

# Petrofábricas magnéticas relacionadas a la deformación sin-tectónica del complejo de diques en el Plutón Cerro Varillas, norte de Chile

Pablo Gutiérrez<sup>1\*</sup>, Eugenio E. Veloso<sup>1</sup> y Rodrigo González<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

\* E-mail: [pgn001@ucn.cl](mailto:pgn001@ucn.cl)

**Abstract.** Among the different igneous products that conform the Coastal Cordillera in Northern Chile, the Cerro Varilla pluton (PCV, 154±6 Ma), located ca. 40km south of the city of Antofagasta, holds a folded dike swarm of andesitic to dacitic composition. The geometry of the folding and of the contact relations between individual dikes and the host Cerro Varillas pluton suggests that intrusion and deformation of the dike swarm occurred coevally. In order to determine the dynamics of deformation and the emplacement mechanisms of the swarm dike we measured the petrofabric of both the dike swarm and the host Cerro Varillas pluton by means of anisotropy of magnetic susceptibility (ASM). In this contribution, we present preliminary results which help to understand the deformation style of the coastal Cordillera during the late Mesozoic.

**Palabras Claves:** complejo de diques, ASM, propiedades magnéticas, estilo de deformación.

## 1 Introducción

El análisis clásico de diques y complejo de diques se basa principalmente en la observación de la geometría que ellos presentan y de una serie de características morfológicas y texturales asociadas principalmente a las paredes de contacto con la roca de caja (*e.g.* Knight y Walter, 1988; Rickwood, 1990; Correa-Gomez *et al.*, 2001). Diversos estudios han podido estimar las direcciones de flujos utilizando indicadores macroscópicos como la orientación y forma de vesículas y/o, lineaciones en las superficies de contacto de diques, alineamiento preferencial de minerales, entre otros. Las direcciones de flujo así inferidas resultan ser, en la mayoría de las veces, paralelas a la orientación que presentan las lineaciones de susceptibilidad magnética (*e.g.* Knight y Walker, 1988; Varga *et al.*, 1998). De esta forma, la medición de la petro-fábrica por medio de la determinación del tensor de anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) se ha convertido en una poderosa herramienta, permitiendo una determinación rápida y sencilla de la orientación de la petro-fábrica en rocas intrusivas, en especial en rocas que presentan anisotropías macroscópicas débiles y/o escasa o nula presencia de marcadores estructurales macroscópicos (Bouchez *et al.*, 1997).

La presente contribución da a conocer los resultados preliminares obtenidos del análisis de las fábricas

magnéticas del complejo de diques en el Plutón Cerro Varillas (PCV) mediante el uso de ASM. El PCV (Uribe, 1987) presenta un complejo de diques que lo intruye a lo largo de toda su extensión, exhibiendo una peculiar geometría en forma de pliegue. Según Uribe (1987), cualquiera fuese el origen de tal geometría, debería estar condicionada a un control estructural del Sistema de Falla de Atacama durante el Cretácico. Es así como el estudio de

**Figura 1.** Mapa geológico simplificado del Bloque Morfotectónico de Cerro Varillas. Nótese la geometría que presenta el complejo de diques.



los diques deformados permite evaluar su utilización como indicadores de paleo-esfuerzos (*e.g.* Soriano *et al.*, 2007).

## 2 Complejo de diques en el PCV

El PCV es parte de los productos intrusivos que conforman el Bloque Morfotectónico de Cerro Varillas (BMCV) (Fig. 1), ubicado aproximadamente a unos 40 km al sur de Antofagasta, en la actual Cordillera de la Costa. El conjunto de rocas ahí expuestas son evidencia del desarrollo del arco magmático Jurásico-Cretácico inferior (Gonzalez y Niemeyer, 2005). En particular, el PCV está compuesto por rocas plutónicas grises claras equigranulares de grano grueso de composición granodiorítica y tonalítica (con biotita y anfíbol). Además, presenta abundantes xenolitos dioríticos, en ocasiones elongados pero sin un arreglo espacial preferencial

macroscópico identificable. El PVC cubre el extremo oeste y norte del BMCV, presentando una notoria elongación en dirección NNE.

El complejo de diques que intruye al PCV corresponde a cuerpos tabulares con composiciones que varían entre andesitas y dacitas, con texturas porfídicas y afaníticas. En general, se disponen subparalelos entre ellos con manteos hacia el E. La potencia de los diques individuales varía entre 0,5 a 5 m y con expresiones superficiales que superan los 2 km de largo. El contacto con la roca de caja es irregular, presentando estrangulamientos y terminaciones apicales (Uribe, 1987), además de contactos lobulados. La disposición espacial que presenta este complejo dentro del PCV, resaltado por el cambio en sus rumbos a lo largo de su extensión, define una estructura tipo pliegue. Este plegamiento es simétrico respecto a los planes axiales, con longitud de onda cercana a los 5 km y amplitud de hasta 10 km (Uribe, 1987). La forma de esta estructura junto con las relaciones de contacto observadas con la roca de caja, sugiere, probablemente, que la geometría que presenta el complejo de diques es debido a una intrusión bajo algún campo de esfuerzos (cizalle?) que deformó sus trayectorias dentro de un PCV aún en una etapa sin-magnética.

### 3 Metodología

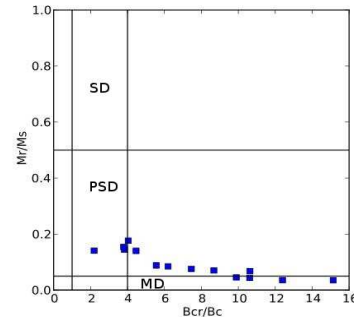
Se obtuvieron bloques orientadas de ambos márgenes en 17 diques con potencias entre 1 a 3 m (34 sitios sumando en total 351 especímenes), en los cuales no se observaron indicadores de procesos de metamorfismo o de alteración. Se escogieron diques que presentaban ambos márgenes expuestos y se evitaron aquellos demasiado potentes para evitar efectos sobre la orientación de la petrofábrica propios de turbulencia al interior del dique durante su emplazamiento (Knight y Walker, 1988; Tauxe *et al.*, 1998, Callot *et al.*, 2001). Los análisis de anisotropía magnética fueron realizados en un equipo *KappaBridge* MFK1-FA bajo un campo de 200 A/m. Por su parte los experimentos de histéresis se realizaron en un magnetómetro AGM2900 en tanto que los termomagnéticos en un módulo CS4 para el *KappaBridge* MFK1-FA con temperaturas entre ca. 25° y 700°C; todos ellos en el Laboratorio de Magnetismo de la Universidad Católica del Norte.

### 4 Resultados preliminares

Mediciones de intensidad de susceptibilidad total ( $K_m$ ) arrojan valores entre  $8,87 \times 10^{-4}$  y  $1,07 \times 10^{-2}$  SI (Tabla 1), lo que sugiere que la señal de ASM está fuertemente controlada por una fase mineral ferromagnética

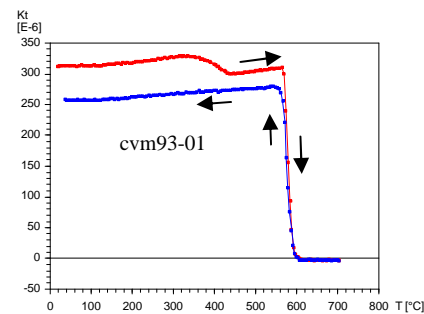
La forma del elipsoide (tensor) de ASM puede ser representado por una serie de parámetros que dan cuenta de las relaciones entre los distintos ejes principales del tensor ( $K_1 > K_2 > K_3$ ) (e.g. Tarling y Hrouda, 1993; Jelinek, 1981). Así, el grado de anisotropía corregida ( $P'$ ) presenta

valores menores a 1,082 en todos los sitios. La única excepción se observa en el sitio CVM115, con valores de hasta 1,263. La variable de forma ( $T$ ) presenta cerca de un 90% de valores positivos, lo que indica que las fábricas de ASM de los diques son mayoritariamente oblatas. Excepciones corresponden a 3 muestras que presentan valores negativos indicando una fábrica de ASM prolata.



**Figura 2.** Relación entre tamaños magnéticos y razones entre propiedades magnéticas inducidas (e.g. Day *et al.*, 1977). SD: “Single Domain”; PSD: “Pseudo-Single Domain”; MD: “Multiple Domain” (Tomado de Day *et al.*, 1977).

Los razones entre propiedades magnéticas inducidas, determinadas por medio de experimentos de histéresis, permiten determinar el tamaño magnético de las fases ferromagnéticas presentes (Day *et al.*, 1977), y con ello establecer si es que las fábricas de ASM medidas son de carácter normal o inverso (Rochette *et al.*, 1991). Las razones determinadas indican que la mayoría de los diques analizados contienen fases mineralógicas de multi-dominio (MD) y pseudo-dominio simple (PSD) (Fig. 2), lo cual implica que las fábricas de ASM medidas corresponden a fábricas normales (i.e. la petrofábrica es subparalela a la fábrica de ASM).



**Figura 3.** Curva de susceptibilidad ( $K$ ) vs. Temperatura.

Experimentos termo-magnéticos en atmósfera de aire muestran temperaturas de Curie entre los 556° y 568°C (Fig. 3), indicando presencia de la titanomagnetita (ca. 10% de Titanio; Nagata, 1961) como único componente magnético principal y controlador de la señal de ASM. Esto, sin embargo, debe ser corroborado mediante un estudio petrográfico (preferentemente SEM) para determinar las texturas de estas fases mineralógicas, tanto su composición como sus tamaños, debido a la probabilidad de que alguna pequeña contribución de tamaño super-paramagnético esté presente (e.g. Dunlop,

2002).

Las orientaciones de los ejes principales de ASM medidos para los distintos sitios se muestran en la Tabla 1. Todos los diques presentan los ejes de susceptibilidad  $K_1$  y  $K_2$  subparalelos a su rumbo, y sus ejes  $K_3$  perpendiculares. Sin embargo, al comparar los bordes opuestos en un mismo dique se observa una notoria asimetría entre ambas orientaciones de los  $K_1$ , respecto al plano de simetría del dique (e.g. Knight and Walker, 1988; Geoffroy *et al.*, 2002). De esta forma, asumiendo que la distribución de los ejes máximos de susceptibilidad es inicialmente simétrica (Correa-Gomez *et al.*, 2001, Soriano *et al.*, 2007), la asimetría observada indicaría una intrusión bajo un campo de esfuerzo (cizalle?), el cual habría producido la rotación de los ejes de susceptibilidad en el sentido de cizalle impuesto. Así, mediante el análisis de la asimetría obtenida por los análisis de ASM es posible determinar el sentido de cizalle sobre impuesto en las paredes de los diques durante su emplazamiento (post-emplazamiento?) y con ello inferir si el campo de esfuerzos que generó tal cizallamiento fue el responsable de la deformación del complejo de diques. No obstante, otro tipo de mediciones se están llevando a cabo para complementar la interpretación de AMS, tales como anisotropía de remanencia magnética (AARM) y la obtención del vector de remanencia magnética natural característico (NRM).

Lo anteriormente expuesto apunta a determinar el estilo de deformación que afectó al BMCV en su conjunto durante el desarrollo del arco magmático Jurásico-Cretácico inferior. Creemos que el estudio tanto de la petrofábricas magnéticas como de las propiedades magnéticas de las rocas que lo conforman, nos entregará información relevante a cerca de los campos de esfuerzos que dieron lugar a dicha deformación.

## Referencias

Bouchez, J.L. 1997. Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies of granitic rocks. In Bouchez, J.L., Hutton, D.H.W., Stephens, W.E. (Editores), Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics, 95–112.  
 Callot, J.; Geoffroy, L.; Aubourg, C.; Pozzi, J.; Mege, D. 2001.

Magma flow direction of shallow dikes from the East Greenland margin inferred from magnetic fabric studies. *Tectonophysics*, 335: 313-329

Correa-Gomez, L.C.; Souza Filho C.R.; Martins C.J.F.N.; Oliveira E.P. 2001. Development of symmetrical and asymmetrical fabrics in sheet-like igneous bodies: the role of magma flow and wall-rock displacements in theoretical and natural cases. *Journal of Structural Geology*, 23: 1415-1428.  
 Day, R.; Fuller, M.; Schmidt, V.A. 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and compositional dependence. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 13: 260-267.  
 Dunlop, D. 2002. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc). Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research*, 107:  
 Geoffroy, L.; Callot, J.P.; Aubourg, C.; Moreira, M. 2002. Magnetic and plagioclase linear fabric discrepancy in dykes: a new way to define the flow vector using magnetic foliation. *Terra Nova*, 14: 183-190.  
 González, G.; Niemeyer, H. 2003. Geología de la Hoja Antofagasta, región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geológica Básica. Escala 1:100.000. Santiago.  
 Jelinek, V. 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79: T63-T67.  
 Knight, M.; Walker, G. 1988. Magma flow direction in dykes of the Koolau complex, Oahu, determined from magnetic fabric studies. *Journal of Geophysical Research*, 93: 4301–4319.  
 Nagata, T. 1961. Rock Magnetism. Maruzen, 225 p. Tokyo.  
 Rickwood, P. 1990. The anatomy of a dyke and the determination of propagation and magma flow directions. In: Mafic Dykes and Emplacement Mechanisms; proceedings of the Second international dyke conference, Adelaide, South Australia, Parker, A.J.; Rickwood, P.C. and Tucker, D.H. (Editores), vol. 2: 81–100.  
 Soriano, C.; Beamud, E.; Garcés, M. 2007. Dike intrusion under shear stress: effects on magnetic and vesicle fabrics in dikes from rift zones of Tenerife (Canary Islands). *Journal of structural Geology*, 29: 1931-1942.  
 Tarling, D.; Hrouda, F. 1993. The magnetic anisotropy of rocks. Chapman & Hall, 217 p., London.  
 Tauxe, L.; Gee, J.S.; Staudigel, H. 1998. Flow direction in dikes from anisotropy of magnetic susceptibility data: the bootstrap way. *Journal of Geophysical Research*, 103: 17.775–17.790.  
 Uribe, F. 1987. Emplazamiento sintectónico del Plutón Cerro Varillas con transcurricencia en el Cretácico inferior de la Zona de Falla de Atacama, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 31: 101-106.  
 Varga, R.J.; Gee, J.S.; Staudigel, H.; Tauxe, L. 1998. Dykes surface lineation as magma flow indicators within the sheeted dyke complex of the Troodos ophiolite, Cyprus. *Journal of Geophysical Research*, 103: 5241–5256.

**Tabla 1.** Orientaciones de los ejes principales de ASM.

Sitio	n	Km (SI)	$K_1$		Confidencia $K_1$		$K_2$		Confidencia $K_2$		$K_3$		Confidencia $K_3$		L	F	P	P'	T
			D	I	95%	D	I	95%	D	I	95%								
CVM70.01	9	2.43E-03	225	60.7	6.6	3	99.1	18.2	6.3	1.4	1.4	22.1	3.7	1.3	1.007	1.032	1.004	1.042	0.63
CVM70.03	11	4.48E-03	110.1	53.8	10.9	2.2	263.2	33.2	10.9	2.9	1.9	12.9	3.4	1.6	1.005	1.037	1.043	1.047	0.746
CVM86.01	13	1.93E-02	11.1	38.9	5.6	1.3	118.3	20.1	5.8	3.4	229.2	44.3	3.9	1.2	1.015	1.065	1.081	1.086	0.623
CVM86.02	10	1.68E-02	10.7	41	34.2	2.2	122.9	23.5	34.2	2.8	234.1	39.9	3.5	1.2	1.002	1.066	1.068	1.078	0.947
CVM87.02	13	1.07E-02	282.5	5.5	7.2	2.2	188.5	36	7.2	2.8	20	53.4	4.6	1.7	1.006	1.026	1.033	1.035	0.629
CVM87.03	12	6.34E-03	111	34.6	9.8	1.9	319.6	51.8	10	2.1	211	14.1	3	2	1.009	1.031	1.04	1.042	0.549
CVM88.01	7	9.12E-03	152.9	14.1	17.7	1.8	44.7	51.2	17.8	2.7	253.1	35.3	2.9	1.8	1.004	1.037	1.04	1.045	0.82
CVM88.02	11	9.21E-03	322.1	75	16.1	3.5	109.2	12.7	16.3	1.7	201	7.9	3.7	3.2	1.009	1.037	1.046	1.049	0.618
CVM89.01	7	8.73E-03	209.9	71.5	6.6	2.8	12.1	17.7	7.9	4.5	103.8	5.3	8.3	2.4	1.014	1.024	1.038	1.039	0.281
CVM89.02	9	7.01E-03	218	35.8	10.6	4.1	35	54.1	52.1	8.8	127	1.4	52.1	5.5	1.012	1.001	1.013	1.015	-0.793
CVM91.01	10	9.76E-03	83.5	59.9	5.7	2.1	338.1	8.7	5.7	1.2	243.3	28.6	2.1	1.1	1.008	1.057	1.065	1.071	0.745
CVM91.02	14	1.77E-02	64	53.8	8.7	2.2	310.2	16.4	7.1	4.6	210	31.2	6.2	4.4	1.021	1.037	1.058	1.059	0.274
CVM92.01	12	1.57E-02	18.9	37.2	12.4	3.9	141.2	35.1	13	5.7	258.8	33.4	7.6	2.4	1.013	1.068	1.082	1.088	0.665
CVM92.02	14	1.67E-02	357.1	0.2	21.5	4.5	87.3	55.7	21.7	4.1	266.9	34.3	5.5	4.4	1.004	1.066	1.07	1.079	0.873
CVM93.01	12	1.74E-02	194.2	9.5	3.5	2.3	85.6	62.3	4	2.2	288.9	25.8	3.7	2	1.037	1.051	1.089	1.09	0.157
CVM93.02	10	1.54E-02	189.6	0.6	6.6	1.5	280.7	62.1	31.2	1.8	99.3	27.9	30.8	1.5	1.035	1.03	1.065	1.065	-0.074
CVM94.01	12	7.83E-03	21.5	62.4	11.3	4.1	182	26.2	11.3	2.5	275.9	8	4.5	2.5	1.014	1.037	1.051	1.053	0.451
CVM94.02	13	1.53E-02	135	56.6	10.7	3.2	287.2	30.2	10.7	7.9	24.8	12.8	8.4	2	1.01	1.049	1.06	1.064	0.645
CVM96.01	12	5.21E-03	356	3.3	23.2	5.7	88.3	33.7	23.3	6.9	261.1	56.1	8	5.8	1.002	1.009	1.011	1.012	0.63
CVM96.02	12	8.87E-04	170.6	16.5	6	2.1	56.4	54.2	7.3	3.7	270.7	30.8	5.7	2	1.002	1.005	1.007	1.007	0.444
CVM103.01	6	2.39E-03	22.3	59.5	3.9	2.9	146.7	18.4	6.9	2.1	245	23.4	7.2	2.7	1.006	1.021	1.027	1.028	0.52
CVM103.02	10	4.14E-03	45.5	43.9	8.7	4	143.5	8.3	10	4.4	241.9	44.9	6.8	4	1.01	1.022	1.033	1.033	0.352
CVM106.01	7	1.31E-02	321.6	66.6	5	2.4	134.4	23.2	5.9	2.4	225.5	2.6	7.2	2.6	1.03	1.086	1.119	1.124	0.467
CVM106.02	9	1.28E-02	350.5	57.4	5.5	2	139.7	28.8	5.9	2	237.6	14	3	2	1.022	1.079	1.102	1.108	0.558
CVM108.01	9	7.65E-03	124.9	71	2.7	1.9	225.3	3.6	6.7	2.1	316.6	18.6	6.8	2.1	1.016	1.014	1.03	1.03	-0.099
CVM108.02	8	1.36E-02	146.2	53.8	8.9	3.6	40.2	11.5	9.2	2.5	302.3	33.8	4.5	2.2	1.013	1.025	1.038	1.039	0.202
CVM115.04	9	1.44E-02	331.9	7.8	10	1.8	254.5	43.6	8.6	5.2	89.9	45.3	6.6	4.8	1.054	1.119	1.18	1.184	0.358
CVM115.05	8	1.36E-02	354.4	45	9.2	1.1	230.6	29.2	3.7	2.9	121.1	30.9	8.6	3.1	1.088	1.157	1.259	1.263	0.267
CVM178.01	12	8.02E-03	31.3	40.2	5.7	1.1	135.8	16.5	5.6	2.4	243.1	45.2	2.5	1.5	1.011	1.04	1.051	1.054	0.556
CVM178.02	12	9.79E-03	32.9	65.1	9.6	2.7	171.4	19.2	10.2	2.5	266.9	15.3	5.8	1.8	1.02	1.02	1.041	1.041	0.012
CVM182.01	8	1.34E-02	37.3	0.4	5.1	0.6	127.5	23.2	4.7	1	306.4	66.8	3.5	0.8	1.019	1.058	1.078	1.09	0.507
CVM182.02	9	9.45E-03	34.4	14.1	33.8	11.3	138.9	44.9	53.6	6	291.5	40.7	18.1	3	1.002	1.018	1.02	1.022	0.845
CVM185.01	10	9.96E-03	260.7	61.8	57.3	2	9.6	9.8	5.9	4.1	104.5	26.1	30.3	2	1.027	1.142	1.173	1.186	0.663
CVM185.02	11	8.45E-03	187.7	21.7	5.9	2.9	304.1	38	3.7	1.8	82.3	33.6	5.9	1.7	1.047	1.064	1.114	1.115	0.146

n: número de especímenes analizados por muestra; Km: Susceptibilidad total; D: diámetro; I: inclinación; L: anisotropía lineal; F: anisotropía planar; P: grado de anisotropía; P': grado de anisotropía corregida; T: parámetro de forma.