



## APLICACIÓN DE LA ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA AL RECONOCIMIENTO DE DEPÓSITOS VOLCANICLÁSTICOS EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO ALTIPLANO - PUNA, ANDES CENTRALES, ARGENTINA

Silvia E. Singer<sup>1\*</sup>, Rubén Somoza<sup>1,2</sup> y Juan F. A. Vilas<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias Geológicas, Ciudad Universitaria, Pab. II. (1428) Buenos Aires, Argentina.  
<sup>2</sup>CONICET

### Resumen:

Se presenta un estudio de magnetismo de rocas, de anisotropía de susceptibilidad y de remanencia magnética en ignimbritas del Mioceno Superior de la Puna. Los resultados indican que las sub-fábricas paramagnética (dominante) y ferrimagnética son coaxiales uno a uno y que permiten interpretar los resultados direccionales en términos de petrofabrica. Las direcciones de transporte inferidas son reconciliables con centros emisores determinados en la región mediante estudios de geología regional.

### Abstract:

We present a study of rock magnetism, anisotropies of magnetic susceptibility and of magnetic remanence developed on Upper Miocene ignimbrites from the northern Puna. The results indicate that the paramagnetic (dominant) and ferromagnetic sub-fabrics are mutually co-axial, allowing the interpretation of the obtained directional data in terms of petrofabric. The inferred directions of transport are in agreement with sources identified by regional geology.

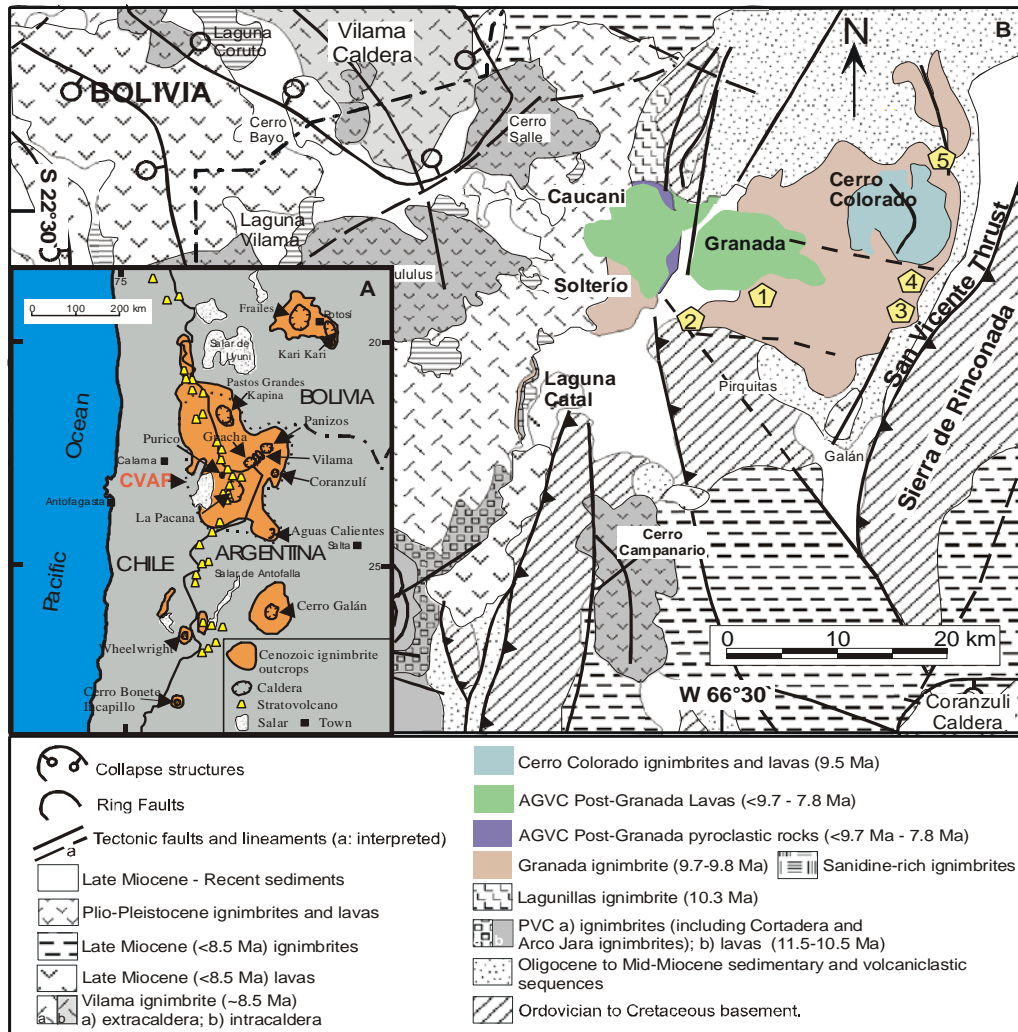
### Introducción

El volcanismo silícico en la Zona Volcánica Central andina originó una de las provincias ignimbríticas neógenas más importantes del mundo. Entre los 21° y 24° S, el plateau Altiplano-Puna muestra una concentración de calderas y de ignimbritas predominantemente dacíticas que constituyen el Complejo Volcánico Altiplano-Puna (CVAP) (de Silva, 1989) (Fig1A). Sus composiciones químicas y los enormes volúmenes eyectados sugieren un origen por fusión cortical a gran escala. Si bien se han reconocido centros eruptivos y se han propuesto mecanismos de colapso caldérico para algunas ignimbritas, el conocimiento para otras unidades es aún escaso. Una de ellas, objeto de este estudio, es la Ignimbrita Granada (Coira et al., 1996; Caffè et al., 2008) la cual señala el inicio (9.7 Ma) del volcanismo caldérico de gran volumen en la Puna Norte. Para su estudio hemos aplicado el método de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM). La ASM se ha aplicado con éxito para determinar direcciones y sentidos de flujos, localizar centros emisores y en el estudio de mecanismos de transporte y de emplazamiento de flujos piroclásticos (MacDonald et al., 1990). Los resultados ASM de la Ignimbrita Granada y depósitos volcaniclásticos asociados permitieron caracterizar las fábricas magnéticas de estas unidades y confrontar estos resultados con los datos de campo.

Los afloramientos de la Ig. Granada (aproximadamente 630 km<sup>2</sup>) están distribuidos en dos lóbulos principales: el Oriental localizado al este-noreste del Complejo Volcánico Abra Granada, (CVAG) (Fig.1B), el cual muestra los depósitos más extensos y de mayor espesor; y el Lóbulo Sur, el que muestra depósitos de menor extensión areal y más delgados (Caffè, 2008). La Ig. Granada está compuesta de un conjunto de flujos piroclásticos ricos en cristales, de color gris blanquecino y composición dacítica. Esta secuencia puede ser dividida en dos secciones principales: Sección Inferior y Sección Superior. La Sección Inferior aflora sólo al suroeste del Complejo Volcánico Cerro Colorado (Fig. 1) Estas ignimbritas, son masivas, no soldadas, aparecen como relleno de valles, y su extensión es limitada. Las ignimbritas de



la Sección Superior son induradas en fase vapor a débilmente soldadas, intercaladas con depósitos no soldados. En esta parte de la secuencia son comunes intercalaciones de niveles volcánoclasticos-epiclasticos, surges y depósitos de caída. Otra importante observación es que las ignimbritas de la Sección Superior parecen estar menos soldadas e induradas en fase vapor en las posiciones más distales. Según Caffè et al. (2008), el patrón de



**Figura 1.** Modificada de Caffè *et al.*, 2008. **1A:** mapa de la Zona Volcánica Central de los Andes. Se observa el Complejo Volcánico Altiplano Puna (CVAP). **1B:** Mapa geológico del área de estudio. Los pentágonos enumerados representan a las localidades mencionadas en el texto (1: Toronsaire, 2: Mesada de Lipehuasi, 3: Casablanca, 4: Escuela Oros mayo, 5: Oros mayo).

distribución y variaciones laterales mostrados en los dos lóbulos definidos para la Ig. Granada sugiere que los flujos piroclásticos se movieron hacia el E-NE y hacia el S a partir de una fuente volcánica emisora centrada en el Complejo Volcánico Abra Granada (Fig. 1B).

### Mineralogía magnética

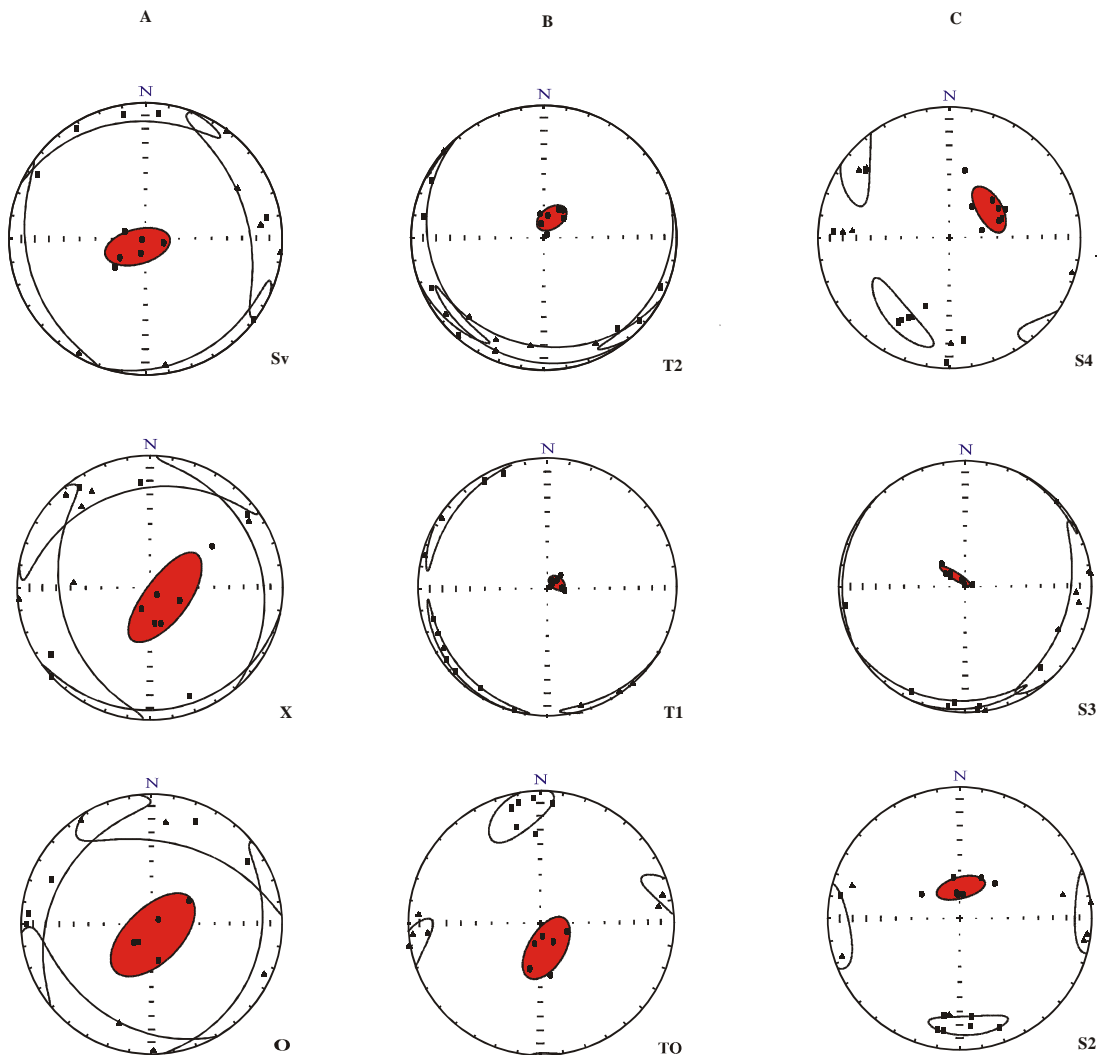
La mineralogía magnética fue determinada mediante estudios de magnetismo de rocas: ciclos de histéresis, desmagnetización térmica, IRM, estudios de susceptibilidad a campos magnéticos crecientes, mediciones de magnetismo remanente natural y de la susceptibilidad magnética total. Conjuntamente se realizaron observaciones microscópicas de cortes delgados y de pulidos calcográficos las cuales



permitieron determinar que las titanomagnetitas son el principal mineral ferrimagnético en estas rocas, con la participación subordinada de hematita. Por su parte, las biotitas constituyen el principal contribuyente paramagnético a la susceptibilidad total. Se observa que las titanomagnetitas son producto de la oxidación deutérica de alta temperatura de las micas. Los resultados obtenidos por los diferentes ensayos son coherentes entre sí e indican que cristales de magnetitas pobres en titanio son responsables del magnetismo remanente natural mientras que las micas representan la principal fracción paramagnética.

### Anisotropía de Susceptibilidad Magnética

Los estudios de ASM se realizaron sobre muestras provenientes de 16 sitios ubicados en 4 localidades. Tres sitios están localizados en la Mesada de Lipehuasi (Fig. 1). En cada una de las otras localidades, los sitios están distribuidos en secciones continuas de flujos piroclásticos que hemos denominado R (Escuela Orosmayo), S (Orosmayo), y T (Casablanca) (Fig.1B). Un estudio paleomagnético previo de estas muestras (Somoza et al., 1996) permitió aislar una magnetización remanente característica para cada sitio las cuales sugieren que el emplazamiento de la Ig. Granada se originó a partir de erupciones múltiples bien diferenciadas en el tiempo.



**Figura 2.** : proyección estereográfica en el hemisferio inferior de los ejes principales ASM y de sus elipses del 95% de confianza para las localidades Mesada de Lipehuasi (A), perfil T (B) y Perfil S (C): cuadrado: eje máximo, triángulo: eje intermedio, círculo: eje mínimo



### Mesada de Lipehuasi

La sección estratigráfica que muestra esta localidad es correlacionable con la secuencia de Toronsaire (Fig.1B), cuyos depósitos (350m de espesor) representan la facies proximal del Lóbulo Oriental de la Ig. Granada (Caffe et al., 2008). En la mesada de Lipehuasi (Fig.1B), se recolectaron muestras orientadas provenientes de una secuencia de ignimbritas blanquecinas friables. En esta última secuencia se definieron 3 sitios, dos de ellos (Sv y X) en la Sección Superior y el restante (O) en la Sección Inferior. Los sitios en Mesada Lipehuasi muestran una fábrica magnética planar subhorizontal, donde los ejes  $K_1$  y  $K_2$  muestran una distribución en forma de guirnalda alrededor de los ejes  $K_3$  (Fig.2), lo que determina que el valor de las foliaciones sea un orden de magnitud mayor que el observado en las lineaciones. El grado de anisotropía de estas rocas es bajo ( $P < 1.06$ ).

### Escuela Oros mayo (Perfil R)

Se definieron los sitios R0, R1, R2, R3 y R4 (Fig. 3) y dos niveles que corresponden a surges basales denominados SU y SA (Fig.3), de 25 y 45 cm. respectivamente. Estos últimos son arenosos y principalmente masivos. El sitio R0 corresponde a un depósito eólico, de aproximadamente 2 m que muestra estratificación entrecruzada de alto ángulo. Su base es neta, mientras que su techo muestra un nivel de caída de aproximadamente 10 cm. La susceptibilidad volumétrica media ( $K_m$ ) para cada sitio de la Sección R muestra una desviación standard pequeña, indicativa de la consistencia de  $K_m$  dentro de cada ignimbrita. El grado de anisotropía es bajo  $P_j < 1.06$  en todos los sitios, indicando una anisotropía magnética débil. La fábrica de todas las muestras es oblada ( $T > 0$ ), con foliaciones magnéticas bien definidas por muy buen agrupamiento de los ejes  $K_3$ , los que en todos los casos inclinan hacia el E-NE (Fig.3). En los sitios R3 y R4 (Fig. 3) los ejes  $K_1$  y  $K_2$  muestran una distribución en forma de guirnalda alrededor de  $K_3$  mientras que los sitios R1 y R2 (Fig. 3) muestran lineaciones mejor definidas.

Los surges basales SU y SA presentan susceptibilidades volumétricas medias menores a la de sus flujos asociados. El grado de anisotropía es bajo  $P_j < 1.06$  en los dos sitios. Sus fábricas son obladas ( $T > 0$ ) y la foliación es mayor que la lineación. Los ejes  $K_3$  están bien agrupados y son cercanos a la vertical, mientras que los ejes  $K_2$  se agrupan en la dirección E-O (Fig. 3).

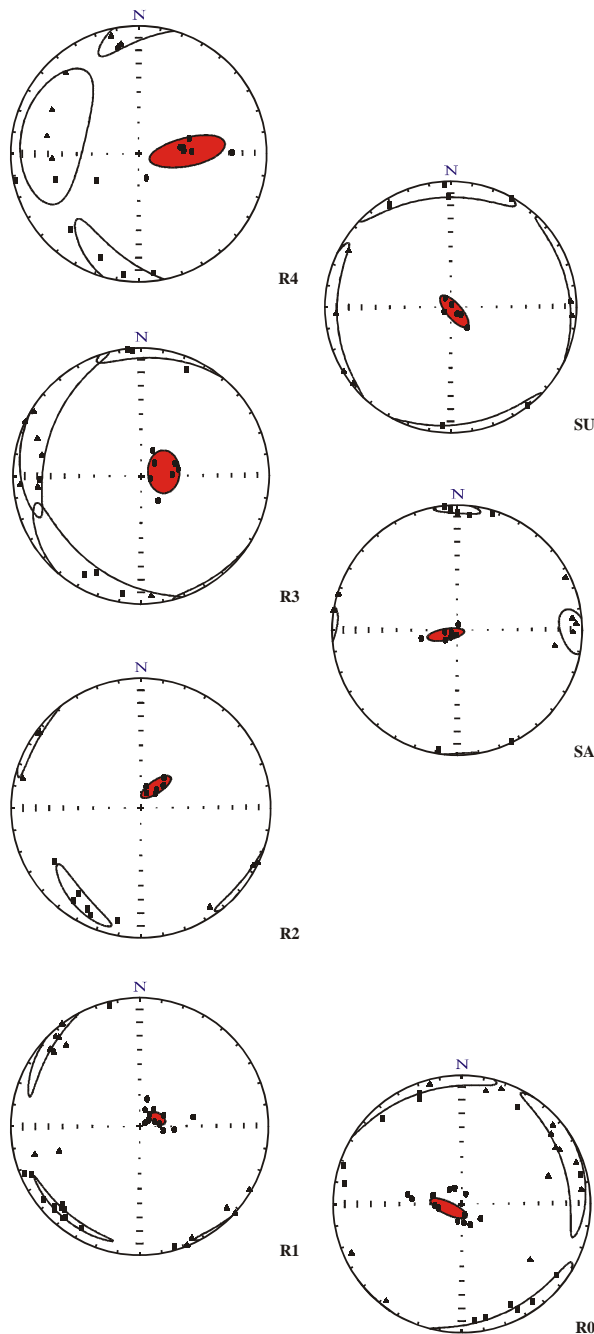
El sitio R0 presenta una fábrica magnética planar subhorizontal (Fig. 3). El grado de anisotropía  $P_j$  de los especímenes alcanza valores del 6 al 15%, mucho mayor que para las muestras de sus depósitos volcánoclasticos asociados. Se observa una lineación magnética débil en la dirección NO-SE.

### Casablanca (Perfil T)

Se definieron los sitios T0, T1 y T2 (Fig. 2), distribuidos verticalmente. T0 es un depósito aparentemente eólico, de 2,5 a 4 m de espesor. En algunos sectores muestra laminación paralela a escala mayor mientras que otras secciones del mismo presentan estratificación entrecruzada. T1 y T2 corresponden a ignimbritas. Los resultados direccionales de los sitios T1 y T2 (Fig. 2) permiten reconocer características similares a las observadas en el perfil R, con estos sitios T también mostrando un grado de anisotropía débil menor al 6%. Su fábricas magnética son planares ( $F > L$ ). Los ejes  $K_3$  están bien agrupados e inclinan aproximadamente hacia la dirección NE, mientras que los ejes  $K_1$  y  $K_2$  definen un plano de foliación magnética imbricado hacia el SO (Fig. 2). El sitio T0 presenta resultados ASM semejantes los del sitio R0 (Fig. 2)

### Oros mayo (Perfil S)

Esta secuencia ignimbrítica se apoya sobre un paquete de ignimbritas grises que tiene unos 15 m de potencia y es atravesado por chimeneas fumarólicas de la Ignimbrita Oros mayo, unidad pre Ig. Granada, la cual posee una edad K/Ar de  $10.3 \pm 0.5$  Ma. (Caffe y Coira, 2002).



**Figura 3:** Proyección estereográfica en el hemisferio inferior de los ejes principales de ASM y sus elipses del 95% de confianza para el perfil R: cuadrado: eje máximo, triángulo: eje intermedio, círculo: eje mínimo

En esta sección se definieron los sitios S2 y S4 correspondientes a depósitos ignimbríticos y el nivel S3 perteneciente a un surge basal (Fig.2). El grado de anisotropía de estas ignimbritas es bajo ( $P_j < 1.06$ ) y sus sitios presentan una fábrica magnética planar ( $T > 0$ ) con planos de foliación imbricados. El eje  $K_3$  del nivel S2 inclina hacia el N, mientras que el eje  $K_3$  del nivel S4 inclina al NE, en forma similar a la observada en los sitios de los perfiles T y R.

### Anisotropía de magnetización remanente isotérmica (amri)

Se realizó un estudio piloto de AMRI sobre muestras del sitio T2 correspondiente a la localidad de Casablanca con el fin de estimar la orientación de las partículas ferrimagnéticas en estas rocas. Conjuntamente se midieron las foliaciones correspondientes a las micas mediante el uso de una platina universal y se obtuvo el polo de foliación de la petrofábrica. El estudio permitió observar que los polos de las foliaciones micáceas se correlacionan excelentemente con los polos de las foliaciones magnéticas ASM y AMRI. Asimismo, los ejes principales del elipsoide AMRI son mutuamente paralelos a los correspondientes ejes del elipsoide ASM, sugiriendo que las titanomagnetitas y las biotitas definen exactamente el mismo elipsoide, que corresponde al de la petrofábrica.

### Conclusiones

El análisis de los resultados permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- 1) Los resultados ASM obtenidos son consistentes con los obtenidos para otros flujos ignimbríticos y surges (MacDonald and Palmer, 1990; Cagnoli and Tarling, 1997).
- 2) La Ignimbrita Granada tiene una fábrica magnética medible y bien definida. La susceptibilidad total tiene valores  $K_m < 200 \mu\text{SI}$ , y el grado de anisotropía es bajo.



Los resultados tienen consistencia intra- e inter-sitio, lo cual justifica interpretaciones en términos de petrofábrica.

3) Las ignimbritas contienen biotita y magnetita como principales especies minerales paramagnética y ferrimagnética, respectivamente. La contribución paramagnética a la susceptibilidad magnética excede a la ferrimagnética, indicando que las biotitas ejercen control sobre la fábrica magnética. Las subfábricas de ambos minerales son coaxiales.

4) Los surges, las ignimbritas y el depósito eólico muestran diferentes fábricas magnéticas, probablemente reflejando diferentes mecanismos de transporte y de depositación.

5) El análisis de los datos ASM indica que los segmentos distales de las ignimbritas muestran fábricas mejor organizadas, con los minerales magnéticos imbricados, a diferencia de los segmentos proximales, que reflejan con mayor intensidad los procesos de compactación y/o soldamiento.

6) En cuanto a la proveniencia de los flujos piroclásticos los sitios distales de la Ig. Granada muestran fábricas magnéticas cuyos planos de foliación imbricados sugieren una fuente localizada en el O-SO de los sitios de muestreo. Esto se reconcilia con la propuesta de Caffè et. al, (2008), sobre la presencia de un centro emisor oculto bajo las rocas del CVAG. Asimismo, en esta clase de rocas con fábricas controladas por orientación de micas, la imbricación definida por el eje  $K_3$  puede resultar un indicador real del sentido de movimiento de los flujos. Por otra parte, en el sitio proximal Mesada de Lipehuasi las lineaciones magnéticas, aunque débiles, indican un centro emisor ubicado al N-N0 de dicha localidad, también en concordancia con la propuesta de Caffè et. al (2008). En el caso de los surges, el eje  $K_2$  podría estar señalando la dirección del flujo (¿transporte de partículas prismáticas por rodamiento?).

Por último el depósito eólico muestra lineaciones magnéticas que coinciden aproximadamente con la dirección NO-SE de los vientos dominantes en la región durante el Mioceno Tardío (de Silva et al, 2010).

## Referencias

Caffè, P.J., Coira, B.L., 2002. Chronostratigraphy of the San Juan de Oro basin and its tectonic implications for the northern Puna during the Miocene. 5th. ISAG, 109-112.

Cagnoli, B. Tarling, D., 1997. The reliability of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) data as flow direction indicators in friable base surge and ignimbrite deposits: Italian examples. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 75, 309-320.

Coira, B., Caffè, P., Kay, S., Diaz, A., Ramirez, A., 1996. Complejo volcánico de Vilama - Sistema caldérico del Cenozoico superior en Puna, Jujuy. 13<sup>th</sup> Congreso Geológico Argentino, Vol. 3, 603-620

de Silva, S., 1989. The Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes. *Geology* 17, 1102-1106.

de Silva, S., Bayle J., Mandt K., Viramonte J., 2010. Yardangs in terrestrial ignimbrites: Sinergistic remote and field observations on Earth with applications to Mars. *Planetary and Space Science*, 58, 459-471.

Mac Donald, W. and H. Palmer, 1990. Flow directions in ash-flow tuffs: a comparison of geological and magnetic susceptibility measurements, Tshirege member ( upper Bandelier Tuff ) Valles Caldera, New Mexico, USA, *Bulletin of Volcanology*, 53, 45-59.

Somoza, R., Singer, S. and Coira B., 1996. Paleomagnetismo of upper Miocene ignimbrites at the Puna: An analysis of vertical-axis rotations in the Central Andes *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, 11, 387-11,400.