerals–rich layers are indicated. b) Clasts of the sandstones from site II (Qz: quartz, Lv: volcanic lithic fragment, Ls: sedimentary lithic fragment).

Las sedimentitas del sitio II corresponden a areniscas finas masivas poco consolidadas, con fábrica clasto–sostén formada por clastos (90%) de tamaño medio de 0.2 mm y material ligante (10%). Los clastos son subangulosos a subredondeados y están compuestos fundamentalmente por fragmentos líticos sedimentarios y volcánicos, cuarzo y feldespato (Fig. 4b). Los líticos sedimentarios (30%) están formados por clastos de grano muy fino por lo que no puede reconocerse su mineralogía, mientras que los líticos volcánicos (12%) son principalmente rocas volcánicas formadas por pasta de textura pilotáxica fluidal donde los microlitos de plagioclasa se orientan de forma subparalela entre sí. Los clastos de cuarzo (33%) presentan extinción relámpago y los de feldespato corresponden a plagioclasa

	Especimen	Km (SI)	Pj	T	K₁	K₂	K₃
Subpoblación 1	4-1b	8,34.10 ⁻⁴	1,010	0,238	314/46	219/04	125/44
	4-2a	9,81.10 ⁻⁴	1,010	-0,290	323/50	216/14	115/37
	4-2b	9,31.10 ⁻⁴	1,010	0,148	343/36	238/19	125/48
	4-3a	9,31.10 ⁻⁴	1,007	-0,088	010/32	262/27	140/46
	4-3b	9,46.10 ⁻⁴	1,013	-0,064	320/49	221/09	123/40
	4-4b	8,24.10 ⁻⁴	1,012	0,520	320/53	220/08	124/36
	7-1a	5,10.10 ⁻⁴	1,004	-0,249	238/46	031/41	133/13
	7-3b	5,09.10 ⁻⁴	1,007	0,810	239/17	342/37	130/49
	7-4b	5,04.10 ⁻⁴	1,007	0,355	319/53	205/17	104/32
	7-7a	5,04.10 ⁻⁴	1,007	0,193	333/49	208/26	103/29
	7-8a	4,90.10 ⁻⁴	1,007	0,207	330/46	208/28	099/31
	7-8b	4,99.10 ⁻⁴	1,008	0,148	311/55	215/04	122/35
	Subpoblación 2	3-1a	5,82.10 ⁻³	1,029	0,610	330/40	211/30
3-1b		4,45.10 ⁻³	1,024	0,437	333/25	206/52	077/26
3-2b		6,82.10 ⁻³	1,027	0,599	350/38	231/31	114/36
3-3b		5,58.10 ⁻³	1,018	0,242	345/36	226/34	108/36
3-4b		5,95.10 ⁻³	1,018	0,831	004/30	250/36	123/40
3-5a		5,83.10 ⁻³	1,019	0,329	344/43	232/23	122/39
3-6b		5,86.10 ⁻³	1,020	0,294	349/39	233/29	118/38
5-2a		5,71.10 ⁻³	1,024	0,826	352/19	245/41	101/43
5-3b		4,79.10 ⁻³	1,021	0,496	333/35	229/20	115/48
5-4a		5,83.10 ⁻³	1,021	0,842	002/30	245/38	119/37
5-4b		5,19.10 ⁻³	1,019	0,523	336/44	230/17	125/41
5-5a		5,28.10 ⁻³	1,018	0,673	009/26	253/42	121/37
5-6b		5,77.10 ⁻³	1,018	0,652	337/41	225/23	114/40
8-1a		1,00.10 ⁻²	1,047	0,729	007/40	194/50	100/03
8-2a		8,19.10 ⁻³	1,038	0,852	210/65	010/24	103/07
	1-1a	5,63.10 ⁻³	1,076	0,933	220/68	024/21	116/06
	1-1b	4,93.10 ⁻³	1,071	0,902	360/70	204/18	112/08

Tabla 1: Parámetros calculados para los especímenes del sitio I. *Km*: susceptibilidad magnética media, *Pj*: grado de anisotropía corregido, *T*: parámetro de forma. Se indican rumbo y buzamiento de *K₁*, *K₂* y *K₃*.

Table 1: Calculated parameters for the specimens of site I. *Km*: average magnetic susceptibility, *Pj*: corrected anisotropy degree, *T*: shape parameter. Trend and plunge of *K₁*, *K₂* and *K₃* are indicated.

Especimen	Km (SI)	Pj	T	K₁	K₂	K₃
9-2a	8,10.10 ⁻³	1,018	-0,014	359/07	144/82	268/05
7-1	5,53.10 ⁻³	1,017	-0,239	002/05	260/69	093/21
2-1	8,74.10 ⁻³	1,016	0,002	185/06	010/84	275/01
6-1a	7,25.10 ⁻³	1,019	0,367	360/13	158/76	269/05
6-1b	7,08.10 ⁻³	1,018	0,342	000/13	173/77	270/02
2-2	7,82.10 ⁻³	1,016	0,215	189/04	003/86	099/01
1-5	7,42.10 ⁻³	1,015	-0,125	003/00	272/79	094/11
9-1	8,57.10 ⁻³	1,019	0,069	357/09	133/78	266/08
1-4a	8,06.10 ⁻³	1,017	-0,174	189/04	291/72	098/18
9-2b	8,11.10 ⁻³	1,016	0,173	005/01	099/78	275/12
1-3b	8,60.10 ⁻³	1,015	0,174	006/04	137/84	276/05
1-3a	7,38.10 ⁻³	1,015	-0,017	006/02	217/88	096/01
3-5a	7,24.10 ⁻³	1,017	-0,017	187/10	311/72	095/14
3-3a	8,01.10 ⁻³	1,018	0,218	181/14	315/70	088/14
3-5b	8,90.10 ⁻³	1,017	0,103	187/14	321/70	094/14
3-3b	7,76.10 ⁻³	1,019	0,067	184/12	321/74	092/11
3-2b	9,00.10 ⁻³	1,019	0,122	182/07	301/76	091/13
3-1	8,17.10 ⁻³	1,017	-0,104	181/05	307/82	091/06
3-4a	8,52.10 ⁻³	1,016	-0,112	184/08	316/77	093/09
3-2a	8,45.10 ⁻³	1,018	0,004	185/07	316/77	093/09
3-6b	9,31.10 ⁻³	1,017	-0,137	188/17	325/67	093/15

Tabla 2: Parámetros calculados para los especímenes del sitio II. *Km*: susceptibilidad magnética media, *Pj*: grado de anisotropía corregido, *T*: parámetro de forma. Se indican rumbo y buzamiento de *K₁*, *K₂* y *K₃*.

Table 2: Calculated parameters for the specimens of site II. *Km*: average magnetic susceptibility, *Pj*: corrected anisotropy degree, *T*: shape parameter. Trend and plunge of *K₁*, *K₂* and *K₃* are indicated.

(22%) con maclas polisintéticas. Como componentes accesorios, se encuentran clastos de minerales opacos (3%) y escasos anfíboles. El material ligante está formado por una matriz (10%) de arcillas de color castaño y pátinas de óxidos de hierro localizadas sobre algunos clastos. De acuerdo a los porcentajes modales recalculados, las rocas pueden clasificarse como litoarenitas feldespáticas según la clasificación de *Folk et al.* (1970).

Fábrica magnética

Los resultados obtenidos para el sitio I muestran una distribución bimodal (Tabla 1, 2; Fig. 5a, b), donde la subpoblación 1 presenta un valor de *Km* de $7,05.10^{-4} \pm 2,16.10^{-4}$ SI y un predominio de elipsoides oblatos con grado de anisotropía inferior al 1,5% ($Pj < 1,013$) mientras que la subpoblación 2 evidencia valores de *Km* de $6,07.10^{-3} \pm 1,39.10^{-3}$ SI y elipsoides oblatos con grado de anisotropía entre 2 y 3%, si bien algunos especímenes muestran valores de hasta 5% ($Pj < 1,05$). Los valores obtenidos sugieren un control de la susceptibilidad por fases ferro- y paramagnéticas para la subpoblación 1, mientras que la segunda estaría controlada sólo por minerales ferromagnéticos, de acuerdo a

los criterios definidos por Hrouda (2010). Existe una correlación positiva incipiente entre los parámetros P_j y T en la subpoblación 2 (Fig. 5a) y, a su vez, el gráfico de la Figura 5b define una relación similar entre el grado de anisotropía corregido y la susceptibilidad media para dicha subpoblación. Dos especímenes muestran un comportamiento anómalo ya que se separan del resto de los datos en ambos gráficos y no siguen las distribuciones generales (Fig. 5a, b) pues presentan el mayor grado de anisotropía dentro de las formas oblatas.

Por otra parte, los parámetros magnéticos determinados para el sitio II muestran mayor homogeneidad en sus valores respecto de los obtenidos en el sitio I (Fig. 5c, d). La susceptibilidad media presenta un valor medio de $8,00 \cdot 10^{-3} \pm 0,84 \cdot 10^{-3}$ SI y existen elipsoides tanto oblatos como prolados aunque los primeros son más frecuentes. La relación entre P_j y T muestra un bajo grado de dispersión en los datos, aunque puede sugerirse una incipiente correlación positiva entre ambas variables (Fig. 5c). El grado de anisotropía corregido medio es inferior al 2% ($P_j < 1,02$) en todos los casos, a la vez que éste no se modifica conforme varía la susceptibilidad media (Fig. 5d).

La distribución de los ejes de susceptibilidad magnética refleja la presencia de elipsoides triaxiales en todos los casos (Tarling y Hrouda, 1993). Las subpoblaciones definidas para el sitio I no muestran diferencias significativas entre sí en la orientación de los ejes del elipsoide de ASM. $K1$ y $K2$ se ubican en un plano paralelo a la estratificación y presentan rumbo NNO y SO, respectivamente, mientras que $K3$ coincide con el polo del plano de estratificación (Fig. 6a). Por otra parte, los resultados en el sitio II evidencian que $K3$ y $K1$ son subhorizontales y de rumbo E y N, respectivamente, y $K2$ es subvertical (Fig. 6c).

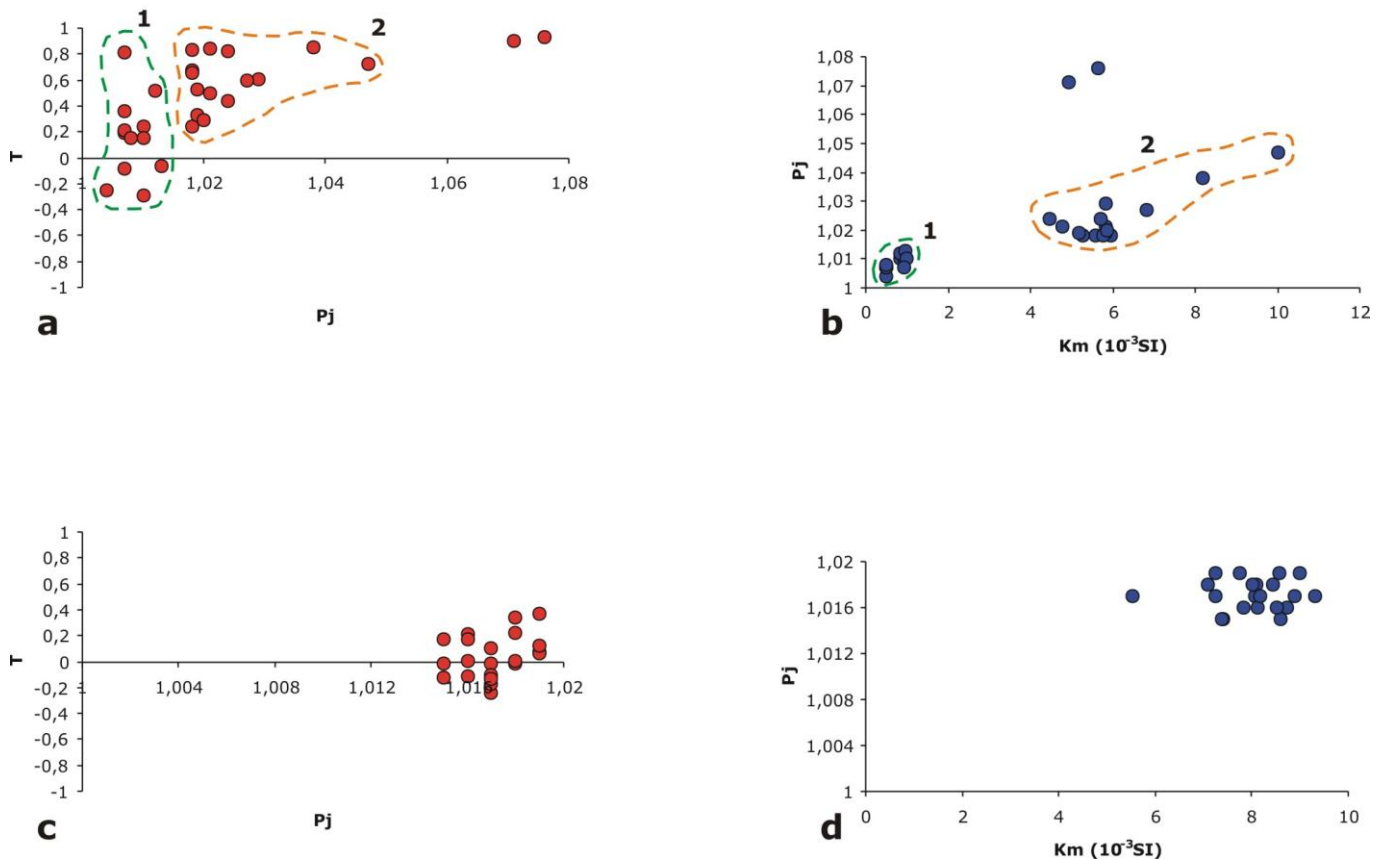


Fig. 5: Diagramas binarios P_j vs T y K_m vs P_j para los sitios I (a, b) y II (c, d). Las líneas punteadas de trazos naranja y verde indican las subpoblaciones definidas para el sitio I (verde: 1, naranja: 2). $T > 0$: elipsoides oblatos, $T < 0$: elipsoides prolados.

Fig. 5: Binary diagrams P_j vs T y K_m vs P_j for the sites I (a, b) and II (c, d). Orange and green dotted lines indicate the subpopulations defined for the site I (green: 1, orange: 2). $T > 0$: oblate ellipsoids, $T < 0$: prolate ellipsoids.

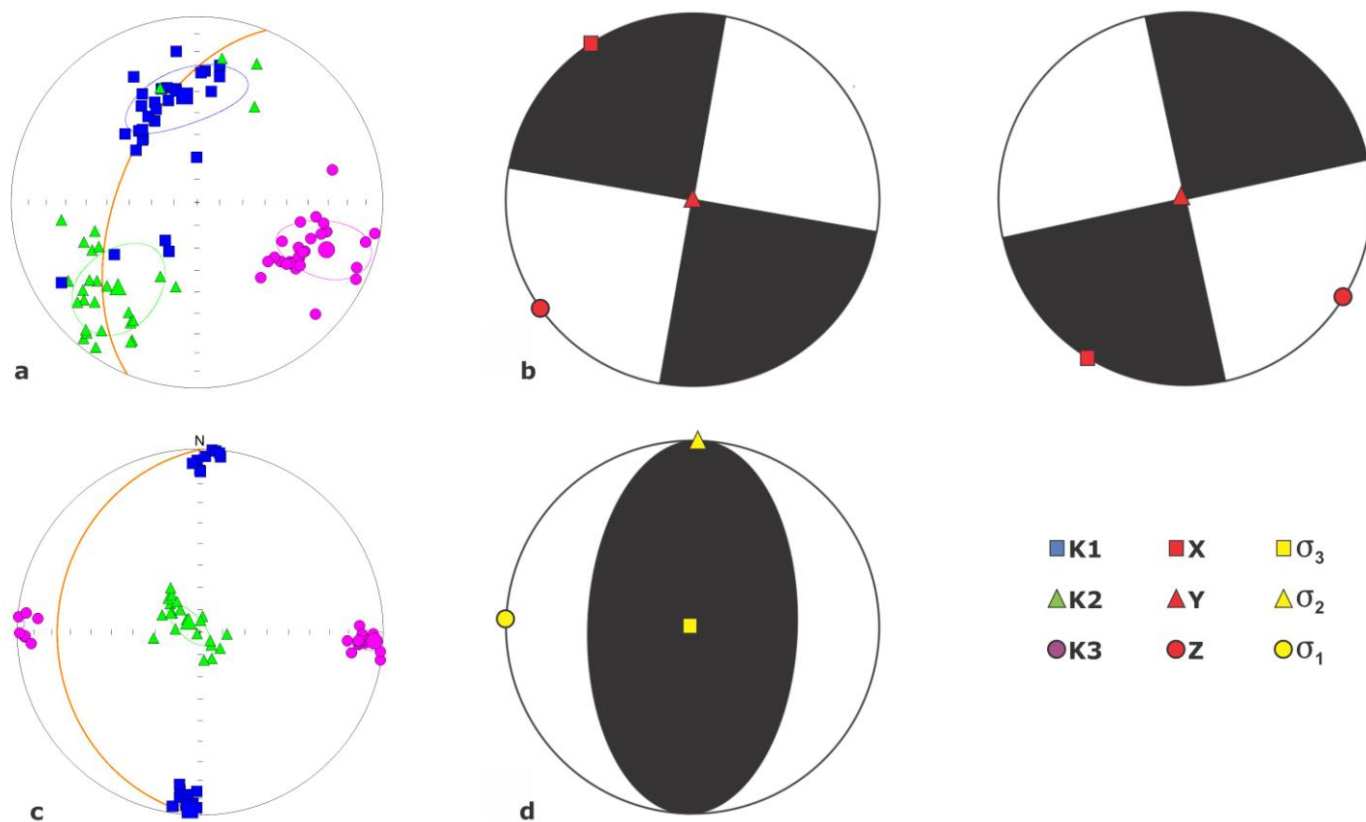


Fig. 6: Proyección estereográfica en el hemisferio inferior de los ejes principales de ASM ($K1$, $K2$ y $K3$) y sus elipses de confianza al 95%. Se indica el plano de estratificación (línea naranja). a) Sitio I ($n=29$). b) Diagrama esquemático basado en datos obtenidos a partir de indicadores cinemáticos por Oriolo *et al.* (2014) en la sierra de la Mina. c) Sitio II ($n=21$). d) Diagrama esquemático basado en datos obtenidos a partir de indicadores cinemáticos por Siame *et al.* (2005) en la quebrada de la Burra.

Fig. 6: Lower hemisphere stereographic projection of the AMS axes ($K1$, $K2$ and $K3$) and their 95% confidence ellipses. Stratification plane is indicated (orange line). a) Site I ($n=29$). b) Schematic diagram based on data obtained through kinematic indicators by Oriolo *et al.* (2014) in the sierra de la Mina. c) Site II ($n=21$). d) Schematic diagram based on data obtained through kinematic indicators by Siame *et al.* (2005) in the quebrada de la Burra.

DISCUSIÓN

Relación entre fábrica magnética y deformación

Los estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética en la sierra de la Mina (sitio I) reflejan la presencia de dos subpoblaciones de acuerdo a variaciones en los valores de susceptibilidad media y grado de anisotropía corregido (Fig. 5b). Ambas presentan elipsoides triaxiales de acuerdo al agrupamiento de los ejes (Tarling y Hrouda, 1993), donde $K1$ y $K2$ se ubican en un plano paralelo a la estratificación y $K3$, perpendicular a este último. Estas evidencias sugieren una fábrica magnética compuesta equivalente al estadio inicial de deformación propuesto por Parés *et al.* (1999), lo cual es consistente con el bajo grado de anisotropía obtenido (Fig. 5). Esto se verifica a partir de las observaciones petrográficas, ya que las rocas analizadas preservan la laminación horizontal bien definida y no presentan evidencias de desarrollo de clivaje (Fig. 4a), por lo que el acortamiento debió ser inferior al 10–20% (Engelder y Geiser, 1979; Barker, 1998). Algunos especímenes muestran en conjunto una distribución irregular de $K1$ y $K2$ en un plano paralelo a la estratificación que podría representar la fábrica sedimentaria no deformada (Fig. 7a).

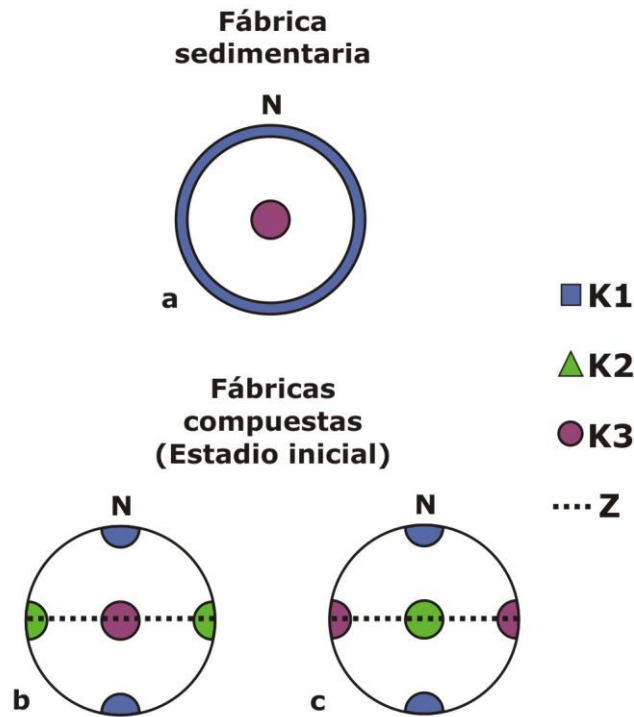


Fig. 7: Ejes teóricos de ASM ($K1$: azul, $K2$: verde, $K3$: lila) para fábricas sedimentarias (a) y compuestas (b, c), donde el eje de acortamiento máximo Z es horizontal y de rumbo E-O. a) Magnetofábrica generada a partir de una fábrica sedimentaria, donde el plano de estratificación es horizontal ($K1$ y $K2$ se distribuyen aleatoriamente en el plano horizontal). b) Estadio inicial en el desarrollo de una fábrica magnética compuesta según Parés *et al.* (1999) y Mallik *et al.* (2009), entre otros. c) Estadio inicial en el desarrollo de una fábrica magnética compuesta según Borradaile y Henry (1997).

Fig. 7: AMS theoretical axes ($K1$: blue, $K2$: green, $K3$: lila) for sedimentary (a) and composite fabrics (b, c), where the maximum shortening axis Z is subhorizontal and strikes E-O. a) Magnetofabric related to a sedimentary fabric with a horizontal bedding plane ($K1$ and $K2$ are randomly distributed within this horizontal plane). b) Initial stage in the development of the composite magnetic fabrics according to Parés *et al.* (1999) and Mallik *et al.* (2009), among others. c) Initial stage in the development of the composite magnetic fabrics according to Borradaile and Henry (1997).

La posición de $K1$, $K2$ y $K3$ es equivalente en ambas subpoblaciones. $K1$ y $K2$ pueden interpretarse como la consecuencia de la superposición de los campos cinemáticos definidos por Oriolo *et al.* (2014) en la sierra de la Mina (Fig. 6b). En contraposición, $K3$ presenta una orientación de origen sedimentario.

Por otra parte, los resultados de fábrica magnética obtenidos en la quebrada de la Burra (sitio II) muestran también evidencias de deformación incipiente definida por elipsoides triaxiales con grado de anisotropía muy bajo consistentes con los propuestos por Borradaile y Henry (1997). Al igual que en el sitio I, no existen evidencias de deformación microscópica ni desarrollo de clivaje (Fig. 4b), lo cual ratifica una fábrica compuesta como resultado de la superposición de procesos primarios y tectónicos.

Los elipsoides de ASM obtenidos en el sitio II pueden ser comparados con los datos obtenidos por Siame *et al.* (2005) en la quebrada de la Burra. Se observa entonces que $K3$ es paralelo al eje de compresión, subhorizontal de rumbo E, definido por estos autores (Fig. 6d). Asimismo, existe una ligera diferencia entre la posición del plano de estratificación y el plano que contiene a $K1$ y $K3$, que podría explicarse a partir de una componente de deformación no coaxial impuesta por cizalla intraestratal. En este sitio, puede verse también que los ejes $K1$ y $K2$ son paralelos a los ejes intermedio y mínimo, respectivamente.

Evolución de fábricas magnéticas compuestas

Al comparar los datos de los dos sitios, puede verse que ninguno de los dos muestra una fábrica magnética de origen únicamente sedimentario, donde $K3$ se ubicaría en una dirección perpendicular al plano de estratificación y $K1$ y $K2$ presentarían una distribución en guirnalda dentro de dicho plano (Fig. 7a). A su vez, existe una diferencia notable

entre ambos, dada por la correlación de los ejes del elipsoide de ASM con los ejes de deformación y esfuerzo respectivos obtenidos a partir de datos cinemáticos. En el sitio I, *K3* se encuentra perpendicular al plano de estratificación, por lo que se interpreta como producto de la fábrica sedimentaria, mientras que para el sitio II dicho eje se ubica muy próximo al plano de estratificación y coincide aproximadamente con el eje de acortamiento definido por Siame *et al.* (2005). Por lo tanto, las fábricas de ASM reflejarían dos posibles resultados de la modificación incipiente de la fábrica magnética primaria ante la acción de esfuerzos tectónicos (Fig. 7b y c). La primera modificación posible que sufriría la fábrica magnética sería el reordenamiento de los ejes de ASM, de modo que *K2* coincidiría con el eje de acortamiento *Z*. Esta situación puede reconocerse en los resultados obtenidos en el sitio I y coincide con los estadios iniciales de la evolución de fábricas compuestas propuestos por Parés *et al.* (1999) y Mallik *et al.* (2009), entre otros (Fig. 7b). En el segundo caso, se obtendrían elipsoides triaxiales donde *K3* se orienta de forma paralela al eje *Z* (Borradaile y Henry, 1997, Fig. 7c), tal como se observa en el sitio II.

Las diferencias en las fábricas magnéticas reconocidas en las areniscas de la Fm. Cuculí podrían explicarse a partir de diferencias en la deformación experimentada por las rocas en ambas localidades, o bien, de la fábrica sedimentaria. En este sentido, las unidades muestreadas en el primer sitio presentan laminación horizontal bien desarrollada mientras que, en el segundo, la estructura es masiva, si bien todas corresponden a litoarenitas con similares características petrográficas. Por lo tanto, podría interpretarse que esta última secuencia sería más sensible a registrar la impronta tectónica que la secuencia que muestra una fábrica planar primaria subhorizontal del sitio I, por lo que registraría más tempranamente la orientación de *K3* de origen tectónico.

CONCLUSIONES

A partir de los datos preliminares presentados en este trabajo, pudo comprobarse la existencia de fábricas magnéticas compuestas en las sedimentitas de la Formación Cuculí. Éstas son el producto de deformación incipiente, la cual no es reconocible a escala meso- o microscópica. Se interpreta también que la fábrica sedimentaria constituye uno de los posibles controles en el desarrollo inicial de fábricas magnéticas compuestas y, por lo tanto, la presencia de una fábrica sedimentaria penetrativa dificulta la determinación de los ejes de deformación interna finita a través de ASM en rocas poco deformadas. Estas propuestas serán ampliadas en futuros trabajos complementarios que permitan discutir las hipótesis aquí planteadas.

Agradecimientos: los autores desean agradecer a los proyectos UBACyT20020120200157 (G. H. Ré), PIP CONICET 11420100100334 (M. S. Japas) y UBACyT 20020100100855 (E. O. Cristallini). Se desea agradecer a Rubén Somoza por las observaciones en una versión preliminar de este trabajo, así como también a Claudia Prezzi por el manejo editorial, y a Fernando Hongn y a un árbitro anónimo por las correcciones y sugerencias que ayudaron a mejorar notablemente este trabajo.

REFERENCIAS

- Allmendinger, R.W., D. Figueroa, D. Snyder, J. Beer, C. Mpodozis, B.L. Isacks, 1990. Foreland shortening and crustal balancing in the Andes at 30°S latitude. *Tectonics* 9(4): 789-809.
- Baldis, B.A., G.A. Chebli, 1969. Estructura profunda del área central de la Precordillera sanjuanina. 4º Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 1: 47-65.
- Barker, A.J., 1998. Introduction to metamorphic textures and microstructures, Second Edition. Chapman & Hall, pp 244.
- Borradaile, G.J., B. Henry, 1997. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth Science Reviews* 42: 49-93.
- Cristallini, E.O., V.A. Ramos, 2000. Thick-skinned and thin-skinned thrusting in La Ramada fold and thrust belt: Crustal evolution of the High Andes of San Juan, Argentina (32° SL). *Tectonophysics* 317: 205-235.
- Cuerda, A.J., G. Furque, 1981. Depósitos carbónicos de la Precordillera de San Juan, Parte I, Comarca del Cerro La Chilca (Río Francia). *Revista Asociación Geológica Argentina* 36(2): 187-196.
- Engelder, T., P. Geiser, 1979. The relationship between pencil cleavage and lateral shortening within the Devonian section of the Appalachian Plateau, New York. *Geology* 7: 460-464.
- Fazzito, S.Y. 2011. Estudios geofísicos aplicados a la geotectónica de la falla El Tigre, Precordillera de San Juan. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, pp 277.
- Fazzito, S.Y., A.E. Rapalini, J.M. Cortés, C.M. Terrizzano, 2011. Kinematic study in the area of the Quaternary oblique-slip El Tigre fault, eastern Precordillera, Argentina, on the basis of paleomagnetism and anisotropy of magnetic susceptibility. *Latinmag Letters, Proceedings* 1(B24).

- Folk, R.L., P.B. Andrews, D.W. Lewis, 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zeland. *New Zeland Journal of Geology and Geophysics* 13: 937–968.
- Furque, G., 1963. Descripción Geológica de la Hoja 17b–Guandacol. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 92, pp 72.
- Furque, G., 1983. Descripción Geológica de la Hoja 19c–Ciénaga de Gualilán. Servicio Geológico Nacional, Boletín 193, pp 111.
- Furque, G., P. González, M. Caballé, L. Pérez, R. Cardó, M. Godeas, A. Conde, J.C. Pucci, 2003. Hoja Geológica 3169–II, San José de Jachal. Provincias de San Juan y La Rioja. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 259, pp 76.
- Goddu, S.R., E. Appel, P. Gautam, E.A. Oches, F. Wehland, 2007. The lacustrine section at Lukundol, Kathmandu basin, Nepal: Dating and magnetic fabric aspects. *Journal of Asian Earth Sciences* 30(1): 73– 81.
- Hirt, A.M., K.F. Evans, T. Engelder, 1995. Correlation between magnetic anisotropy and fabric for Devonian shales on the Appalachian Plateau. *Tectonophysics* 247: 121–132.
- Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Surveys* 5: 37–82.
- Hrouda, F., 2010. Modelling relationship between bulk susceptibility and AMS in rocks consisting of two magnetic fractions represented by ferromagnetic and paramagnetic minerals—Implications for understanding magnetic fabrics in deformed rocks. *Journal of the Geological Society of India* 70(1): 254–266.
- Hrouda, F., F. Janák, 1971. A study of the hematite fabric of some red sediments on the basis of their magnetic susceptibility anisotropy. *Sedimentary Geology* 6: 187–199.
- Hrouda, F., Z. Stráník, 1985. The magnetic fabric of the Zdánice thrust sheet of the Flysch Belt of the West Carpathians: sedimentological and tectonic implications. *Sedimentary Geology* 45: 125–145.
- Janák, F., 1965. Determination of anisotropy of magnetic susceptibility of rocks. *Studia Geophysica et Geodatia* 9: 290–301.
- Jelinek, V., 1978. Statistical processing of magnetic susceptibility measured in groups of specimens. *Studia Geophysica et Geodatia* 22: 50–62.
- Jelinek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics* 79: 63–67.
- Johnson, N.M., T.E. Jordan, P.E. Johnsson, C.W. Naeser, 1986. Magnetic polarity stratigraphy, age and tectonic setting of fluvial sediments in an eastern Andean foreland basin, San Juan Province, Argentina. En: *Foreland basins*. Allen, P.E., P. Homewood (Ed). International Association of Sedimentologists Series 8. 63–75.
- Jordan, T., J. Damanti, 1990. Estudios paleogeográficos de cuencas neogénicas, San Juan, Argentina. 11º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 247–250.
- Jordan, T., P. Ruttý, L. Mc Rae, J. Beer, K. Tabbutt, T. Damanti, 1990. Magnetic polarity of the Miocene Río Azul section, Precordillera thrust belt, San Juan Province, Argentina. *Journal of Geology* 98: 519–539.
- Jordan, T.E., R.W. Allmendinger, J.F. Damanti, R.E. Drake, 1993. Chronology of motion in a complete thrust belt: the Precordillera, 30– 31°S, Andes Mountains. *Journal of Geology* 101: 135–156.
- Kissel, C., E. Barrier, C. Laj, T.Q. Lee, 1986. Magnetic fabric in “undeformed” marine clays from compressional zones. *Tectonics* 5: 769–781.
- Lee, T.Q., C. Kissel, C. Laj, C.S. Horng, Y.T. Lue, 1990. Magnetic fabric analysis of the Plio–Pleistocene sedimentary formations of the Coastal Range of Taiwan. *Earth and Planetary Science Letters* 98: 23– 32.
- Luo, L., D. Jia, H. Li, Y. Li, F. Deng, Z. Chen, Q. Jia, S. Sun, Y. Zhang, 2009. Magnetic fabric investigation in the northwestern Sichuan Basin and its regional inference. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 173: 103–114.
- Mallik, J., G. Mathew, R.O. Greiling, 2009. Magnetic fabric variations along the fault related anticlines of Eastern Kachchh, Western India. *Tectonophysics* 473: 428–445.
- Mattei, M., L. Sagnotti, C. Faccenna, R. Funiciello, 1997. Magnetic fabric of weakly deformed clay–rich sediments in the Italian peninsula: Relationship with compressional and extensional tectonics. *Tectonophysics* 271: 107–122.
- Meissl, S., J.H. Behrmann, C. Franke, 2011. Magnetic fabrics in Quaternary sediments, Ursa Basin, northern Gulf of Mexico record transport process, compaction and submarine slumping. *Marine Geology* 286(1–4): 51–64.
- Milana, J.P., F. Bercowski, T. Jordan, 2003. Paleoambientes y magnetoestratigrafía del Neógeno de la Sierra de Mogna, y su relación con la Cuenca de Antepaís Andina. *Revista Asociación Geológica Argentina* 58(3): 447–473.
- Nagata, T., 1961. *Rock Magnetism*, Second Edition. Maruzen, pp 350.
- NASA Landsat Program, 2003. Landsat ETM+ scene p232r081_7dx20001119, Surface Reflectance, GLCF, Argentina, 19/11/2000.
- Oliva–Urcía, B., J.C. Larrasoaña, E.L. Pueyo, A. Gil, P. Mata, J.M. Parés, A.M. Schleicher, O. Pueyo, 2009. Disentangling magnetic subfabrics and their link to deformation processes in cleaved sedimentary rocks from the Internal Sierras (west central Pyrenees, Spain). *Journal of Structural Geology* 31 (2): 163–176.

- Oliva-Urcía, B., T. Román-Berdiel, A.M. Casas, E.L. Pueyo, C. Osácar, 2010. Tertiary compressional overprint on Aptian–Albian extensional magnetic fabrics, North–Pyrenean Zone. *Journal of Structural Geology* 32 (3): 362–376.
- Oriolo, S., 2012. Análisis de la deformación en la región de Hualilán, Precordillera de San Juan. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires, pp 160.
- Oriolo, S., E.O. Cristallini, M.S. Japas, M. Giménez, 2014. Cross–strike structures controlling magmatism emplacement in a flat–slab setting (Precordillera, Central Andes of Argentina). En: Llana–Fúnez, S., A. Marcos, S. Bastida (ed) *Deformation Structures and Processes within the Continental Crust*. Geological Society of London, Special Publications 394: 113–127.
- Ortiz, A., J.J. Zambrano, 1981. La provincia geológica Precordillera Oriental. 8º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 59-74.
- Parés, J.M., B.A. van der Pluijm, J. Dinarès–Turell, 1999. Evolution of magnetic fabrics during incipient deformation of mudrocks (Pyrenees, northern Spain). *Tectonophysics* 307: 1–14.
- Park, C.K., S.J. Doh, D.W. Suk, K.H. Kim, 2000. Sedimentary fabric on deep–sea sediments from KODOS area in the eastern Pacific. *Marine Geology* 171 (1–4): 115–126.
- Sagnotti, L., F. Speranza, 1993. Magnetic fabric analysis of the Plio– Pleistocene clayey units of the Sant’ Arcangelo basin, southern Italy. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 77: 165–176.
- Sagnotti, L., F. Speranza, A. Winkler, M. Mattei, R. Funiciello, 1998. Magnetic fabric of clay sediments from the external northern Apennines (Italy). *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 105: 73–93.
- Scheepers, P.J.J., C.G. Langereis, 1994. Magnetic fabric of Pleistocene clays from the Thyrrenian Arc: a magnetic lineation induced in the final stage of the middle Pleistocene compressive event. *Tectonics* 13: 1190–1200.
- Siame, L.L., O. Bellier, M. Sebrier, M. Araujo, 2005. Deformation partitioning in flat subduction setting: Case of the Andean foreland of western Argentina (28°S–33°S). *Tectonics* 24. doi: 10.1029/2005TC001787
- Soto, R., J.C. Larrasoaña, L.E. Arlegui, E. Beamud, B. Oliva–Urcía, J.L. Simón, 2009. Reliability of magnetic fabric of weakly deformed mudrocks as a palaeostress indicator in compressive settings. *Journal of Structural Geology* 31: 512–522.
- Tarling, D.H., F. Hrouda, 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman & Hall, pp 212.
- Tauxe, L., 2002. *Paleomagnetic Principles and Practice*. Modern Approaches in Geophysics Series Volume 18. Kluwer Academic Publishers, pp 299.
- Terrizzano, C.M., J.M. Cortés, S.Y. Fazzito, A.E. Rapalini, 2011. Análisis de fábricas magnéticas aplicado al estudio de la deformación neotectónica en la Precordillera de Cuyo. *Latinmag Letters, Proceedings* 1(B27).

Recibido: 19-11-2013
Aceptado: 01-07-2014