



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

**Tesina presentada para obtener el grado académico de
LICENCIADO EN GEOLOGÍA**

**PALEOMAGNETISMO DEL CERRO LAS PILETAS, PROVINCIA DE LA PAMPA,
ARGENTINA
ESTUDIO DE LA FÁBRICA MAGNÉTICA**

VIRGINIA ANAHÍ BARRAZA

SANTA ROSA (LA PAMPA)

ARGENTINA

2013

ÍNDICE

Prefacio.....	4
Resumen	5
Capítulo 1: Marco General	
1.1 Introducción.....	7
1.2 Objetivos del trabajo	8
1.3 Hipótesis	10
Capítulo 2: Marco geológico	
2.1 Ubicación.....	11
2.2 Antecedentes geológicos del área.....	14
2.3 Marco geológico regional.....	14
2.4 Evolución tectónica y paleogeográfica del Gondwana Sudoccidental durante el Paleozoico Superior.....	17
2.5 Edad del Cerro Las Piletas	20
Capítulo 3: Descripción en el afloramiento	
3.1 Descripción macroscópica de las rocas en el afloramiento y muestra de mano	22
3.2 Descripción microscópica de las rocas.....	23
Capítulo 4: Anisotropía de Susceptibilidad Magnética	
4.1 Fundamentos del método.....	25
4.2 Parámetros de magnitud y forma del elipsoide de anisotropía.....	28
4.3 Representación gráfica de la anisotropía.....	29
4.4 Metodología de trabajo	32
4.4.1 Trabajo de campo. Toma de muestras orientadas.....	32
4.4.2 Trabajo en el gabinete.....	34
4.5 Medición de la anisotropía de susceptibilidad magnética.....	35
Capítulo 5: Resultados de ASM obtenidos.	

5.1 Descripción de la ASM de toda la población del Cerro Las Piletas.....	36
5.2 Descripción sitio por sitio de la ASM del Cerro Las Piletas.....	40
Capítulo 6: Interpretación de los resultados.....	47
Capítulo 7: Conclusiones y Consideraciones Finales.....	52
Agradecimientos.....	54
Bibliografía.....	55

PREFACIO

Este trabajo de Tesina es presentado como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Licenciado en Geología, de la Universidad Nacional de La Pampa y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución Académica.

Se llevó a cabo en dependencias del Departamento de Geología de la Universidad Nacional de La Pampa y en el Departamento de Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Instituto de Geofísica “Daniel A. Valencio”, INGEODAV, durante el período comprendido entre Marzo de 2012 y el 08 de Noviembre de 2012, con la dirección de la Dra. Renata Nela Tomezzoli y co-dirección del Dr. Hugo Tickyj.

RESUMEN

Se llevó a cabo un estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética en la localidad del Cerro Las Piletas, ubicado al sur de la Provincia de La Pampa (Lat. S38°34'23"; Long. 65°41'16") para relacionar los resultados obtenidos, con otros de cuencas y afloramientos vecinos y elaborar reconstrucciones geológicas y tectónicas de la configuración del Gondwana.

El Cerro Las Piletas es un afloramiento de una ignimbrita riolítica de alto grado que presenta una estructura de rumbo regional aproximado de Azimut: 340° / Inclinación: 25°-30°, dada por una foliación magmática determinada por la orientación de los *fiammes* en la ignimbrita.

Del análisis escalar de las direcciones principales de ASM surge que la mayoría de los sitios presentan fábricas obladas. El grado de anisotropía es bajo, menor al 7% a pesar de tener un grado de soldamiento alto, en concordancia con lo esperado para este tipo de rocas.

Del análisis direccional de la fábrica magnética obtenida se observa que hay una tendencia definida. Los ejes $K_{máx}$ de ASM tienden a estar contenidos en el plano de estratificación de las capas de rumbo NO-SE y cercanos a la horizontal. Los ejes K_{min} tienden a ser paralelos al polo del plano de estratificación pero presentan cierta imbricación, tendiendo a ubicarse hacia el O-NO con una inclinación de hasta 60°.

Cuando se lleva a la horizontal el plano de inclinación de la capa, la imbricación de los ejes K_{min} es más clara. En términos generales, estas direcciones se ubican en la diagonal NO-SE con una tendencia del sentido del flujo hacia el NO, o sea indicando un área fuente desde el SE. Estas direcciones de inclinación hacia el NO se interpretaron como imbricaciones positivas.

En algunos sitios situados hacia el techo de la secuencia la imbricación del eje K_{min} es hacia el SE, en sentido contrario a los anteriores aunque indicando también flujo hacia el NO (imbricación negativa), que puede deberse a un aporte de flujo por el interior o por debajo de otro flujo previo más consolidado y por lo tanto la fluencia fue con mayor rozamiento. Puede ocurrir también que los ejes $K_{máx}$ sean perpendiculares a la dirección del flujo y con forma más prolada como si hubieran rodado.

Si la inclinación hacia el NE de los planos de estratificación fuera de origen primario (o sea volcánica), sería esperable que las direcciones de flujo fueran halladas en el mismo sentido de inclinación. El hecho de que, las direcciones halladas estén en la diagonal NO-SE, indican que la inclinación de la estratificación no es primaria. A partir de estos resultados

se pudo inferir que el plano de estratificación estaría vinculado a un basculamiento posterior a su emplazamiento con una dirección del esfuerzo principal máximo de orientación SO-NE, consistente con la dirección de acortamiento regional.

Es posible que las diferencias encontradas en la fábrica de los distintos sitios muestreados se deba a las características intrínsecas de cada uno de los flujos piroclásticos como podrían ser: variaciones en la dirección del flujo, velocidad, viscosidad, compactación diferencial dependiendo de la ubicación estratigráfica dentro del perfil, desvitrificación o bien inversión de los ejes del elipsoide de ASM.

Capítulo 1

MARCO GENERAL

1.1 INTRODUCCION

En el presente trabajo se realizó un estudio de la fábrica magnética, a partir de la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM; Tarling y Hrouda, 1993), en ignimbritas de edad Pérmica que afloran en el Cerro Las Piletas en el sur de la Provincia de la Pampa (Figura 1.1-1.2). El mismo forma parte de un proyecto de investigación mayor cuyo objetivo general es el de determinar la evolución paleogeográfica y geodinámica del Gondwana occidental durante el Paleozoico superior – Triásico.

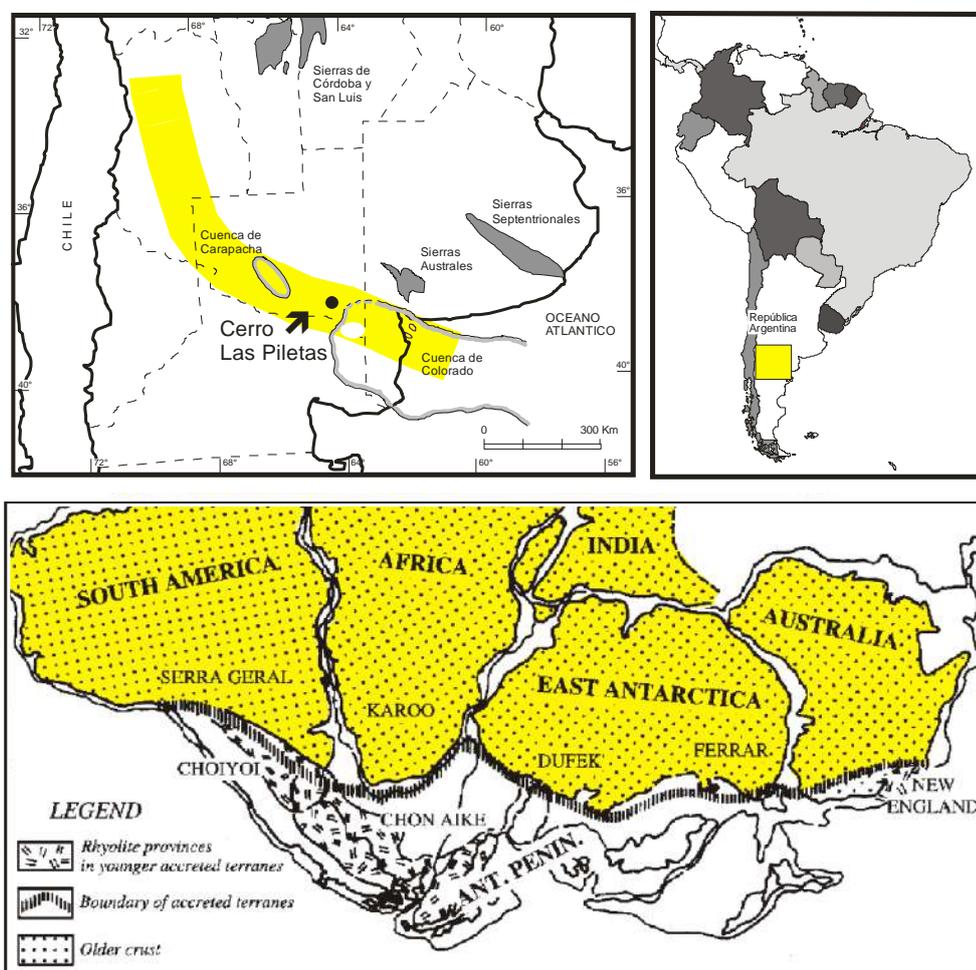


Figura 1.1 a) Ubicación geográfica de la zona de estudio del Cerro Las Piletas en la Provincia de La Pampa. b) relación regional dentro del “Cordón de los Gondwánides” (Keidel, 1916; figura adaptada de Pankhurst *et al.*, 2006)

El Cerro Las Piletas se encuentra dentro del Bloque de Chadileuvú (Llambías *et al.*, 1996), el cual pertenece a una faja de deformación que en Argentina atraviesa las provincias de

Buenos Aires, La Pampa y Mendoza, y que se extiende a lo largo del sur del continente africano, en Antártida y en Australia. Esta faja de deformación fue inicialmente reconocida por Keidel (1916) quien la denominó “*Cordón de los Gondwánides*” (Figura 1.1) y posteriormente por Du Toit (1927). También se conoce con el nombre de “*Geosinclinal de SamFrau*”, que en el margen sudoccidental del Gondwana podría representar la posible zona de sutura entre Gondwana y Patagonia (Figura 1.1) durante el ensamble del Super-Continente Gondwana (Ramos, 1984, 2008; Rapalini *et al.*, 2010; Tomezzoli, 2012). Tanto el paleomagnetismo como los estudios de fábrica magnética son herramientas cuantitativas para comprender la evolución paleogeográfica de los bloques continentales en tiempos geológicos anteriores al Jurásico Medio (véase Valencio, 1980; Butler, 1992; Van der Voo, 1993).

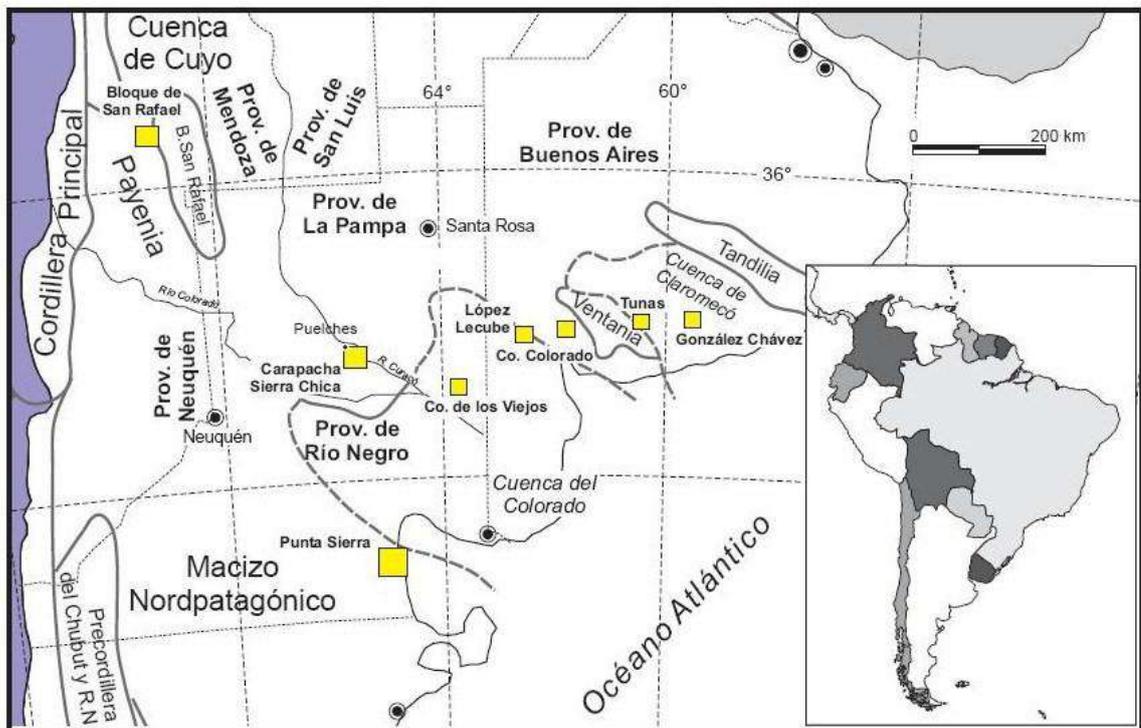


Figura 1.2 Ubicación geográfica del Cerro Las Piletas al sur de la Provincia de La Pampa y su relación con cuencas y afloramientos paleozoicos vecinos.

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

El ciclo magmático Pérmico de la provincia de La Pampa ofrece una oportunidad única para obtener registros magnéticos de alta calidad, lo cual permitiría contribuir al análisis de la configuración de la Pangea a partir de herramientas como el paleomagnetismo y la ASM, sustentados con un conocimiento acabado de la geología local.

La presencia de buenos afloramientos de rocas magmáticas pérmicas en la región de estudio podría aportar una base paleomagnética y de ASM controlada geológicamente, y con suficiente consistencia interna como para poder evaluar las configuraciones de Gondwana y Pangea, en forma independiente de los registros globales.

Los objetivos generales del proyector del que este trabajo forma parte son:

- Mejorar el conocimiento de la evolución paleogeográfica y geodinámica de Gondwana Occidental y de Pangea durante el Paleozoico Tardío – Mesozoico Temprano.
- Relacionar la paleogeografía con los cambios ambientales drásticos ocurridos en la finalización del Paleozoico comienzo del Mesozoico.

Los objetivos específicos son:

- Elaborar un bosquejo geológico de la zona de estudio en base a información existente y a las tareas de reconocimiento realizadas en el campo.
- Levantar un perfil estratigráfico de las unidades involucradas.
- Obtener las características de los comportamientos magnéticos en relación con los procesos explosivos que actuaron durante la formación de las volcanitas del Cerro Las Piletas.
- Relacionar las características magnéticas del cuerpo aflorante en el Cerro Las Piletas con él o los procesos de deformación que actuaron desde su formación
- Relacionar las características magnéticas con las propiedades y composición petrográfica del cuerpo estudiado.
- Obtener un registro de las propiedades magnéticas de las rocas magmáticas del cerro Las Piletas y ubicarlas crono-estratigráficamente con otras localidades ya estudiadas de la provincia de La Pampa, a fin de ajustar las correlaciones geológicas regionales del volcanismo riolítico-ignimbrítico del Bloque de Chadileuvú, con las de la Formación Carapacha y de las sedimentitas de Sierra de la Ventana (Buenos Aires), áreas que pertenecen al “*Cordón de los Gondwánides*”.
- Interpretar los datos obtenidos.

1.3 HIPÓTESIS

Sobre la base de la información regional y temática existente, es posible plantear las siguientes hipótesis de trabajo en el área del Cerro Las Piletas en el ámbito geológico del Bloque de Chadileuvú

- La fábrica magnética coincide con la estructura de las ignimbritas (tectonita LS); con el $K_{máx}$ magnético situado en el plano de depositación y orientado con la lineación de la ignimbrita.
- La fábrica magnética del Cerro Las Piletas no coincide con la estructura de las ignimbritas, pero es equivalente a la fábrica deformacional de otras rocas ígneas y sedimentarias pérmicas vecinas.
- La fábrica magnética no coincide con la estructura de las ignimbritas ni con la orientación de la deformación pérmica. Su fábrica responde a un patrón complejo de reorientación de minerales.

Capítulo 2 Marco Geológico

2.1 UBICACIÓN

El Cerro Las Piletas se ubica en el centro-sur de la provincia de La Pampa (Fig. 1.1) en el Departamento Lihué Calel. La localidad más cercana es Puelches, a partir de la misma se accede al cerro transitando 50 km hacia el sur por la ruta provincial N° 107 y tomando luego hacia el sureste una huella que llega hasta el afloramiento (Fig. 2.1).

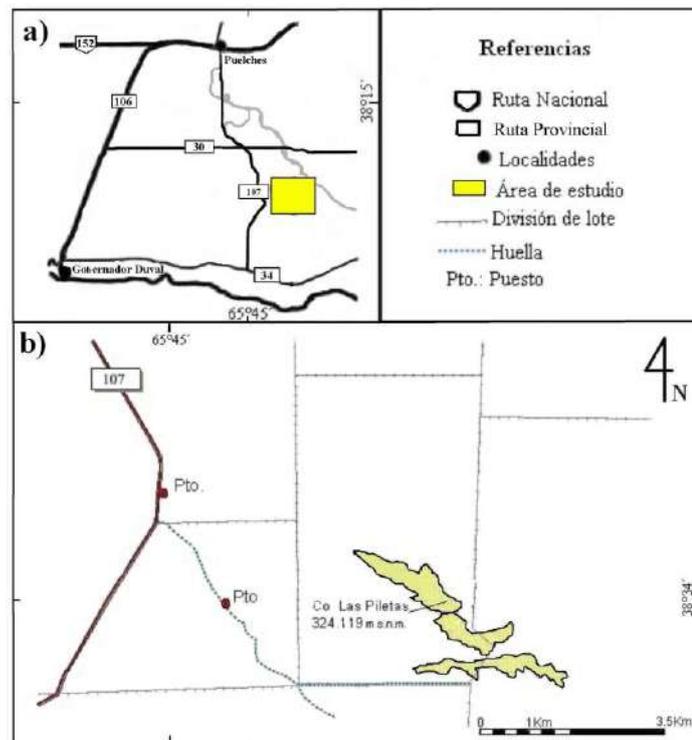


Figura 2-1 Ubicación geográfica del Cerro Las Piletas al sur de la Provincia de La Pampa

El Cerro las Piletas se encuentra en la Hoja Geológica Puelches 3966-II (Espejo y Silva Nieto, 1996; Fig. 2.2). Los afloramientos de volcanitas pérmicas que se destacan en el área son las Sierras de Lihué Calel y de Choique Mahuida (Fig. 2.3), y los cerros Los Divisaderos y Las Piletas (Fig. 2.4). El Parque Nacional Lihué Calel cubre 10000 hectáreas, se encuentra en el sector noroeste de la Hoja Geológica Puelches y constituye el sitio de interés geológico más importante, donde se puede observar la Sierra que es el

elemento que se destaca en el paisaje del plateau riolítico ignimbrítico definido por Llambías y Leveratto (1975), la flora y la fauna autóctona además de pinturas rupestres (Fig. 2.3).

Otros afloramientos menores se ubican a lo largo de una faja de dirección NO-SE, aproximadamente paralela al curso del Río Salado y en las lomas que atraviesa la Ruta Provincial N° 30 (Fig. 2.1). Los cerros Las Piletas, Los Divisaderos y Blanco, integran un cordón serrano con orientación NO-SE casi paralelo al Río Curacó, del que se encuentra a aproximadamente a 10 km, su altura disminuye desde el cerro Las Piletas de 309 msnm. al Divisadero de 217 msnm. Son lomadas suaves (Fig. 2.4) de pendientes poco pronunciadas, de composición riolítica e ignimbrítica estratificadas con rumbo aproximado NE (Espejo y Silva Nieto 1996).

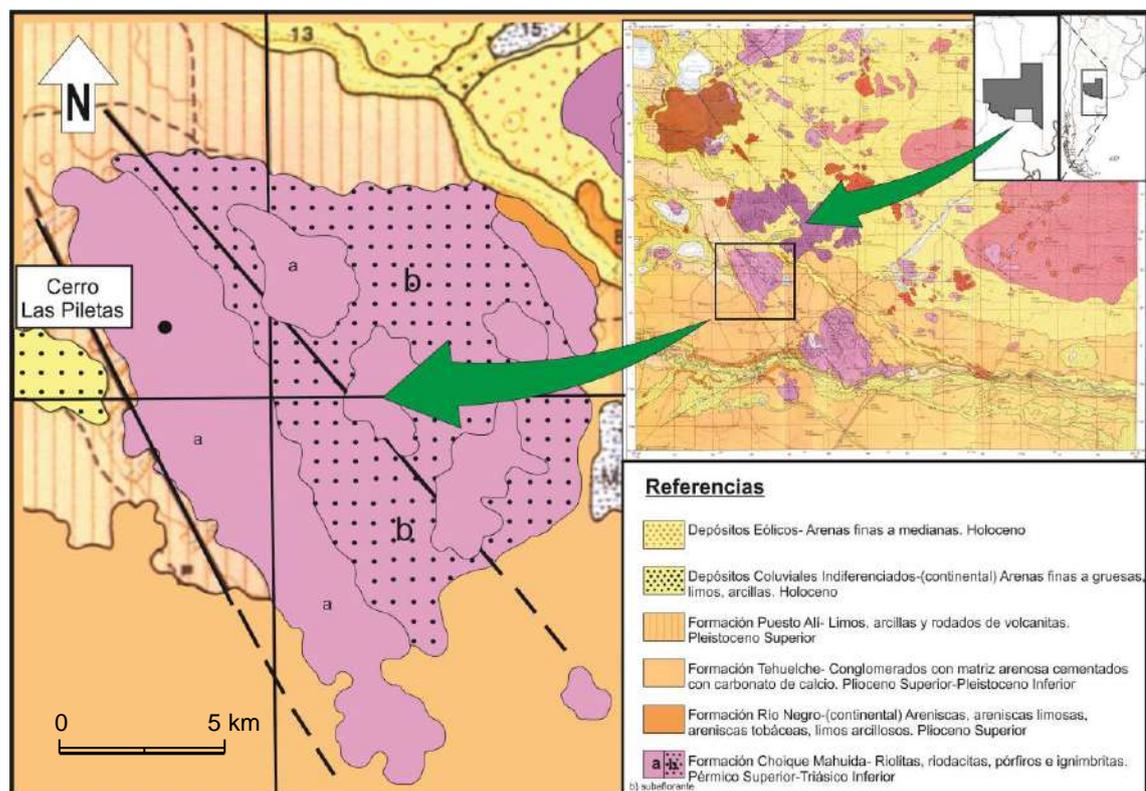


Figura 2.2: Ubicación del cerro Las Piletas dentro de la Hoja Geológica Puelches



Figura 2.3 Vista regional de la Sierra de Lihué Calel con detalles de la flora, fauna y vista de las pinturas rupestres



Figura 2.4: Aspecto general de los afloramientos del Cerro Las Piletas.

2.2 Antecedentes Geológicos del área

El primer estudio geológico regional en la provincia de La Pampa fue realizado por Stappenbeck (1913). Posteriormente, Wichmann (1928) distinguió dos grupos de rocas eruptivas a las cuales les asignó edad Precámbrica, que Groeber (1929) consideró de edad Permo-Triásica. Según Tapia (1939), la sierra de Lihué Calel está compuesta por granitos, pórfiros graníticos y pórfiros cuarcíferos. Sobral (1942) clasificó al Cerro Choique Mahuida (Fig. 1.2), ubicado en las cercanías del Cerro Las Piletas como cuarcitas. Más tarde, Llambías (1975) reclasificó estas rocas como riolitas blancas y a aquellas aflorantes en el Cerro Las Piletas como ignimbritas moradas. Este esquema regional fue aceptado por Linares *et al.* (1980), quienes describen al cerro Las Piletas como una leucoriolita ignimbrítica con lentículas visibles, de textura porfírica, pasta félsica, fenocristales de plagioclasa (oligoclasa media), feldespato potásico (ortoclasa) y cuarzo sin alteración. No son muchos los trabajos geológicos que abordaron el área específica del Cerro Las Piletas, excepto su mención en la Hoja Geológica de Puelches (Espejo y Silva Nieto, 1996) y un trabajo de Tesina para la Universidad Nacional de La Pampa (Mielgo, 2007).

2.3 Marco Geológico Regional

Desde el Carbonífero y hasta el Triásico inferior se desarrolló una intensa actividad magmática en el sector centro y oeste de la República Argentina (Fig. 2.5). Este magmatismo perteneciente al Ciclo Orogénico Gondwánico (Rapela y Llambías, 1999) tuvo lugar en el margen suroeste del supercontinente Gondwana, desde su total amalgamamiento en el Carbonífero temprano hasta su desmembramiento final en el Cretácico inferior.

La mayor actividad magmática ocurrió desde el Pérmico superior y hasta el Triásico inferior, entre los 280 y 240 Ma, tanto a lo largo del cinturón orogénico ubicado en el borde sudoccidental de Gondwana (Fig. 1.1) como en el antepaís (Llambías, 1999). Esta actividad ígnea es conocida como *provincia magmática Choiyoi* (Fig. 2.5).

En Argentina aflora en las provincias geológicas de Cordillera Frontal, donde el magmatismo se divide en una sección inferior andesítica – dacítica y una sección superior dacítica – riolítica, en el Bloque de San Rafael, en las Sierras Pampeanas Occidentales, en Cordillera Principal, en el Macizo Nordpatagónico y en los Bloques de Chadileuvú y de Las Matras (Fig. 2.5).

El Cerro Las Piletas pertenece al Bloque de Chadileuvú. Esta unidad según Llambías *et al.* (1996) se extiende entre el dique Salto Andersen, en el río Colorado, y Limay Mahuida, en el río Chadileuvú. Su límite suroeste está constituido por el engolfamiento de la Cuenca Neuquina. El extremo noroeste y norte está limitado por el Bloque de San Rafael y la subcuenca de Alvear; al este – noreste linda con la cuenca de Quehue/Macachín y hacia el sur con la cuenca del Colorado. El basamento del Bloque de Chadileuvú está conformado por rocas ígneo-metamórficas del ciclo Famatiniano (Paleozoico Inferior), correlacionables con las de las Sierras Pampeanas de San Luis (Linares *et al.* 1980, Sato *et al.* 1996, 2000; Tickyj 1999; Montenegro *et al.*, 2003) y es cubierto por las sedimentitas neopaleozoicas (Llambías *et al.*, 1996) de la Formación Carapacha (Melchor 1999), las cuales fueron suavemente plegadas durante el Pérmico e intruídas y cubiertas por las rocas ígneas permo – triásicas del Grupo Choiyoi, en un ambiente tectónicamente estable (Melchor 1999; Montenegro *et al.*, 2003). Las rocas ígneas permo-triásicas afloran en un área mucho más amplia, además del Bloque de Chadileuvú cubren al Bloque de San Rafael, a la Cordillera Principal y a la Cordillera Frontal (Fig. 2.5).



Figura 2.5: Área de distribución de la Provincia Magmática Choiyoi. Tomado y modificado de Llambías (2001). Relaciones geográficas entre el Cerro Las Piletas, asociado con el vulcanismo del Choiyoi en el

Bloques de Chadileuvú y las provincias geológicas vecinas de Cordillera Frontal (CF), Bloque de San Rafael (BSR), Cordillera Principal (CP), Macizo Nordpatagónico (MNP) y Las Matras.

El Cerro Las Piletas está asociado al vulcanismo del Choiyoi. Sus afloramientos fueron incluidos por Linares *et al.* (1980) en la Formación Choique Mahuida, de edad permotriásica. Ésta formación, junto con las Formaciones El Centinela y Zuñiga, integra el grupo Lihué Calel (Espejo y Silva Nieto, 1996), el cual se extiende en el sector sur-central de la provincia de La Pampa (Fig. 1.2). Llambías (1973) y Llambías y Leveratto (1975) describieron este grupo dentro de la Provincia de La Pampa, como un extenso plateau riolítico, representado por riolitas extrusivas y una facies plutónica de granito. En el ámbito de la Hoja Geológica Puelches (Espejo y Silva Nieto, 1996), el grupo Lihué Calel representa un ciclo magmático constituido por una fase efusiva ácida (Fm Choique Mahuida), una efusiva mesosilícea (Fm Centinela) y fases plutónicas asociadas (Fm Zúniga).

Grupo Lihué Calel- vulcanismo del Choiyoi- Bloque de Chadileuvú

Formación Zúniga (Pérmico Superior-Triásico Inferior). Está caracterizada por leucogranitos rosados de grano medio a fino, porfíricos, miarolíticos asociados a riolitas y aptitas (Linares *et al.*, 1980). Los afloramientos corresponden a pequeños asomos de lomadas suaves cubiertos por un manto regolítico y/o sedimentos eólicos (Espejo y Silva Nieto, 1996). Se localizan en los alrededores de la sierra de Lihué Calel, en una faja paralela al río Curacó desde Puelches hacia el sur y a las lomadas entre Puelches y Cuchillo Có (Espejo y Silva Nieto, *op. cit.*).

Formación El Centinela (Pérmico Superior-Triásico Inferior). Quenardelle y Llambías (1997) reconocen a estas rocas como lavas andesíticas que muestran estructuras porfíricas típicas con pastas pilotáxicas, carencia de cuarzo como fenocristal y presencia de anfíbol (hornblenda) acompañado por clinopiroxeno (siempre bastante alterado) y biotita. Son frecuentes, también, las brechas volcánicas con abundante litoclastos angulosos. Esta unidad, aflora al este del río Curacó, a lo largo y al sur de la Ruta Provincial 30 (Espejo y Silva Nieto, 1996).

Formación Choique Mahuida (Pérmico Superior-Triásico Inferior). Se trata de una unidad compuesta por rocas volcánicas de composición riolítica y dacítica, generadas como lavas y flujos piroclásticos (Quenardelle y Llambías, 1997). Los afloramientos de esta formación corresponden principalmente a la sierra de Choique Mahuida en su

totalidad, una pequeña porción de la sierra de Lihué Calel y los cerros Divisadero y Las Piletas. Afloramientos menores se ubican paralelos al curso del río Salado (Espejo y Silva Nieto, 1996).

Formación Carapacha (Pérmico Superior). Esta unidad fue definida por Vilela y Riggi (1956). Esta es la denominación propuesta por Melchor (1995, 1999). Constituye el relleno de un cuenca de rift elongada en sentido NO-SE, de aproximadamente 120 km de largo y 40 km de ancho, desarrollada durante el Pérmico, en el centro-sur de la provincia de La Pampa (Melchor 1995; Fig. 2.6).



Figura 2.6: Vista regional de los afloramientos de la Formación carapacha, donde es posible observar los rasgos suaves del plegamiento

El relleno de la cuenca es de naturaleza continental, con predominio de depósitos fluviales efímeros y sedimentos lacustres someros subordinados (Melchor, 1995). De acuerdo a las asociaciones megafloresticas de dicha unidad esta cuenca habría recibido sedimentos entre el Pérmico Temprano y Pérmico Tardío temprano (Melchor y Césari, 1997).

2.4 Evolución tectónica y paleogeográfica del Gondwana Sudoccidental durante el Paleozoico Superior

A partir de la propuesta planteada por Ramos (1984, 2008) de considerar Patagonia como un continente alóctono a la deriva que colisiona contra el borde sudoccidental del Gondwana durante el Paleozoico, se han realizado diversos estudios a favor y en contra de la misma (veáse un detalle de los antecedentes en Tomezzoli y Cristallini, 2004). Sin

embargo, aún quedan dudas y controversias acerca del posible origen de la Patagonia y sobre todo del momento en que se habría producido la deformación principal asociada a esta colisión.

De la recopilación y entendimiento de datos paleomagnéticos, de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) y de campo surgidos de los estudios llevados a cabo por diversos investigadores (ver antecedentes en Tomezzoli, 2012) surge que durante el Paleozoico Superior hay dos tipos de magnetizaciones diferentes que se traducen como distintas posiciones paleopolares: una para el Pérmico Inferior y otra para el Pérmico Superior bajo (Fig. 2.7).

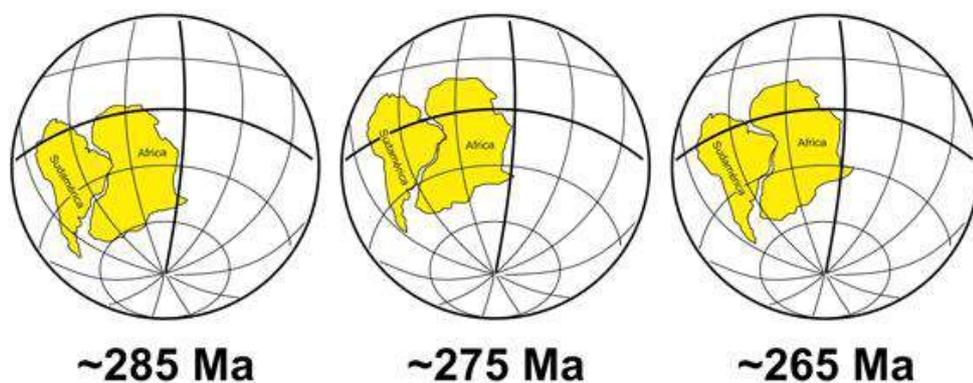


Figura 2.7: Reconstrucciones paleogeográficas del Gondwana de América del Sur con los polos paleomagnéticos promedio para el Pérmico Temprano – Triásico donde es posible apreciar el cambio de la posición latitudinal del paleocontinente (Tomado de Tomezzoli, 2012).

Las diferencias estructurales y los tipos de magnetizaciones diferentes, son consistentes con un modelo de cuenca de antepaís que crece hacia el N-NE con una atenuación gradual de la deformación en el mismo sentido (Tomezzoli, 1997, 1999; Tomezzoli y Vilas, 1997, 1999; Tomezzoli *et al.*, 2006). Para Tomezzoli (2012) la deformación en esta región del Gondwana podría haber comenzado durante el Devónico Medio y se relacionaría con la colisión de Patagonia desde el sur y de Chilenia desde el oeste. Siendo que Chilenia y Patagonia habrían comenzado a colisionar con Gondwana al mismo tiempo, Tomezzoli (2012) plantea la posibilidad de que hayan sido parte de un mismo terreno alóctono a la deriva (Fig. 2.8). Posteriormente, en el Carbonífero, colisionó desde el sur el Macizo del Deseado (Pankhurst *et al.* 2006) y la deformación que continuó hasta el Pérmico. Al reconstruir el Gondwana con estos dos paleopolos se hipotetiza que todo el continente experimentó, entre el Pérmico inferior y el Triásico, un movimiento latitudinal significativo, primero hacia el norte y luego entre el Pérmico Superior bajo-Triásico Inferior, hacia el sur (Tomezzoli, 2009; 2012; Fig. 2.7 y 2.8).

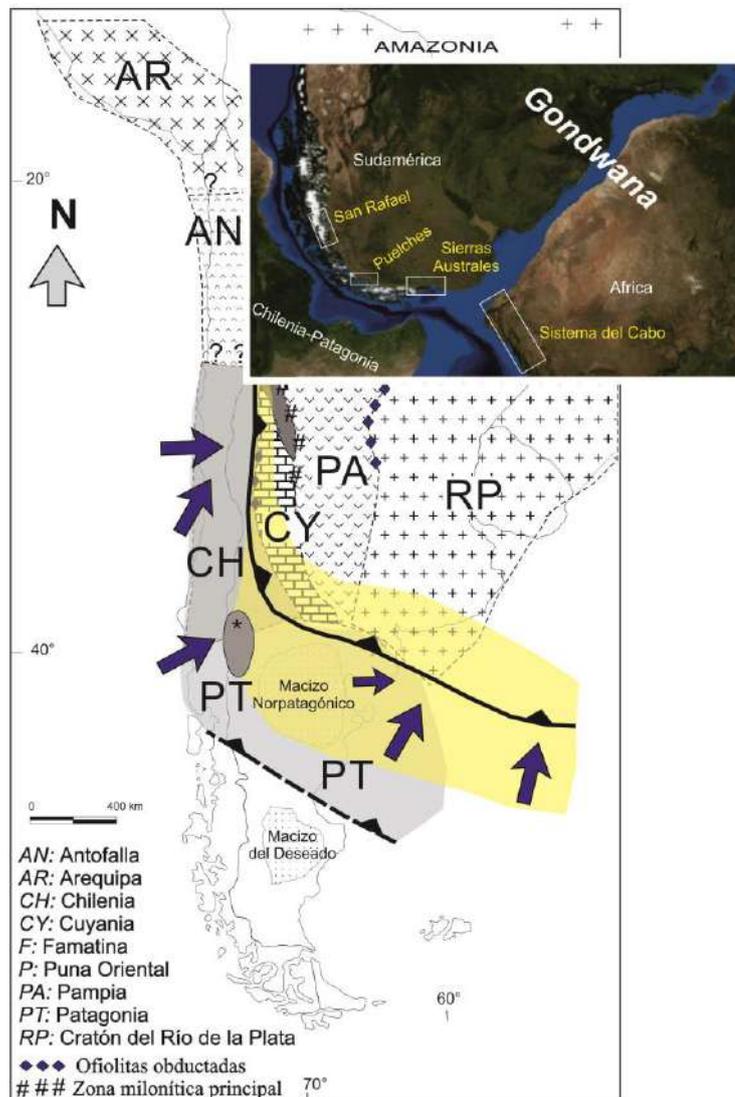


Figura 2.8: Esquema tectónico con la propuesta planteada por Tomezzoli (2012), quien propone que los terrenos Chilena y Patagonia fueron parte del mismo continente alóctono que colisionó con Gondwana durante el Devónico y que la deformación que continuó hasta el Pérmico fue la consecuencia de las últimas etapas de fusión, traslación y acomodación de todos los terrenos acrecionados a núcleo cratónico del Gondwana.

Este movimiento fue interpretado como la consecuencia de las últimas etapas de fusión, traslación y acomodación de todos los terrenos acrecionados al Gondwana: Arequipa-Antofalla, Puna Oriental-Famatina, Cuyania-Precordillera, Chilena y Patagonia, (Tomezzoli, 2012; Fig. 2.8) para lograr la configuración final de la Pangea (Wegener, 1924).

Para este trabajo se llevó a cabo un estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética como una herramienta que pueda aportar datos nuevos que ayuden a comprender la

evolución paleogeográfica de los bloques continentales a partir de la visualización del estado de deformación en la localidad de estudio y para compararlo con los de otras zonas vecinas que fueron estudiadas o que lo serán en el futuro.

2.5 Edad del Cerro Las Piletas

La edad de cristalización de la ignimbrita del cerro Las Piletas se conoce a partir de una datación isotópica por el método U-Pb en circones, para la que se utilizó un espectrómetro de masas con plasma acoplado por inducción y ablación láser (LA-ICP-MS) del Centro de Pesquisas Geocronológicas de la Universidad de San Pablo, Brasil.

Para obtener la edad se analizaron 26 cristales de circon, de los cuales 13 fueron utilizados en el cálculo de la edad y los otros 13 descartados por presentar altos contenidos de Pb no radiogénico, tener datos isotópicos muy alejados de la concordia o presentar material heredados (Tabla 2.1). La edad obtenida es de $252,5 \pm 0,44$ Ma, que corresponde al Pérmico superior casi en el límite con el Triásico y se interpreta como la edad de cristalización de la ignimbrita (Fig. 2.9).

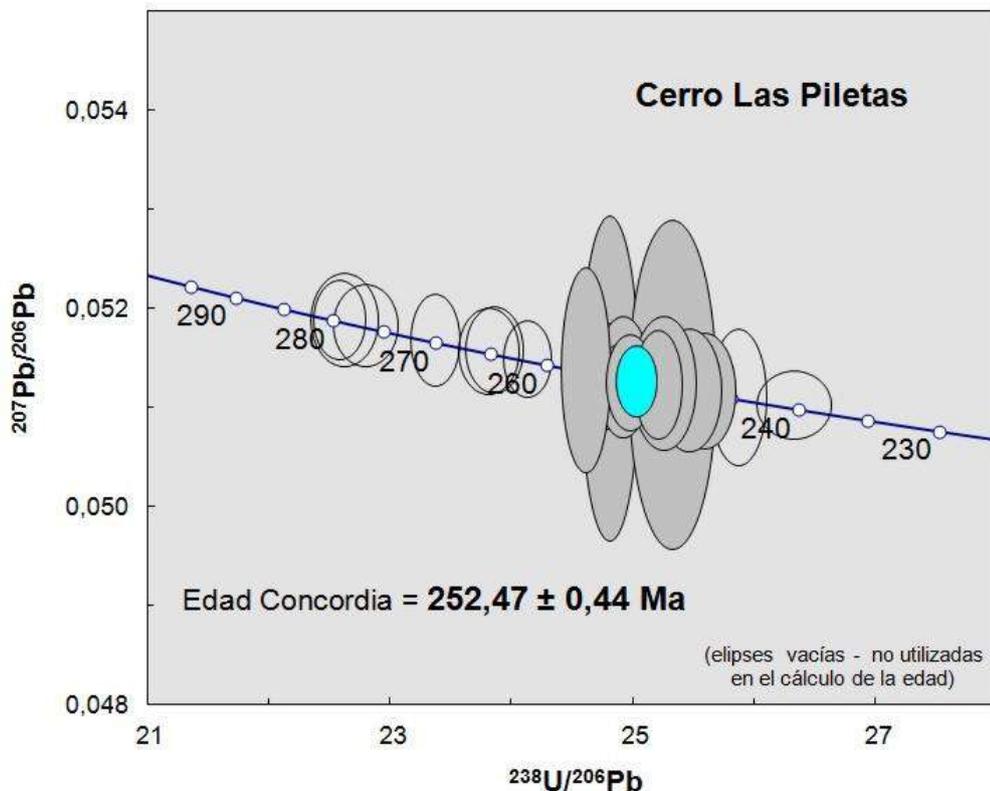


Figura 2.9: Diagrama Tera-Wasserburg para los datos isotópicos obtenidos en circones de la ignimbrita del cerro Las Piletas. Para el cálculo de la edad se usó el programa Isoplot 3.0 (Ludwig, 2003).

SPOT	RATIOS										Pb total comum %	Pb rad ppm	Th ppm	U ppm	Th/U	T206/238	I sigma	
	207/235	I sigma	206/238	I sigma	coef. corr	238/206	I sigma	207/206	I sigma	208/206								I sigma
1,1	0,2888	0,0025	0,0403	0,0003	0,84	24,8102	0,1794	0,0513	0,0004	0,3097	0,0318	0,40	24,3	331,6	434,7	0,7628	0,255	0,002
3,1	0,2825	0,0027	0,0391	0,0003	0,70	25,5926	0,1676	0,0512	0,0004	0,4729	0,0486	0,09	14,0	273,7	229,6	1,192	0,247	0,002
5,1	0,2821	0,0024	0,0401	0,0002	0,71	24,9162	0,1490	0,0513	0,0004	0,2834	0,0291	<0,001	16,2	193,4	293,5	0,659	0,254	0,001
6,1	0,2803	0,0069	0,0395	0,0004	0,38	25,3227	0,2373	0,0512	0,0011	0,4351	0,0447	1,63	26,0	477,2	439,4	1,086	0,250	0,002
9,1	0,2826	0,0018	0,0400	0,0003	0,90	25,0232	0,1933	0,0513	0,0003	0,2501	0,0258	<0,001	10,8	121,5	198,6	0,612	0,253	0,002
11,1	0,2862	0,0019	0,0401	0,0003	0,90	24,9390	0,1557	0,0513	0,0002	0,3624	0,0372	<0,001	27,0	444,3	464,9	0,956	0,253	0,002
12,1	0,2723	0,0022	0,0393	0,0003	0,87	25,4682	0,1779	0,0512	0,0004	0,4165	0,0430	<0,001	8,4	150,0	143,7	1,044	0,248	0,002
14,1	0,2838	0,0017	0,0400	0,0002	0,90	24,9939	0,1387	0,0513	0,0002	0,4259	0,1761	<0,001	9,9	138,1	179,9	0,7674	0,253	0,001
15,1	0,2909	0,0029	0,0396	0,0003	0,68	25,2567	0,1719	0,0513	0,0004	0,4970	0,2056	<0,001	9,6	150,1	166,4	0,902	0,250	0,002
20,1	0,2824	0,0052	0,0406	0,0002	0,30	24,6171	0,1354	0,0514	0,0007	0,4238	0,1754	<0,001	20,7	270,4	370,8	0,729	0,257	0,001
21,1	0,2903	0,0028	0,0400	0,0002	0,54	24,9717	0,1289	0,0513	0,0003	0,5523	0,2284	0,29	25,2	424,6	428,5	0,991	0,253	0,001
24,1	0,2850	0,0062	0,0403	0,0003	0,29	24,8119	0,1557	0,0513	0,0011	0,7641	0,3159	0,37	27,2	582,9	424,8	1,372	0,255	0,002
25,1	0,2826	0,0029	0,0397	0,0002	0,50	25,2090	0,1287	0,0513	0,0004	0,6543	0,2706	<0,001	18,5	355,4	304,7	1,166	0,251	0,001
2,1	0,2724	0,0025	0,0380	0,0003	0,86	26,3318	0,2058	0,0510	0,0002	0,2098	0,0218	0,36	23,0	242,6	445,8	0,544	0,240	0,002
7,1	0,3117	0,0021	0,0443	0,0003	0,90	22,5891	0,1401	0,0519	0,0003	0,3798	0,0389	2,37	28,4	440,3	450,5	0,977	0,279	0,002
8,1	0,3003	0,0019	0,0420	0,0003	0,90	23,8140	0,1661	0,0516	0,0003	0,3573	0,0369	<0,001	7,4	85,8	128,4	0,668	0,265	0,002
10,1	0,2983	0,0019	0,0419	0,0003	0,90	23,8639	0,1571	0,0516	0,0003	0,3654	0,0374	<0,001	23,0	381,6	392,4	0,972	0,265	0,002
16,1	0,3090	0,0029	0,0439	0,0003	0,84	22,8009	0,1778	0,0518	0,0003	0,4692	0,1940	0,84	32,4	531,6	511,4	1,039	0,277	0,002
17,1	0,2874	0,0019	0,0414	0,0002	0,84	24,1365	0,1310	0,0515	0,0003	0,4903	0,2028	<0,001	17,9	274,8	304,8	0,901	0,262	0,001
19,1	0,3133	0,0022	0,0442	0,0004	0,90	22,6241	0,1839	0,0519	0,0003	0,2757	0,1143	<0,001	5,6	43,2	95,9	0,450	0,279	0,002
23,1	0,2834	0,0028	0,0386	0,0002	0,60	25,8741	0,1507	0,0511	0,0005	0,6660	0,2754	0,11	20,8	432,7	348,9	1,240	0,244	0,001
26,1	0,2995	0,0022	0,0428	0,0002	0,76	23,3742	0,1330	0,0517	0,0003	0,6266	0,2591	<0,001	34,5	563,0	535,0	1,052	0,270	0,002
4,1	0,2733	0,0051	0,0387	0,0003	0,47	25,8431	0,2273	0,0511	0,0008	0,4234	0,0436	65,40	19,0	383,2	296,7	1,292	0,245	0,002
13,1	0,3153	0,0019	0,0410	0,0002	0,90	24,3867	0,1450	0,0547	0,0003	0,4220	0,0433	0,19	23,9	442,2	388,2	1,139	0,259	0,002
18,1	0,3006	0,0020	0,0416	0,0002	0,75	24,0271	0,1180	0,0515	0,0002	1,1612	0,4801	153,87	44,3	1294,2	578,2	2,239	0,263	0,001
22,1	0,3223	0,0167	0,0395	0,0006	0,28	25,3338	0,3685	0,0577	0,0024	0,4683	0,1939	<0,001	18,0	207,3	308,1	0,673	0,250	0,004

Tabla 2.1: Datos analíticos de las determinaciones isotópicas en circones de la ignimbrita del Cerro Las Piletas. Los primeros trece análisis de la tabla son los que fueron utilizados para el cálculo de la edad.

Capítulo 3

DESCRIPCION DE LA LOCALIDAD DE MUESTREO

3.1 DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LAS ROCAS EN EL AFLORAMIENTO Y MUESTRA DE MANO

Los afloramientos del cerro Las Piletas están compuestos por depósitos piroclásticos foliados, con alto grado de soldamiento, de unos 150 metros de espesor, que corresponden a una única unidad de enfriamiento. Se encuentran dispuestos en una estructura homoclinal con orientación promedio N340°/25°-30° (Fig. 3.1). De acuerdo a la clasificación de Walker (1983) se denominan ignimbritas de alto grado.

En muestras de mano presentan textura porfírica bandeada, matriz sostén, homogénea en todo el espesor observado, que está definida por abundantes vitroclastos lenticulares, gran cantidad de cristaloclastos y escasos litoclastos ígneos, todos envueltos en una pasta afanítica félsica (Fig. 3.2).

Los vitroclastos tienen una alta relación largo/espesor, con longitudes de 5 a 100 mm y espesores variable entre 0,5 y 10 mm. En tanto que los cristaloclastos son de cuarzo y feldespatos, de hasta 3 milímetros.





Figura 3.1: Vista general y de detalle de los afloramientos del Cerro las piletas



Figura 3.2: Muestra de mano proveniente del Cerro las piletas donde es posible apreciar con detalle los rasgos texturales

3.2 DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA DE LAS ROCAS

Al microscopio (Fig. 3.3) se identifica una textura eutaxítica compuesta de vitroclastos desvitrificados (33% modal), cristaloclastos (12%), litoclastos (0,5%) y una pasta criptocristalina (54,5%). Los vitroclastos están integrados por un agregado de cuarzo y feldespatos, con textura granular alotriomórfica y tamaño de grano promedio de 50 micrones. En su contacto con la pasta es común que presente un agregado microcristalino de fibras paralelas, de composición félsica, que se disponen en forma perpendicular al límite entre vitroclasto y pasta.

Los minerales que integran los cristaclastos son: cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa sódica, minerales opacos y escasos máficos.

El cuarzo es euhedral a subhedral, se encuentra límpido, con extinción relámpago y engolfamientos. Presenta microfracturas rellenas con sericita.

Los feldespatos se encuentran en cristales subhedrales a anhedrales, con alteración sericítica moderada. Los opacos se disponen en dos formas: 1) en cristales euhedrales a anhedrales, de hasta 0,5 mm, disseminados en la pasta, 2) en cristales pequeños (10 a 50 micrones) distribuidos en hileras dentro de vitroclastos o en el contacto de estos con la pasta. Los máficos son escasos y se encuentran intensamente alterados a sericita, cloritas y opacos.

Los litoclastos son de volcanitas silíceas que tienen textura porfírica y pasta criptocristalina.

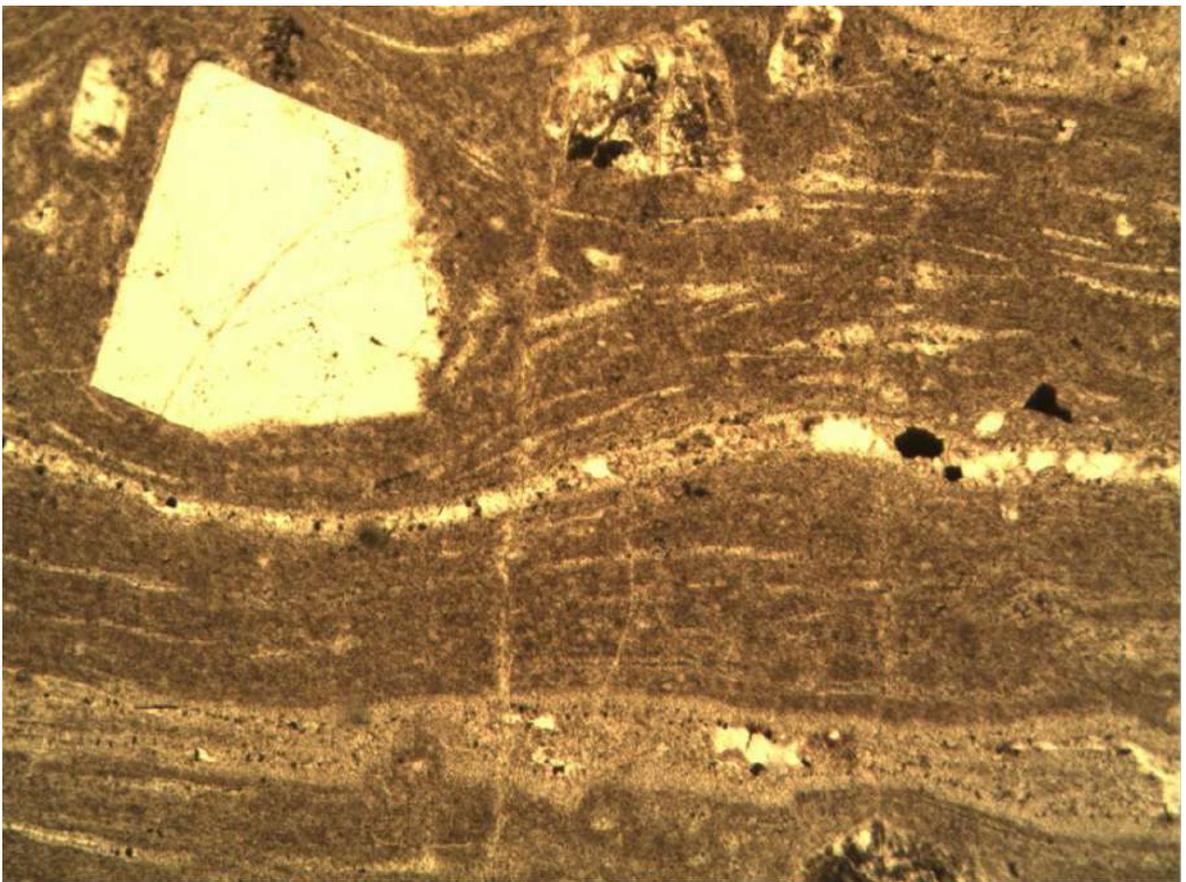


Figura 3.3: Microfoto de la ignimbrita del cerro Las Piletas. Microscopio de polarización, con nicols paralelos.

Capítulo 4

ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

4.1 FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

La Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM; Tarling y Hrouda, 1993) es un método utilizado en el análisis de la petrofábrica de las rocas, rápido, preciso, económico y con un rango muy amplio de aplicabilidad, razones que lo convierten en un método único. Se necesita una colección de muestras orientadas sobre las que se mide la magnetización que adquieren bajo la influencia de un campo magnético débil que se les aplica en distintas direcciones. La ASM depende principalmente de la orientación preferencial cristalográfica, de la fábrica de forma de los minerales o granos, del grado de su alineación cristalina, de su composición y en menor medida de la distribución y tamaño de las microfracturas, como en cualquier otra técnica petrográfica. Por esta razón no se necesita que la roca contenga indicadores cinemáticos específicos, dado que se usan sus propios constituyentes. Así una sustancia **isótropa** será aquella en la cual la magnetización inducida tiene la misma intensidad independientemente de la dirección en la cual se aplica el campo. En cambio hay otras sustancias en las cuales la magnetización inducida sí depende de la orientación de la muestra dentro del campo y son las **anisótropas**.

La ASM relaciona la magnetización adquirida con el campo magnético aplicado a través de la fórmula:

$$K = M/H$$

Donde K es la susceptibilidad magnética, M la magnetización adquirida y H es el campo magnético aplicado. Se mide en tres dimensiones y considerando un sistema de coordenadas cartesianas, la relación entre la magnetización y el campo magnético está dada por un tensor de segundo orden denominado **tensor de susceptibilidad** (Tarling y Hrouda, 1993).

La anisotropía de la susceptibilidad magnética de las rocas puede ser visualizada como un **elipsoide de susceptibilidad** (Fig. 4.1) con tres ejes perpendiculares entre sí: $K_{máx}$, K_{int} , $K_{mín}$ (o $K1$, $K2$ y $K3$) de manera tal que la intensidad de magnetización mayor se

induce en la orientación a lo largo del eje más largo y la intensidad más débil se induce concordantemente con la del eje más corto; así, en una sustancia isótropa estos tres ejes son iguales y el elipsoide se convierte en una esfera.

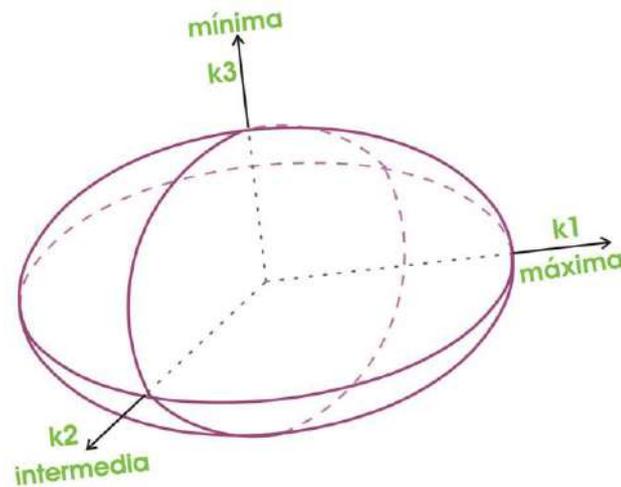


Figura 4.1: Elipsoide de susceptibilidad magnética (Caballero Miranda, 2011), con tres ejes ortogonales que corresponden al máximo, intermedio y mínimo. La orientación en el espacio se define en un sistema de coordenadas (x,y,z)

Las propiedades más importantes del elipsoide de anisotropía son las siguientes:

- El elipsoide de susceptibilidad es coaxial con el elipsoide total de deformación con una correspondencia una a una de los ejes principales (Fig. 4.2).
- El elipsoide de susceptibilidad es coaxial con la petrofábrica; el eje K_3 es perpendicular a la **foliación**, que puede ser el polo del plano de estratificación en rocas sedimentarias, polos de planos de foliación magmática, o bien los polos de las caras de achatamiento en rocas deformadas en el estado sólido.
- Si la fábrica magnética es enteramente de origen deposicional o bien la fábrica tectónica es paralela a la estratificación, es esperable que el ángulo entre K_3 y el polo del plano de estratificación sea pequeño.
- Por otra parte K_1 es paralelo a la **lineación** que puede ser de origen tectónica, la dirección de un flujo magmático y paleocorrientes.
- A K_3 se lo denomina "**polo de foliación magnética**". K_1 da la dirección de la **lineación magnética**.
- La forma del elipsoide de susceptibilidad está directamente relacionado con la fábrica de las rocas. En determinados tipos de rocas se trata de una relación cuantitativa entre L (lineación) o F (foliación), o cualquier otro parámetro que involucre la longitud relativa de los ejes de susceptibilidad y la intensidad de las orientaciones lineares o planares

respectivamente.

- En el caso de deformación en estado sólido existe una relación directa entre la ASM y la deformación. Una aplicación cuantitativa de la ASM en estos casos, solo es posible cuando se ha llevado a cabo una calibración con el esfuerzo, en caso contrario solo se puede realizar una relación cualitativa, dado que las rocas más anisótropas son aquellas más deformadas.
- Las medidas de ASM no son afectadas por magnetizaciones remanentes naturales o artificiales.

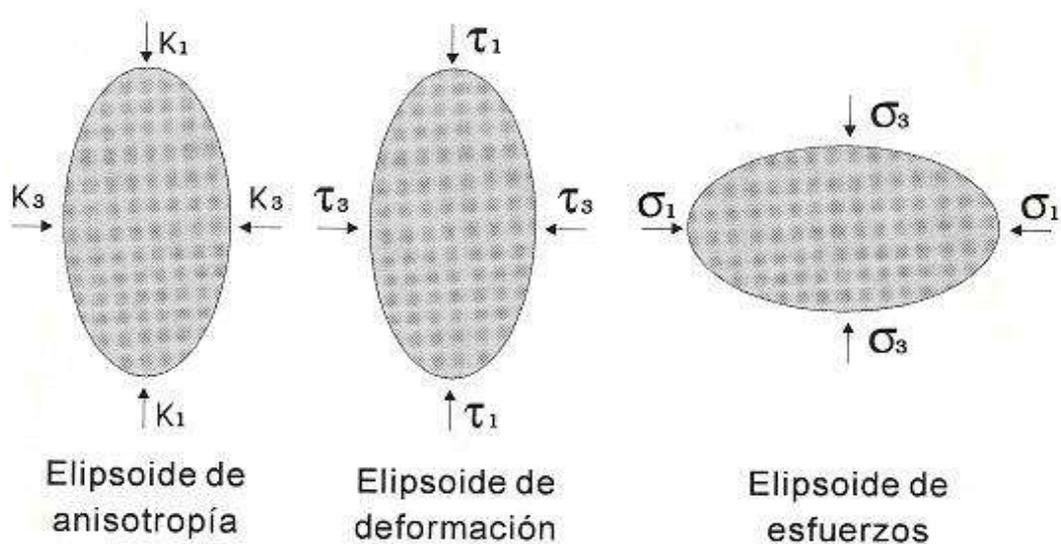


Figura 4.2: Relaciones entre el elipsoide de anisotropía, deformación y esfuerzo. τ (tau): deformación; σ (sigma): esfuerzo.

Los estudios de ASM pueden ser aplicados sobre los minerales, o bien sobre las rocas. Los minerales más importantes en cuanto al magnetismo de rocas son la magnetita, hematita y pirrotina, y también algunos silicatos ferromagnesianos paramagnéticos, como augita y hornblenda. Esta propiedad de los minerales ferromagnéticos, paramagnéticos o diamagnéticos depende de diferentes factores (tomado de Hrouda, 1982):

- Forma de la alineación de los granos ferromagnéticos
- Alineación estructural de cristales con anisotropía magnetocristalina
- Distribución de los dominios magnéticos
- Relación existente entre los granos magnéticos
- Régimen de esfuerzos
- Intercambio de anisotropía

4.2 PARÁMETROS DE MAGNITUD Y FORMA DEL ELIPSOIDE DE ANISOTROPÍA

Los parámetros de la anisotropía magnética son relaciones entre las magnitudes de los ejes del elipsoide de la AMS, que sirven para determinar de forma objetiva (1) el tamaño, (2) la buena o mala definición y (3) la forma que tienen los elipsoides comparativamente. Para cada aspecto o parámetro se propusieron diversas formas de evaluación de cada tipo de parámetro y se muestran las diversas fórmulas propuestas que han sido más empleadas.

Susceptibilidad media: es equivalente al valor medio de la integral de la susceptibilidad direccional sobre el espécimen total:

$$K_{prom} = K_{media} = \frac{(K_1 + K_2 + K_3)}{3}$$

Este parámetro tiene un significado físico directo en términos de elipsoides de esfuerzo donde representa el radio de la esfera inicial.

Magnitud de la anisotropía: se basa en la relación entre las susceptibilidades máximas y mínimas, y la media conocida como **grado de anisotropía normalizado** (Owens, 1974):

$$H = \frac{K_1 - K_3}{K_{media}}$$

Indica una orientación preferencial intensa de los minerales ferromagnéticos en las rocas.

Forma del elipsoide de anisotropía: se define en base a su excentricidad que se da en términos de relaciones o diferencias entre los distintos ejes.

Lineación:

$$L = \frac{K_1}{K_2}$$

Foliación:

$$F = \frac{K_2}{K_3}$$

Desde un punto de vista geológico aquellas rocas con un valor de $L \gg 1$ indicarían que han sufrido una deformación intensa en dos direcciones, lo que se traduce como $\sigma_1 \approx \sigma_2 \gg \sigma_3$; los granos laminados rotan quedando su eje mayor paralelo a la dirección de máxima elongación. En cambio, valores de $F \gg 1$ son característicos de rocas con una deformación mayor en una sola dirección $\sigma_1 \gg \sigma_2 \approx \sigma_3$; de manera tal que los granos laminados o elongados tales como las micas o anfíboles giran hasta quedar paralelos al plano de aplastamiento.

La combinación de la lineación con la foliación define el parámetro de forma T.

$$T = [2 \ln (K_2/K_3) / \ln(K_1/K_3)] - 1 \text{ (Fig. 4.3)}$$

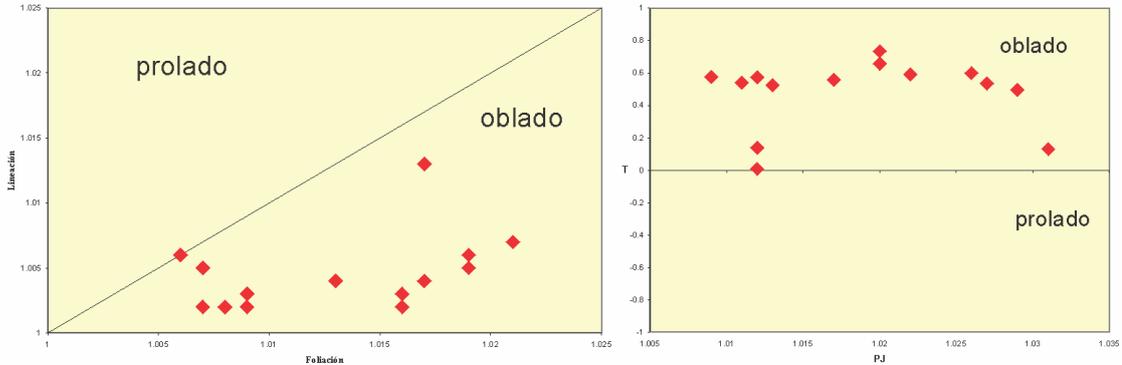


Figura 4.3: a) Relaciones existentes entre la Lineación y la Foliación: Gráfico de Flynn Foliación (K_2/K_3) vs Lineación (K_1/K_2); b) Grado de anisotropía P_j vs parámetro de forma T (Tarling y Hrouda, 1993). En las formas oblatas T tiene valor positivo y tiende a +1, mientras que las formas proladas tienden a -1. En cambio, en las formas triaxiales (elips. neutros), T tiende a 0.

De esta manera una esfera está representada por $T=0$, las formas oblatas corresponderían a valores de $0 < T < 1$, mientras que los valores negativos $-1 < T < 0$ a las proladas (Fig. 4.3).

4.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ANISOTROPÍA

La forma más simple y rápida de visualizar los datos obtenidos sobre las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad es a través de una red estereográfica (Fig. 4.4). Lo

más común es utilizar el hemisferio inferior y plotear los datos de $K_{m\acute{a}x}$, K_{int} y $K_{m\acute{i}n}$ con símbolos diferentes, para así poder distinguir la forma de los elipsoides y comparar fácilmente con datos estructurales: clivaje, fracturas, etc.

Para la cuantificación de la magnitud y forma del elipsoide de susceptibilidad, así como también la orientación espacial de sus ejes principales se utilizan los parámetros previamente descritos algunos de los cuales han sido más aceptados que otros. No obstante, la comparación de los mismos se debe restringir a muestras provenientes de la misma área y con propiedades similares, dado que la mayoría de estos parámetros aún no est n normalizados, lo que limita su uso entre localidades o litologías diferentes.

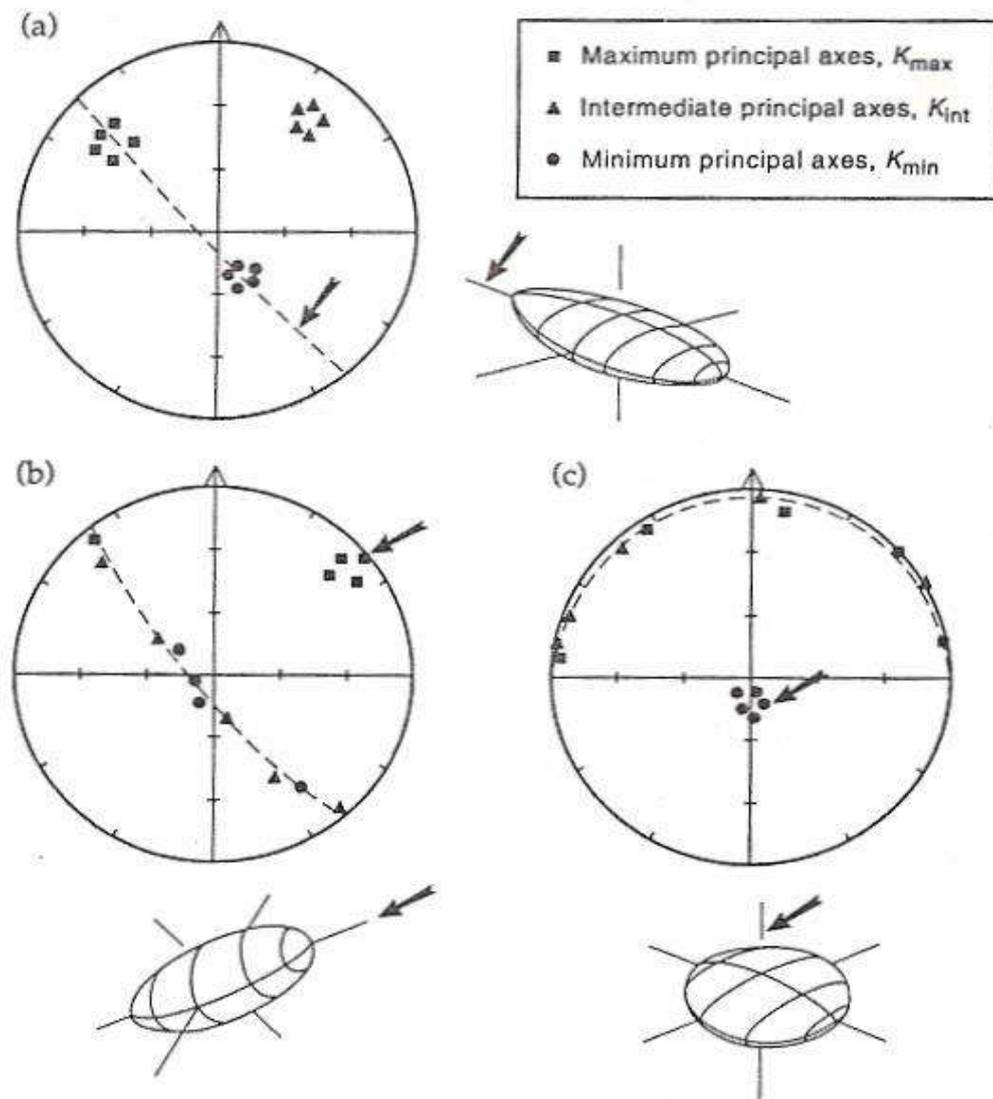


Figura 4.3: Datos direccionales ploteados sobre una red estereográfica: a) elipsoide triaxial con la misma orientación de los tres ejes principales; b) elipsoide prolado; c) elipsoide oblado. Tomado de Tarling y Hrouda (1993).

En rocas volcánicas el objetivo es relacionar las características de las estructuras fluidales impuestas por el flujo de lavas, con la forma de los cuerpos volcánicos y las direcciones principales de susceptibilidad (Fig. 4.4). Este comportamiento anisótropo de las rocas volcánicas parece estar relacionado principalmente con la orientación adquirida por las titanomagnetitas en el momento en que la lava estuvo fluyendo. Con posterioridad, la orientación original puede ser modificada como consecuencia de la contracción y/o acortamiento que se produce durante el enfriamiento de la lava. Las bajas anisotropías observadas permiten inferir un comportamiento de los elementos ferromagnéticos poco efectivo.

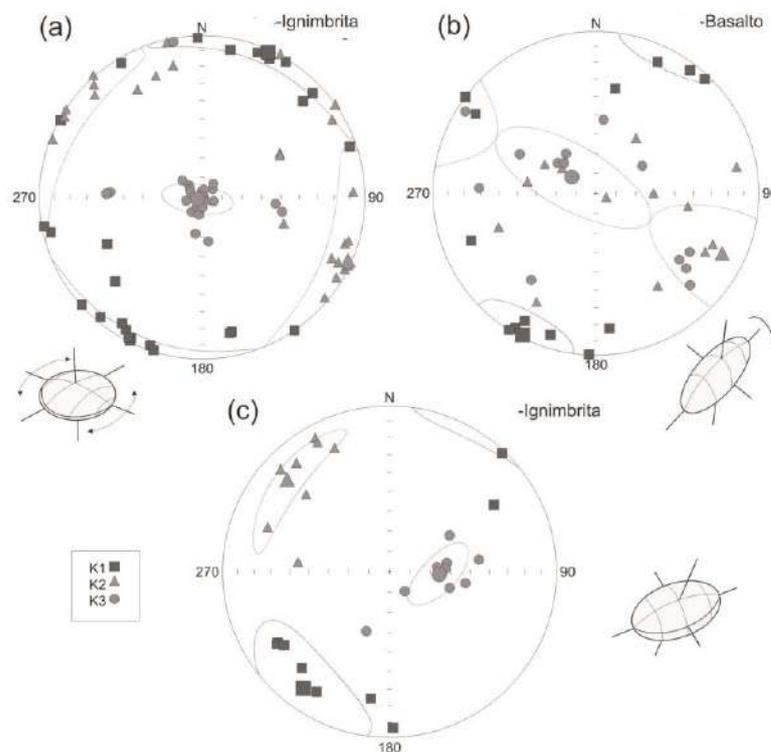


Figura 4.4: Ejemplos donde se comparan la AMS correspondientes a fábricas: (a) oblada con foliación horizontal, (b) Proladas, con ejes k1 subhorizontales, c) Triaxiales, los tres ejes del elipsoide en medias bien concentradas. Ejes k1, k2 y k3 (máximo, intermedio y mínimo) son cuadrados, triángulos y círculos respectivamente (Tomado de Caballero Miranda, 2011)

Actualmente resulta de interés considerable el uso de la anisotropía de la susceptibilidad magnética en geología estructural y tectónica, con el objetivo de diferenciar entre la fábrica magnética deposicional y aquella dada por la deformación dúctil teniendo en cuenta que la forma y orientación del elipsoide de susceptibilidad va cambiando en el transcurso de una deformación progresiva de sedimentos estratificados. Las susceptibilidades principales

normalmente se corresponden con las direcciones del esfuerzo principal, determinado a partir de técnicas convencionales.

4.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.4.1 Trabajo de Campo. Toma de muestras orientadas

Los métodos de muestreo son los mismos que para los estudios paleomagnéticos, los más frecuentes son en roca sólida, mediante el empleo de perforadoras portátiles. Cuando no es posible obtener los núcleos (cilindros) directamente en el campo, se toman muestras en bloques orientando un plano (se puede aprovechar un plano de estratificación, de flujo, fractura o diaclasa). Para orientar las muestras de mano se utilizaron dos brújulas, Brunton y brújula solar; Fig. 4.5). De esta forma se tomó con la brújula Brunton, la lectura relativa al rumbo del plano o azimut y su inclinación.



Figura 4.5: Toma de muestra de bloque. (a) Se elige una superficie plana para orientar la muestra de bloque, y se marca en ella la línea del rumbo del plano. (b) Orientación de la superficie plana con su rumbo e inclinación. (c) Se extiende la marca a todo lo largo de la muestra y se duplica en líneas paralelas, estas marcas serán las marcas fiduciaras de los núcleos cortados perpendicularmente al plano orientado (Tomado de Caballero Miranda, 2011).

Para el muestreo se definió una localidad y los sitios de muestreo, iniciando el perfil con rumbo $N40^{\circ}E$ intentando que la traza del perfil sea perpendicular a la estructura (ver Capítulo 3). Se recolectaron entre 3 y 4 muestras de mano orientadas por sitio a los que se les asignó las siglas LP. Se debe tener cuidado al anotar el sistema de orientación utilizado y seguir siempre el mismo, con el fin de efectuar luego las correcciones geográficas o de campo de esta forma obtener las mediciones del elipsoide de ASM referidas a coordenadas geográficas.

Para la hacer la marca de orientación de las muestras de mano se utilizó la regla de la mano derecha (la cara de la muestra debe inclinar hacia uno. Se debe colocar la pínula a la derecha. Se mide siempre con la aguja norte).

4.4.2 Trabajo en gabinete

Las tareas de laboratorio se llevaron a cabo en el Instituto de Geofísica “Daniel Valencio”, en la Facultad de ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Buenos Aires. Allí se realizaron todos los trabajos de preparación de los especímenes para su posterior medición, que consta de varios pasos.

Tratamiento de las muestras de mano

El primer paso sirve para la horizontalización de la cara orientada de la muestra. Esto se realiza colocando la muestra en un molde con cemento, acomodándola de manera tal que la cara orientada quede horizontal (Fig. 4.6). Adicionalmente se transfiere la marca de orientación al resto de la cara, lo cual será de utilidad en el siguiente paso.



Figura 4.6: Muestra de mano horizontalizada utilizando un molde de cemento, donde se observa la marca de orientación realizada en el campo y los orificios de los testigos obtenidos.

Preparación de los especímenes

Para la segunda parte del trabajo se utiliza una perforadora de gabinete (con una broca de diámetro estándar de 2,54 cm), para sacar los cilindros o “cores” de cada muestra de mano (Fig. 4.7 A) que se obtienen perpendiculares a la cara orientada.

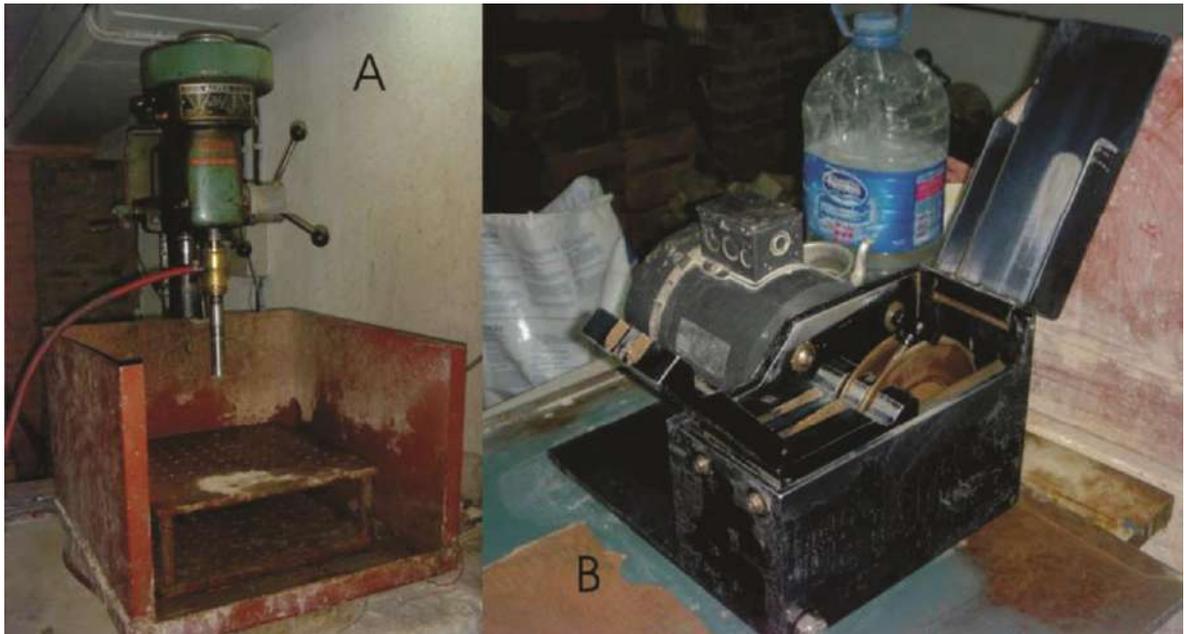


Figura 4.7: Imagen de la perforadora utilizada para extraer los cilindros (A) y de la rebanadora para cortarlos en especímenes estándar (B).

Luego se realiza la transferencia de la marca de orientación y nomenclatura para cada cilindro en diferentes partes del mismo (Fig. 4.8). Finalmente se procede a rebanar estos cilindros dando especímenes estándar de aproximadamente 2,2 cm de alto (Fig. 4.7 B). En base a la cantidad de especímenes disponibles por cada sitio de muestreo se seleccionaron los más adecuados para ser utilizados en los estudios de ASM.

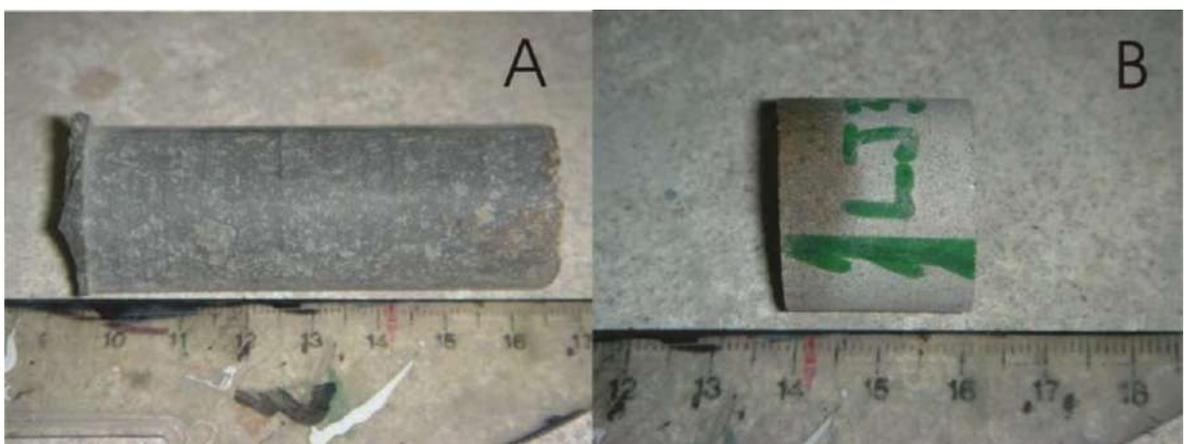


Figura 4.8: Cilindro extraído de la muestra de mano (A); espécimen de 2,2 cm de alto estándar con su respectiva marca de orientación y nomenclatura (B).

4.5 Medición de la anisotropía de la susceptibilidad magnética

La anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) fue medida utilizando un susceptibilímetro Kappabridge KLY-2.02 (Geofyzika Brno), actualmente disponible en el Laboratorio de Paleomagnetismo "D.A. Valencio" de la FCEyN (Fig. 4.9).



Figura 4.9: Susceptibilímetro Kappabridge KLY - 2.02 (Geofyzika Brno), utilizado para medir anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM).

El fundamento de la medición se basa en la aplicación de un campo magnético de baja intensidad sobre muestras orientadas en 15 posiciones distintas, con el objetivo de determinar cuál es la deformación que sufre la magnetización inducida adquirida por la muestra cuando el campo se aplica en las distintas direcciones.

El equipo trabaja los datos obtenidos con el software SAFYR.exe (Chadima y Jelinek, 2009) almacenados en archivos de texto (ASCII). En estos archivos guardan los datos de corrección de campo, las direcciones principales y sus respectivas susceptibilidades, además de los diferentes parámetros mencionados anteriormente (L, F, T).

Para poder plotear los datos direccionales sobre una red estereográfica se necesita realizar una conversión de los datos para adaptarlos al software de dibujo (Anisoft 4.2 pasado a Corel Draw; Chadima y Jelinek, 2009; ver Apéndice I).

Capítulo 5

RESULTADOS DE ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA OBTENIDOS

5. 1: Presentación de los resultados de ASM

A través de los resultados obtenidos se pretende aportar información para poder acotar los procesos geológicos que actuaron durante el emplazamiento y evolución en el tiempo del perfil analizado y compararlo con los resultados obtenidos en localidades vecinas. La fábrica magnética se determina a partir de la anisotropía en la susceptibilidad magnética, que está directamente relacionada con la petrofábrica de las rocas, de manera tal que puede ser utilizada para definir las condiciones físicas imperantes durante el proceso de formación y deformación de las mismas.

Descripción de la ASM de toda la población del Cerro las Piletas

El Cerro Las Piletas presenta una estructura de rumbo regional aproximado de N330°-340°/25°-30° (Fig. 3.1) y está dada por una foliación primaria magmática que representa el plano de los *fiammes* en la ignimbrita (Fig. 3.1; Fig. 3.2; Fig. 4.4). Para este trabajo se muestrearon diferentes niveles estratigráficos en una unidad con composición litológica y textural homogénea en un perfil perpendicular a la estratificación de rumbo N40°E. Las variaciones en los planos de estratificación están en la Tabla 1 del Capítulo 6.

Las direcciones principales de la ASM fueron calculadas y descritas en coordenadas geográficas y horizontalizadas. Los resultados de cada sitio muestran consistencia estadística.

Del análisis direccional en el Cerro Las Piletas de la fábrica magnética obtenida se ve que no presenta una impronta definida. Los ejes $K_{máx}$ de ASM tienden a disponerse groseramente paralelos al rumbo de las capas NO-SE y cercanos a la horizontal.

Los ejes K_{min} tienen a ser perpendiculares al plano de estratificación (K_{min} con la misma dirección que el polo de la capa) aunque presentan cierta imbricación respecto al plano, tendiendo a ubicarse hacia el O (Fig. 5.1).

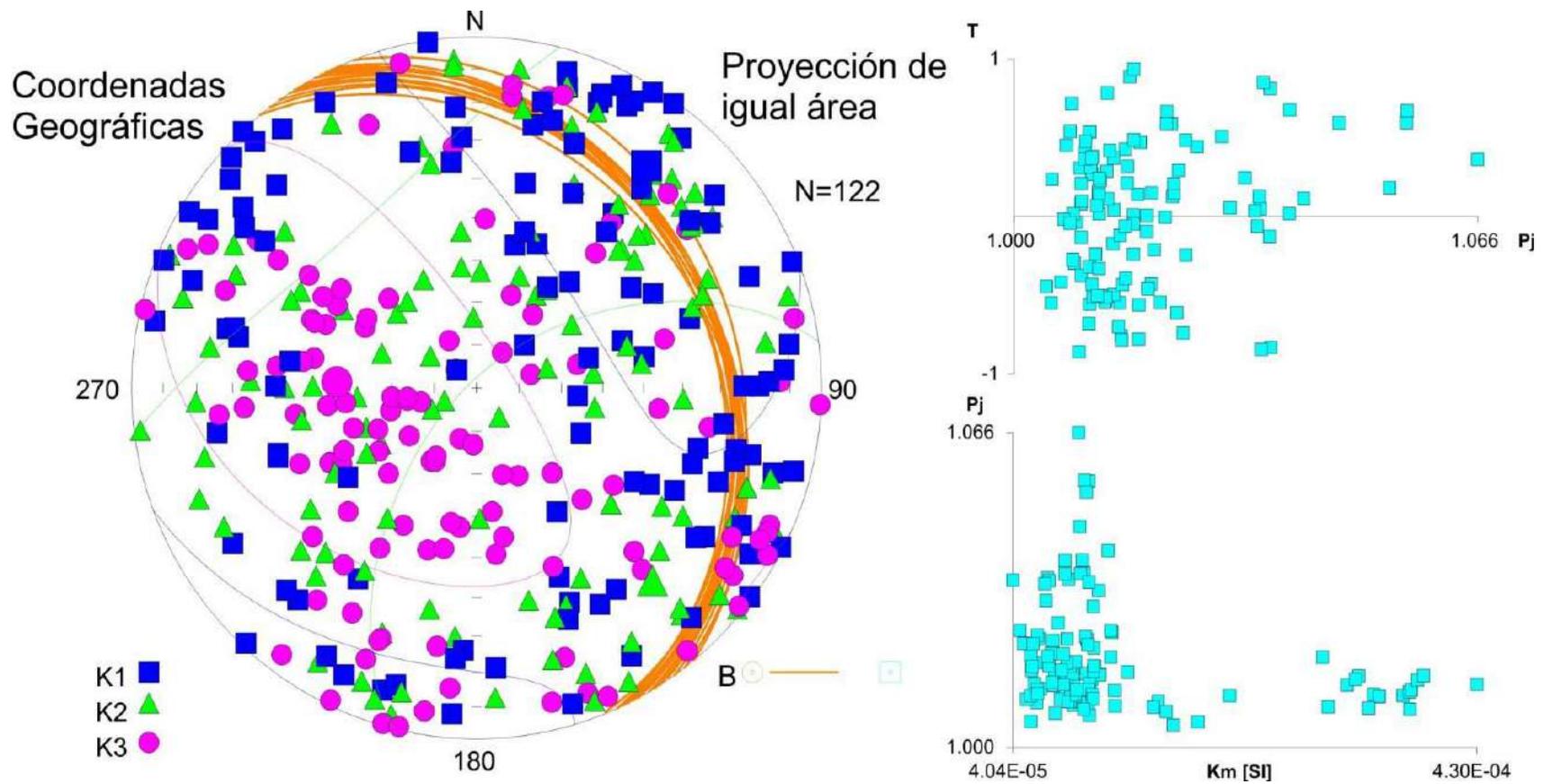


Figura 5.1: Representación de los ejes del elipsoide de anisotropía de susceptibilidad magnética para la localidad de Cerro Las Piletas “*in situ*”. Los ejes son máximo, intermedio y mínimo, ortogonales en una red de igual área representada en el hemisferio sur. Gráficos de Flinn (arriba) donde se muestra la relación entre el parámetro de forma T vs el grado de anisotropía Pj según Jelinek (1981). Abajo Km vs Pj. El grado de anisotropía es bajo <7%.

Cuando se realiza la corrección de estructura de los ejes de anisotropía (es decir cada eje se corrige llevando a la horizontal el plano de inclinación de la capa en la que fue obtenida cada muestra), se observa que hay una tendencia de los ejes K_{min} a ubicarse en el IV cuadrante con una inclinación de hasta 60° , significando que gran cantidad de los mismos se disponen con cierta imbricación respecto de las capas en las que fueron obtenidas las muestras (Fig. 5.2).

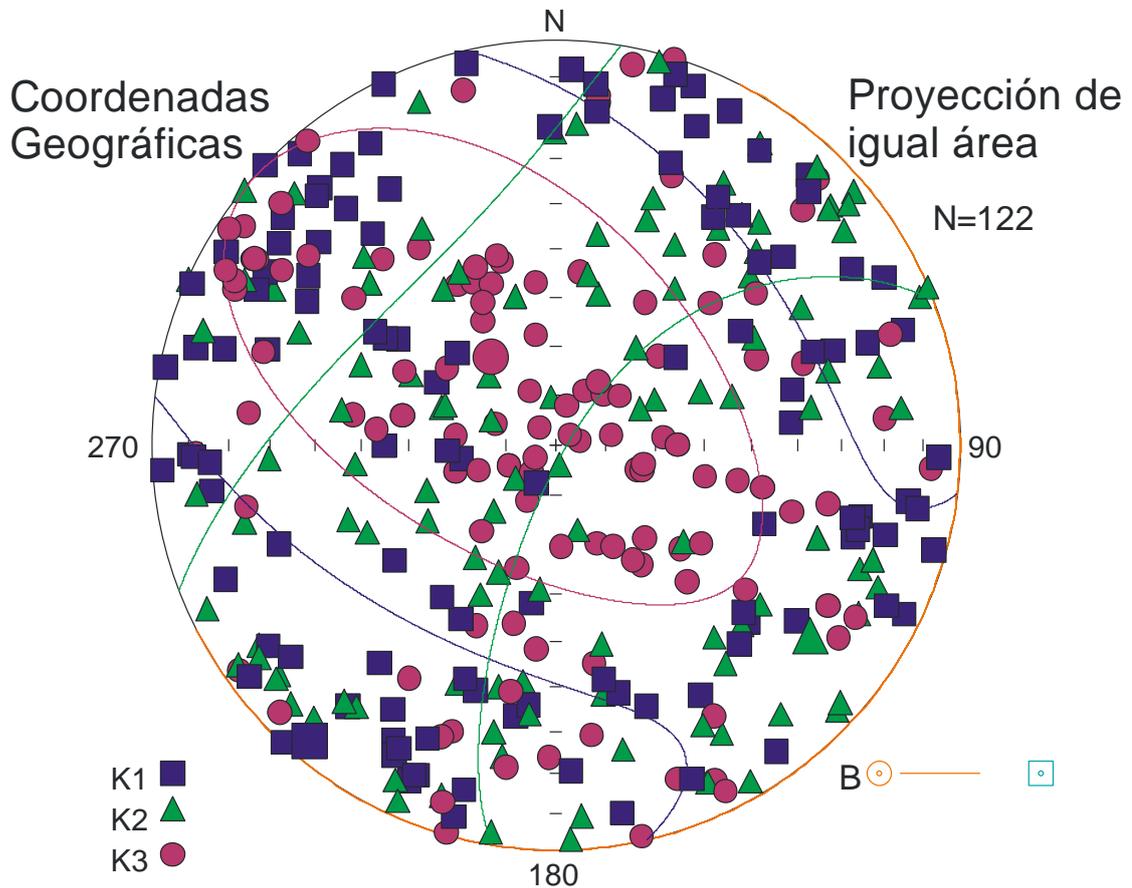


Figura 5.2: Corrección de estructura de los ejes de anisotropía magnética del perfil del Cerro Las Piletas. Se corrige cada eje llevando a la horizontal el plano de inclinación de la capa en la que fue obtenida cada muestra. Se observa que los ejes K_{min} en lugar de estar en la vertical, que sería la ubicación esperada para una ignimbrita tienden a disponerse en el IV cuadrante con una inclinación de hasta 60° , significando una imbricación de este eje.

Es interesante notar que si bien no hay dispersión en la inclinación de las capas si la hay en la distribución de los ejes. Del análisis escalar de las direcciones principales de ASM por sitios de muestreo surge que la mayoría de los sitios presentan fábricas obladas (T; Tabla 5.1 y Fig. 5.3) en concordancia con lo esperado para este tipo de rocas (ver ejemplo Fig. 4.4 a). La forma de los elipsoides definidos para cada espécimen puede ser tanto oblados como prolados (Figs. 5.1 y 5.3).

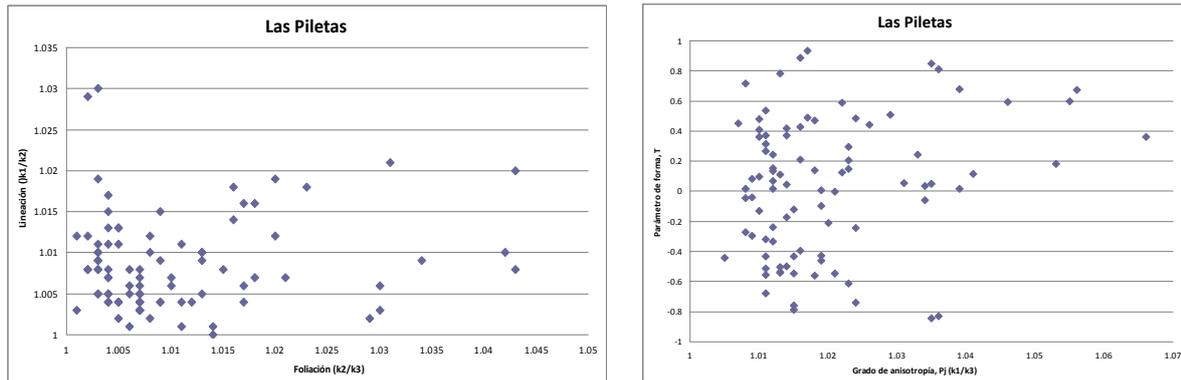


Figura 5.3: Graficos tipo Flinn de las relaciones axiales entre la Foliación vs la Lineación y del Grado de anisotropía Pj vs el Parámetro de Forma T (según Jelinek 1981) de donde surge que los especímenes pueden tener tanto fábricas obladas como proladas

El grado de anisotropía de estas rocas es bajo menor al 7% (Tabla 5.1) a pesar de tener un grado de soldamiento alto, típico en este tipo de rocas. La susceptibilidad media está por debajo de valores de $5E^{-4}$ indicando que la fábrica está portada por la fracción de paramagnéticos aunque no se ven claramente macro o microscópicamente y por hematita que es un constituyente mineral común en estas rocas. Aunque se diferencia un *cluster* con mayor susceptibilidad que corresponde a los sitios LP10, LP11 y LP12.

Descripción sitio por sitio de la ASM del Cerro las Piletas

En esta localidad de muestreo se tomaron 15 sitios de base a techo estratigráficamente que se denominaron secuencialmente LP1 a LP15 en un perfil de rumbo SO-NE perpendicular a la estructura general del cerro. Las descripciones se realizaron sobre una red estereográfica de igual área (hemisferio inferior) en coordenadas geográficas “*in situ*” donde las direcciones axiales K_{max} , K_{int} y K_{min} están ploteadas como cuadrados, triángulos y círculos respectivamente, junto con sus elipses de error y el plano de estratificación.

LP1

En este sitio se midieron 10 especímenes de los cuales se consideraron 7 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo prolada a triaxial con el eje $K_{máx}$ en el este con una inclinación de 35° contenido en el plano de estratificación. Mientras que los ejes K_{int} y K_{min} , tienden a formar una guirnalda perpendicular al $K_{máx}$ de rumbo N-S, aunque el eje K_{min} tiende a estar desplazado hacia el cuadrante NO. La susceptibilidad es menor que $10E^{-5}$, y el grado de anisotropía < que 2% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP2

En este sitio se midieron 9 especímenes de los cuales se consideraron 6 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo triaxial a “oblada anormal”. Los ejes $K_{máx}$ y K_{min} parecen estar contenidos en el plano de estratificación mientras que el eje K_{int} está cercano al polo de dicho plano, sugiriendo que hay una inversión de los ejes K_{int} y K_{min} . El eje K_{int} tiende a estar desplazado de la vertical hacia el O. La susceptibilidad es menor que $9E^{-5}$, y el grado de anisotropía < que 4% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP3

En este sitio se midieron 6 especímenes de los cuales se consideraron 5 para su interpretación. Hay dispersión interna entre los datos, aun así parece conformar una fábrica de tipo prolada con el eje $K_{máx}$ contenido en el plano de estratificación en dirección N-S grosera. Mientras que los ejes K_{int} y K_{min} , tienden a formar una guirnalda perpendicular de rumbo ONO-ESE. El eje K_{min} tiende a ubicarse cercano al polo del plano de estratificación pero desplazado hacia el cuadrante NO. La susceptibilidad es menor que $9E^{-5}$, y el grado de anisotropía < que 1% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP4

En este sitio se midieron 8 especímenes de los cuales se consideraron 6 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo oblada a triaxial con muy buena consistencia interna. El eje $K_{máx}$ tiende a estar hacia el NE y está contenido junto con el K_{int} en el plano de estratificación. El eje K_{min} tiende a ubicarse cercano al polo del plano de estratificación. La susceptibilidad es menor que $11E^{-5}$, y el grado de anisotropía < que 2% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP5

En este sitio se midieron 7 especímenes de los cuales se consideraron 5 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo triaxial a oblada con buena consistencia interna. El eje $K_{máx}$ tiende a estar hacia el SSO, el K_{int} hacia el E y el K_{min} hacia el NO. Ninguno de los tres ejes parece estar relacionado ni con el plano ni con el polo del plano de estratificación. La susceptibilidad es menor que $10E^{-5}$, y el grado de anisotropía < que 3% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

Sitios	<i>Parámetros de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética</i>					<i>Medias eigenvectors</i>			
	N	Kmedia	Foliación	L	F	Pj	T	$K_{máx}$	K_{min}
		($\times 10^{-5}$)	Rumbo/Inc	K1/K2	K2/K3			Dec/Inc	Dec/Inc
LP1	10/7	8,3	339/25	1,0090	1,0030	1,0130	-0,4790	085/33	319/42
LP2	9/6	9,08	336/30	1,0070	1,0300	1,0390	0,6760	030/07	121/07
LP3	6/5	8,54	328/31	1,0030	1,0020	1,0050	-0,3730	009/02	275/55
LP4	8/6	10.7	333/29	1,0090	1,0100	1,0190	0,0670	027/15	239/72
LP5	7/6	9.10	323/30	1,0120	1,0140	1,0270	0,0690	195/14	292/28
LP6	8/6	6.0	329/29	1.011	1.0260	1,0370	0,4090	103/41	263/47
LP7	10/7	6.37	334/30	1,0120	1,0010	1,0140	-0,7890	049/62	149/05
LP8	7/5	11.1	327/31	1,0020	1,0100	1,0130	0,5910	330/26	199/53
LP9	10/9	10.3	330/30	1,0020	1,0020	1,0040	0,1780	171/07	265/30
LP10	8/6	35.5	332/29	1,0070	1,0020	1,0090	-0,5260	023/18	231/70
LP11	7/6	16.9	332/32	1,0040	1,0010	1,0050	-0,5010	112/02	018/55
LP12	8/6	34	336/30	1,0070	1,0050	1,0110	-0,1700	320/01	227/66
LP13	7/5	10.4	321/33	1,0040	1,0170	1,0220	0,6010	152/32	292/51
LP14	7/5	9.32	325/31	1,0090	1,0030	1,0120	-0,5030	114/02	205/28
LP15	9/5	7.05	335/32	1,0040	1,0120	1,0160	0,5150	271/28	176/09

Tabla 5.1: Parámetros de Anisotropía de susceptibilidad magnética. N/n: número de especímenes medidos/utilizados en el cálculo de la media, L: lineación y F: foliación magnética; Pj y T: grado de anisotropía y parámetro de forma calculados según la estadística de Jelinek (1981); posición de las medias de los ejes $K_{máx}$ y K_{min}

LP6

En este sitio se midieron 8 especímenes de los cuales se consideraron 6 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo oblada con baja consistencia interna debido a una posible inversión de los ejes. Los ejes $K_{m\acute{a}x}$ y K_{int} parecen conformar una guirnalda subparalela al plano de estratificación y el eje K_{min} tiende a ser paralelo al polo del plano de estratificación con cierta imbricación. La susceptibilidad es de $6E^{-5}$, y el grado de anisotropía $<$ que 4% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP7

En este sitio se midieron 10 especímenes de los cuales se consideraron 7 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo prolada con buena consistencia interna. El eje $K_{m\acute{a}x}$ está bien agrupado en el cuadrante NE y los ejes K_{int} y K_{min} se agrupan en una guirnalda de rumbo NO-SE. Esta disposición de los ejes presenta oblicuidad respecto al plano de estratificación. Es posible que haya también cierta inversión de ejes K_{int} y K_{min} . La susceptibilidad es menor de $7E^{-5}$, y el grado de anisotropía $<$ que 2% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP8

En este sitio se midieron 7 especímenes de los cuales se consideraron 5 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo oblada con buena consistencia interna. El eje K_{min} está bien agrupado hacia el S con una inclinación de 53° . Los ejes $K_{m\acute{a}x}$ y K_{int} se agrupan en una guirnalda de rumbo NO-SE subparalela al plano de estratificación. Esta disposición de los ejes presenta oblicuidad con respecto a dicho plano. La susceptibilidad es menor de $12E^{-5}$, y el grado de anisotropía $<$ que 1,5% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP9

En este sitio se midieron 10 especímenes de los cuales se consideraron 9 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo oblada con buena consistencia interna aunque hay algunos ejes invertidos. El eje K_{min} está bien agrupado en el O con una inclinación de 60° subparalelo al polo del plano de estratificación. Los ejes $K_{m\acute{a}x}$ y K_{int} se agrupan groseramente en una guirnalda de rumbo NO-SE subparalela al plano de estratificación. La susceptibilidad es menor de $11E^{-5}$ y el grado de anisotropía es del 1% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

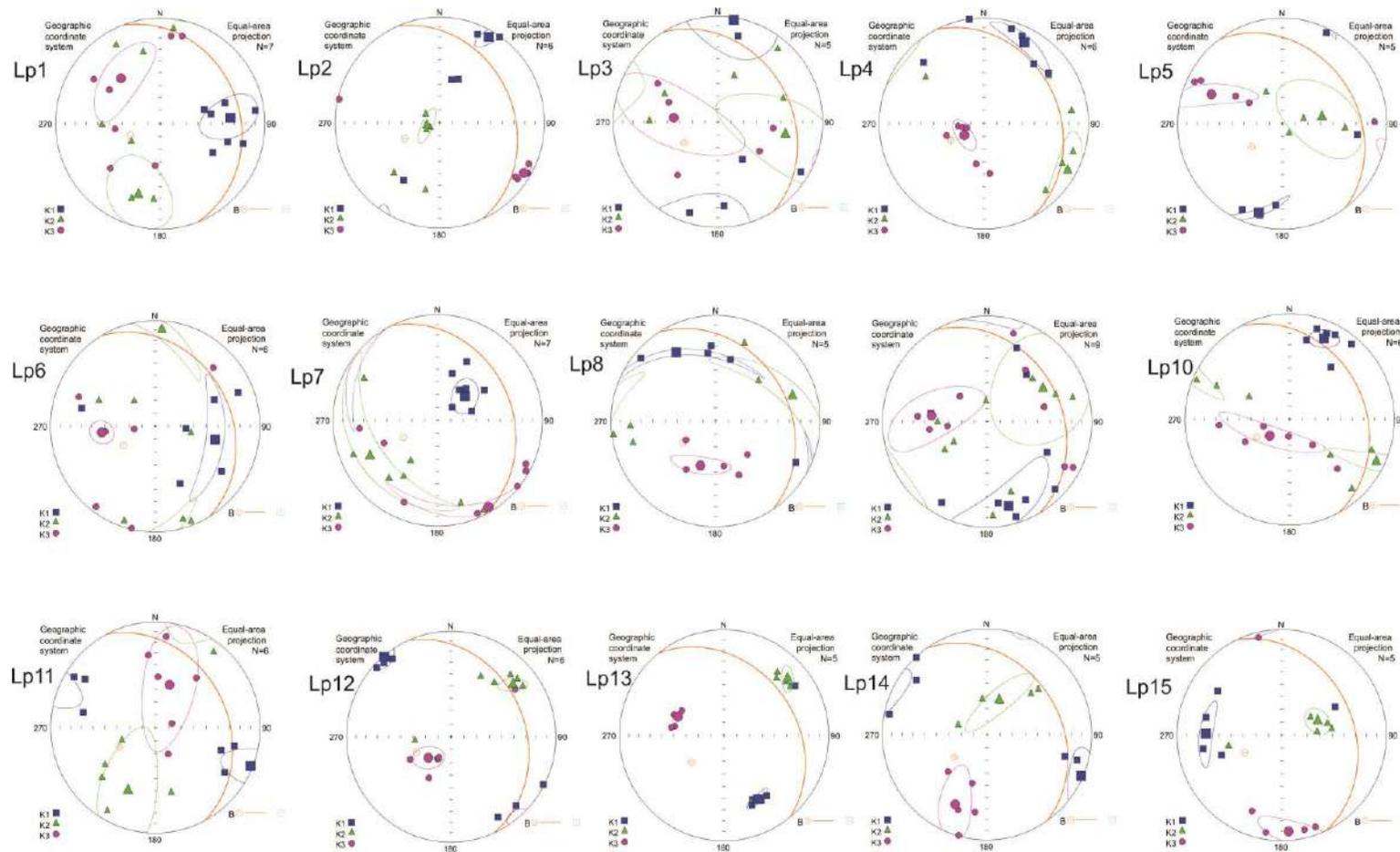


Figura 5.4: Proyecciones estereográficas “*in situ*” de los sitios LP en donde las direcciones axiales K_{max} , K_{int} y K_{min} están ploteadas en una red estereográfica de igual área (hemisferio inferior) como cuadrados, triángulos y círculos respectivamente, junto con sus elipses de error y plano de estratificación (ver también en el Anexo).

LP10

En este sitio se midieron 8 especímenes de los cuales se consideraron 6 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo prolada con buena consistencia interna. El eje $K_{m\acute{a}x}$ esta agrupado en el N-NE y contenido sobre el plano de estratificación. Los ejes K_{int} y K_{min} tienden a disponerse en una guirnalda de rumbo ONO-ESE. El eje K_{min} es cercano al polo del plano de estratificación. La susceptibilidad es menor de $36 E^{-5}$, y el grado de anisotropía $<$ que 1% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP11

En este sitio se midieron 7 especímenes de los cuales se consideraron 6 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo prolada a triaxial con relativa buena consistencia interna. El eje $K_{m\acute{a}x}$ esta agrupado en el SEE-NOO. Los ejes K_{int} y K_{min} tienden a disponerse en una guirnalda de rumbo N-S. La susceptibilidad es menor de $17E^{-5}$, y el grado de anisotropía $<$ que 1% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP12

En este sitio se midieron 8 especímenes de los cuales se consideraron 6 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo triaxial con muy buena consistencia interna. El eje $K_{m\acute{a}x}$ esta agrupado en el SE-NO mientras que el eje K_{int} está en el NE contenido sobre el plano de estratificación y el eje K_{min} está en el cuadrante SO y es paralelo al polo del plano de estratificación. La susceptibilidad es menor de $34E^{-5}$, y el grado de anisotropía de 1% (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP13

En este sitio se midieron 7 especímenes de los cuales se consideraron 5 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo triaxial con muy buena consistencia interna. El eje $K_{m\acute{a}x}$ esta agrupado en el cuadrante SE, el eje K_{int} en el cuadrante NE y contenido sobre el plano de estratificación y el eje K_{min} está en el cuadrante NO y es oblicuo al polo del plano de estratificación. La susceptibilidad es menor de $11E^{-5}$ y el grado de anisotropía $<3\%$ (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP14

En este sitio se midieron 7 especímenes de los cuales se consideraron 5 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo triaxial con muy buena consistencia interna. El eje $K_{m\acute{a}x}$ está agrupado en el ESE, el eje K_{int} en NNE y el eje K_{min} en el S y oblicuo respecto al polo del plano de estratificación. La susceptibilidad es menor de $10E^{-5}$ y el grado de anisotropía $<2\%$ (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

LP15

En este sitio se midieron 9 especímenes de los cuales se consideraron 5 para su interpretación. Presenta una fábrica de tipo triaxial con muy buena consistencia interna. El eje $K_{máx}$ esta agrupado en el O cercano al polo del plano de estratificación. El eje K_{int} está en el E y el eje K_{min} en el S. Puede haber inversión de algunos de los ejes. No hay una relación clara con el plano de estratificación. La susceptibilidad es de $7E^{-5}$ y el grado de anisotropía $<2\%$ (Tabla 5.1; Anexo 1; Fig. 5.4).

Capítulo 6

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

Con los resultados obtenidos se pueden realizar algunas consideraciones generales de la disposición “*in situ*” de los ejes de ASM (Figs. 5.3 y 5.4). La fábrica teórica esperada para este tipo de rocas es de tipo oblada (Fig. 4.4), sin embargo en esta localidad se observa que la fábrica cambia de sitio en sitio aunque existen algunos rasgos comunes entre ellos. En los sitios LP4, LP6, LP8 y LP9 la fábrica es de tipo oblada (Fig. 5.4) y el eje K_{min} tiende a relacionarse con el polo del plano de estratificación dando aunque con cierta imbricación, o sea que no coincide totalmente con el mismo, o bien puede ocurrir que no presenten ningún tipo de relación (por ejemplo en LP5; Fig. 5.4). Muchos sitios analizados tienen arreglos prolados como LP1, LP7 y LP10 (Fig. 5.4) o triaxiales como LP2, LP12, LP13, LP14 y LP15 (Fig. 5.4), estos últimos se dan sobretodo en el techo de la secuencia. También hay algunos sitios con fábricas menos definidas como LP3 y LP11 (Fig. 5.4). Es común que se dé la inversión de los ejes del elipsoide dado que el grado de anisotropía es bajo, menor de 7% indicando una baja excentricidad del mismo, o sea ejes muy similares entre sí y que se pueden intercambiar.

El rasgo macroscópico más fuerte en estas rocas es la fluidalidad primaria que debería reflejarse como el rasgo textural sobresaliente en la fábrica magnética, sin embargo esto no parece ser así, dado que cada sitio de muestreo tiene su propia impronta. Es posible que las diferencias encontradas en la fábrica entre los distintos sitios se deban a las características intrínsecas de cada uno de los flujos piroclásticos como podrían ser variaciones en la dirección del magma, velocidad, viscosidad, compactación diferencial dependiendo de la ubicación estratigráfica dentro del perfil, desvitrificación o bien inversión de ejes del elipsoide de ASM.

La susceptibilidad magnética presenta valores menores que 5×10^{-4} , salvo en los sitios 10, 11 y 12, que sobresalen de la media y el grado de anisotropía P_j es menor del 7% (Fig. 5.3). Estos valores de susceptibilidad y P_j tan bajos son indicativos de bajo contenido de minerales ferromagnéticos como la magnetita. Esto indica que la fábrica magnética posiblemente está portada por la fracción de paramagnéticos (aunque no se ven claramente macro o

microscópicamente) y por hematita que es un constituyente mineral común en estas rocas. El tipo de anisotropía que se desarrolla en rocas con hematita del sistema hexagonal, son de tipo magnetocristalina que presentan un eje fácil de magnetización. En aquellos sitios donde aumenta un poco más la susceptibilidad es posible que haya pequeñas cantidades de magnetita como mineral accesorio o bien como inclusiones opacas en los vitroclastos.

Las rocas volcánicas o volcanoclásticas pueden presentar fábricas de ASM planares como consecuencia del aplastamiento por carga, donde el eje K_{min} (polo del plano de foliación magnética) es perpendicular al plano de estratificación (fig. 6.1). En estos casos no es posible identificar direcciones de flujo. También pueden presentar fábricas de tipo imbricadas, donde el plano de foliación magnética se relaciona con la dirección del flujo magmático, en este último caso, se pueden distinguir dos situaciones teóricas: imbricación positiva o imbricación negativa. En la primera, el eje K_{min} (polo del plano de foliación magnética) apunta hacia la dirección del flujo, mientras que en las imbricaciones negativas, apunta hacia la fuente del flujo (figura 6.2).

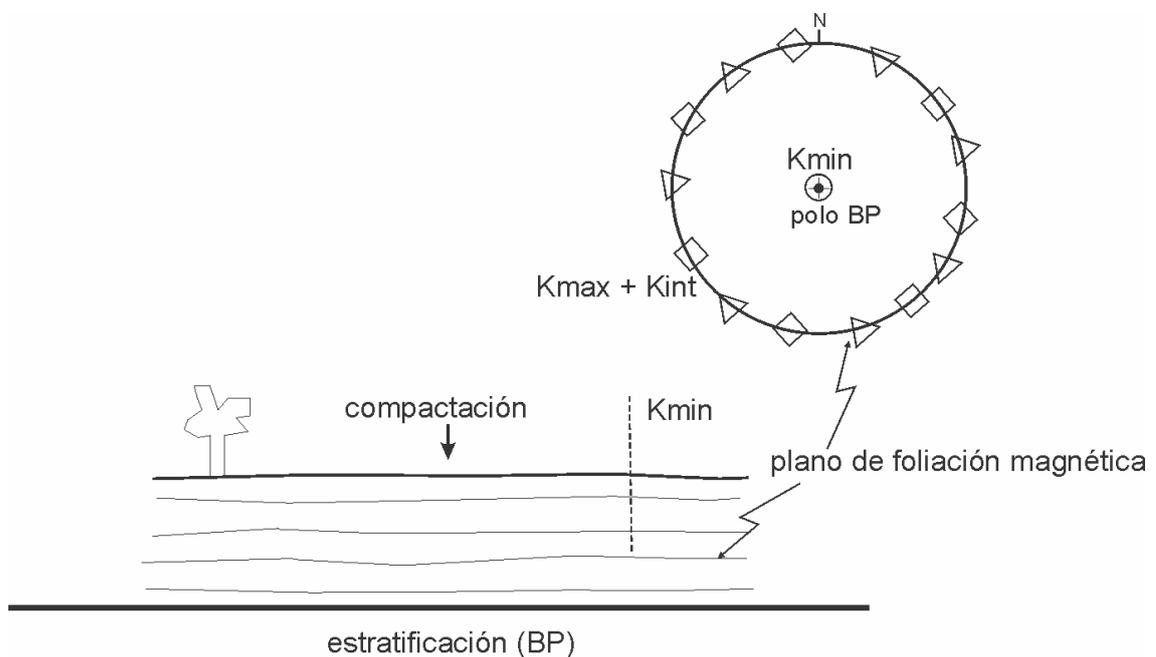


Figura 6.1: Esquema de distribución teórica de los ejes direccionales del elipsoide de ASM para una roca con fábrica de aplastamiento sin imbricación

Cómo las imbricaciones se miden con respecto al plano de fluencia del material, las fábricas magnéticas se evaluaron llevando el plano de estratificación observado en el campo

(Azimut/Inclinación: 330/30) a la horizontal, asumiendo que el mismo es el de fluencia. Esto fue realizado para poder interpretar los rasgos direccionales del elipsoide de AMS, o sea la imbricación del eje K_{min} (polo del plano de foliación magnética) en función de las direcciones de flujo (Fig. 6.3).

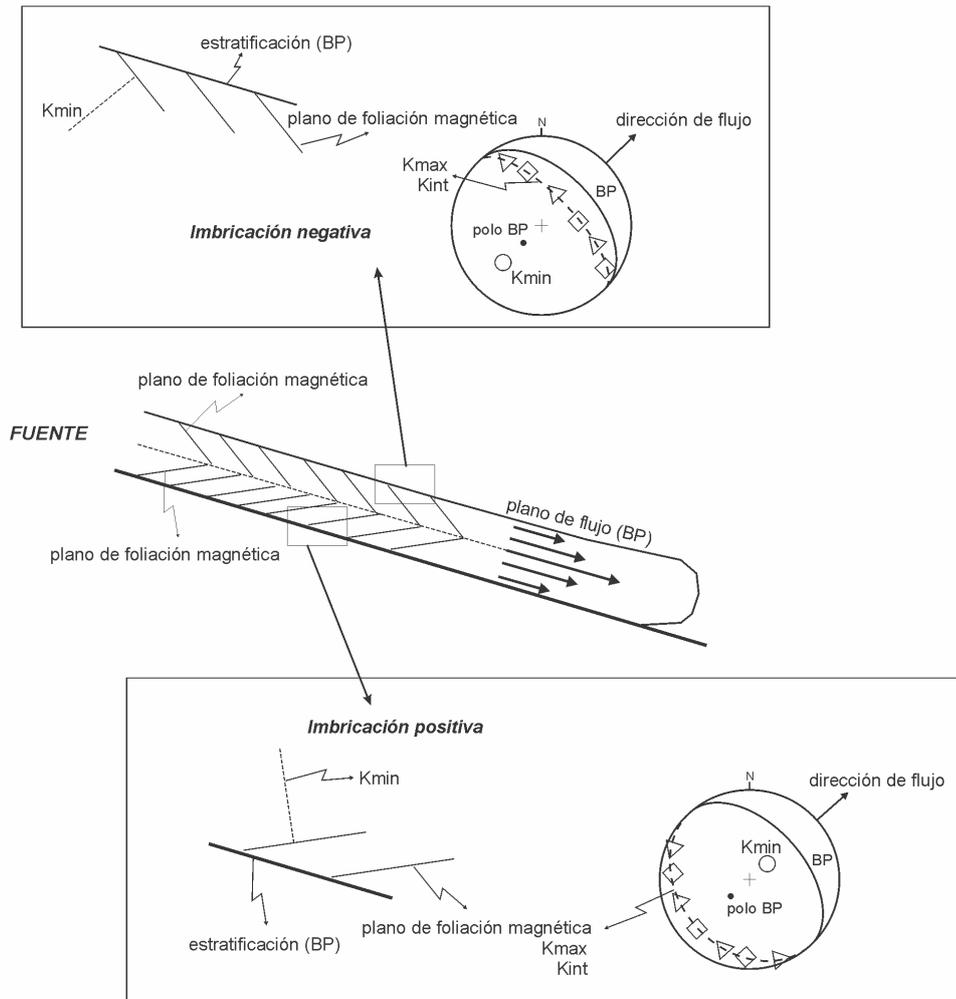


Figura 6.2: Esquemas de distribución teóricos de los ejes direccionales del elipsoide de ASM para una roca con: imbricación positiva y con imbricación negativa

El análisis de las direcciones de flujos, se hizo solo en los elipsoides donde la imbricación de los ejes K_{min} es más clara. En términos generales, estas direcciones se ubican en la diagonal NO-SE con una tendencia del sentido del flujo hacia el NO (Fig. 6.3). O sea indicando un área fuente desde el SE. Estas direcciones de inclinación hacia el NO se interpretaron como imbricaciones positivas (Fig. 6.2). En algunos sitios situados hacia el techo de la secuencia (sitios Lp11, Lp12, lp14 y Lp15; Fig. 6.3) la imbricación del eje K_{min} es hacia el SE, o sea en

sentido contrario a los anteriores aunque indicando también flujo hacia el NO: imbricación negativa (Fig. 6.2). Estos casos pueden ser debidos a un aporte de flujo por el interior o por debajo de otro flujo previo más consolidado y por lo tanto la fluencia fue con mayor rozamiento (Fig. 6.2). En algunos casos también, es común que los ejes $K_{máx}$ sean perpendiculares a la dirección del flujo y con forma más prolada como si estuvieran rodando.

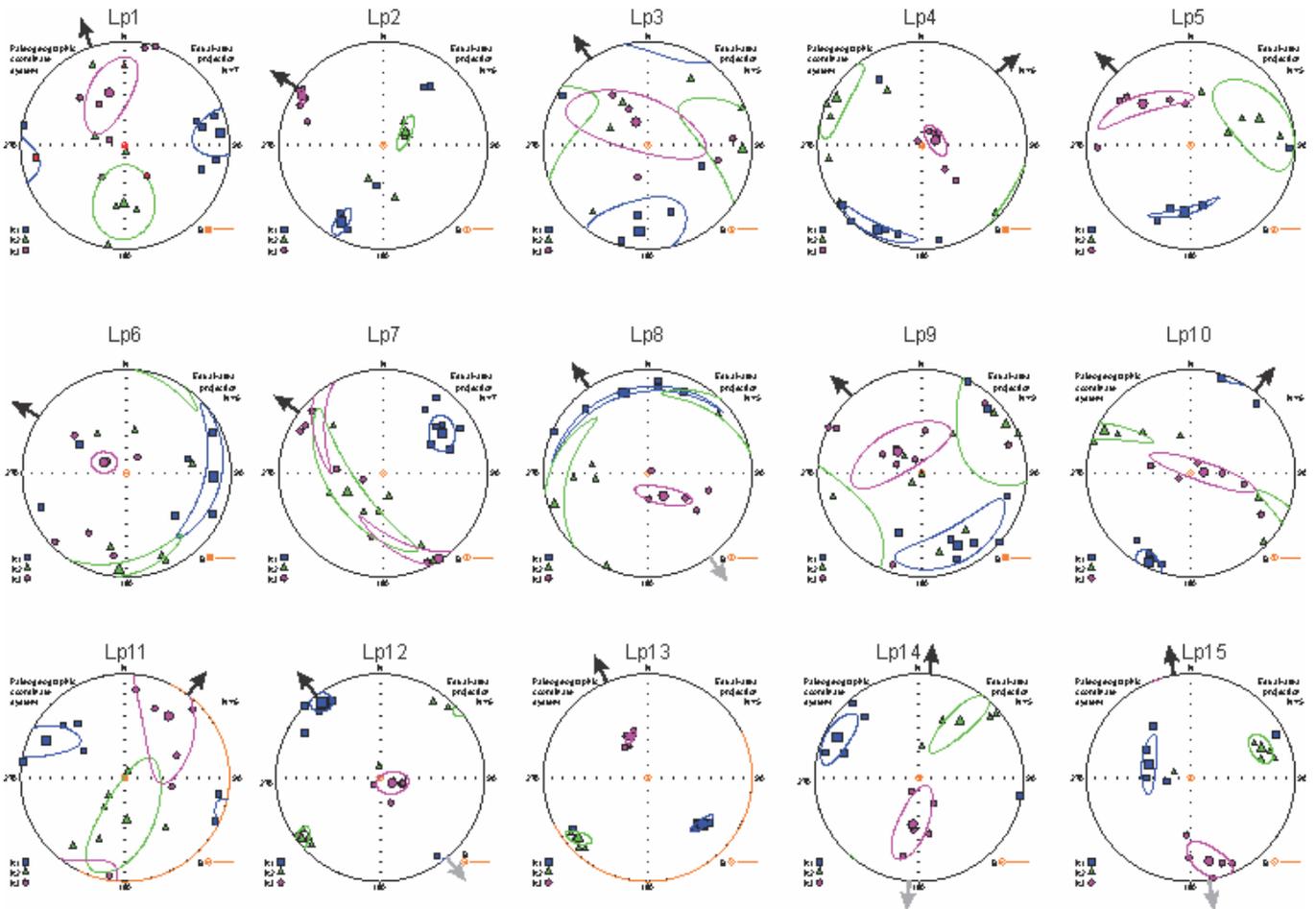


Figura 6.3: Proyecciones estereográficas de los sitios LP en donde las direcciones axiales K_{max} , K_{int} y K_{min} están ploteadas en una red estereográfica de igual área (hemisferio inferior), junto con sus elipses de error y plano de estratificación llevados a la horizontal, para poder visualizar el sentido de imbricación del eje K_{min} de ASM e interpretarlo en términos de dirección y sentido del flujo magmático

Si la inclinación de los planos de estratificación fuera de origen primaria (o sea volcánica), sería esperable que las direcciones de flujo halladas fueran hacia el NE, o sea en el mismo sentido de inclinación del plano de estratificación. Sin embargo, las direcciones halladas están en la diagonal NO-SE, mientras que el plano de estratificación inclina hacia el NE, indicando que la inclinación de la estratificación no es primaria

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES DE LOS RESULTADOS DE ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA OBTENIDOS EN EL CERRO LAS PILETAS-LA PAMPA

- El Cerro Las Piletas presenta una estructura de rumbo regional aproximado de Azimut: 340° / Inclinación: 25° - 30° y está dada por una foliación magmática que representa el plano de los fiammes en la ignimbrita.
- Del análisis escalar de las direcciones principales de ASM surge que la mayoría de los sitios presentan fábricas obladas en concordancia con lo esperado para este tipo de rocas.
- El grado de anisotropía de estas rocas es bajo menor al 7% a pesar de tener un grado de soldamiento alto.
- La susceptibilidad media está por debajo de valores de $5E^{-4}$ indicando que la fábrica está portada por la fracción de paramagnéticos aunque no se ven claramente macro o microscópicamente y por hematita que es un constituyente mineral común en estas rocas. En aquellos sitios donde aumenta un poco más la susceptibilidad es posible que haya pequeñas cantidades de magnetita como mineral accesorio o bien como inclusiones opacas en los vitroclastos.
- La mayoría de los sitios muestran buena consistencia estadística, aunque la fábrica cambia de sitio en sitio aunque hay algunos rasgos comunes entre ellos.
- Del análisis direccional de la fábrica magnética obtenida se ve que hay una tendencia definida. Los ejes $K_{m\acute{a}x}$ de ASM tienden a estar contenidos en el plano de estratificación de las capas de rumbo NO-SE y cercanos a la horizontal. Los ejes $K_{m\acute{i}n}$ tienden a ser paralelos al polo del plano de estratificación pero presentan cierta imbricación, tendiendo a ubicarse hacia el **O-NO** con una inclinación de hasta 60° .
- Es común que se dé la inversión de los ejes del elipsoide dado que el grado de anisotropía es bajo, menor de 7 % indicando una baja excentricidad del mismo, o sea ejes muy similares entre sí que se pueden mezclar. Cuando se lleva a la horizontal el plano de inclinación de la capa la imbricación de los ejes $K_{m\acute{i}n}$ es más clara. En términos generales, estas direcciones se ubican en la diagonal NO-SE con una tendencia del

sentido del flujo hacia el NO. O sea indicando un área fuente desde el SE. Estas direcciones de inclinación hacia el NO se interpretaron como imbricaciones positivas.

- En algunos sitios situados hacia el techo de la secuencia la imbricación del eje K_{min} es hacia el SE, o sea en sentido contrario a los anteriores aunque indicando también flujo hacia el NO: imbricación negativa, que pueden deberse a un aporte de flujo por el interior o por debajo de otro flujo previo más consolidado y por lo tanto la fluencia fue con mayor rozamiento.
- En algunos casos es común que los ejes K_{max} sean perpendiculares a la dirección del flujo y con forma más prolada como si hubieran rodado.
- Las direcciones de flujo halladas están en la diagonal NO-SE, mientras que el plano de estratificación inclina hacia el NE, indicando que la inclinación de la estratificación no es primaria. Esto permitiría inferir que dicho plano de estratificación estaría vinculado a un basculamiento posterior a su emplazamiento con una dirección del esfuerzo principal máximo de orientación SO-NE consistente con la dirección de acortamiento regional y con las interpretaciones estructurales y de la fábrica magnética regionales realizadas en otras localidades vecinas como Carapacha (Tomezzoli et al., 2006) o Sierra de la Ventana (Arzadún et al., 2010). También es posible inferir que la zona fuente del magma se podría encontrar en la Sierra de Choique Mahuida de similar edad (Linares et al., 1980) ubicada hacia el SE del Cerro Las Piletas.
- De manera tal que se interpreta que la complejidad de la fábrica magnética en la localidad de Las Piletas es consecuencia de una superposición de factores relacionados con las características reológicas propias de cada efusión magmática. Aquellos sitios donde las fábricas se presentan más “desordenadas” es posible que hayan experimentado procesos de desvitrificación intensos que obliteraron la fábrica primaria. Mientras que otros sitios simplemente presentan inversión de ejes del elipsoide de ASM, o bien cambios en el sentido de proveniencia de los flujos debido a variaciones en las fuerzas internas del flujo por cambios de velocidad, viscosidad o ubicación estratigráfica dentro del perfil. La presencia de cristaloclastos que aumentan hacia el techo puede que interfieran como puntos de anclajes en la matriz evitando o desfavoreciendo el desarrollo de una fábrica oblada típica.

AGRADECIMIENTOS

- **A la Universidad Nacional de La Pampa.**
- **A mi Directora, Renata Tomezzoli**
- **A mi Co- Director Hugo Tickyj**
- **A Leo y Juan Cruz, quienes me ayudaron muchísimo en el campo**
- **A Leandro, que me ayudo con la preparación de muestras y análisis de laboratorio.**
- **A mis amigas y amigos que estuvieron siempre presente.**
- **A mi familia.**

Bibliografía

- Arzadún, G., Tomezzoli, R.N. y Cesaretti, N.N. 2011. Análisis de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) en la Formación Tunas, Sierras Australes de provincia de Buenos Aires, Argentina. *Latinmag Letters* 1, Volumen Especial, D15: 1-6, Tandil.
- Butler, R.F. 1992. *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes*. Blackwell Scientific Publications, 319 p., Boston.
- Caballero-Miranda, C.I., 2011. La fábrica magnética a partir de la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS): sus bases generales y ejemplos como auxiliar para determinar direcciones, fuentes y dinámicas de flujo. *Monografías del Instituto de Geofísica N°16*, 60 pp.
http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/temas/Monografia_16.pdf
- Chadima M. y Jelinek V., 2009. *Anisoft 4.2: Anisotropy Data Browser for Windows*. Agico, Inc.
- Du Toit, A., 1927. A geological comparison of South America with South Africa, Carnegie Institute of Washington Publications, 381, 1–157. Washington.
- Espejo, P.M. y Silva Nieto, D.G., 1996. Hoja Geológica 3966-II Puelches (1:250.000), Provincias de La Pampa y Río Negro. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Boletín 216: 1-35. Buenos Aires.
- Groeber, P., 1929. Líneas fundamentales de la geología del Neuquén, sur de Mendoza y regiones adyacentes. Dirección Nacional de Minas, Geología e Hidrogeología, publicación 58. Buenos Aires.
- Keidel, J., 1916. La geología de las sierras de la Provincia de Buenos Aires y sus relaciones con las montañas del Cabo y los Andes. Ministerio de Agricultura Nacional, Anales Dirección Nacional de Geología y Minería. IX (3), Buenos Aires.
- Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics, *Geophys. Sum.*, 5, 37-82.
- Jelinek V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79:63-70.
- Linares, E., Llambías, E.J. y Latorre, C. O., 1980. Geología de la provincia de La Pampa, República Argentina y Geocronología de sus rocas metamórficas y eruptivas, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 35(1), 87–146.
- Llambías, E.J., 1973. Las ignimbritas de la sierra de Lihué Calel, provincia de La Pampa. 5° Congreso Geológico Argentino, Acta 4: 55-67, Buenos Aires.
- Llambías, E.J., 1975. Geología de la provincia de La Pampa y su aspecto minero. Dirección de Minas de la provincia de La Pampa, Informe inédito, 38 p. Santa Rosa.
- Llambías, E.J., 1999. Las rocas ígneas gondwánicas. I. El magmatismo gondwánico durante el Paleozoico superior - Triásico. En: Caminos, R. (Ed.): *Geología Argentina*, Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 29(14): 349-376, Buenos Aires.
- Llambías, E.J. y Leveratto, M.A., 1975. El plateau riolítico de la provincia de La Pampa, República Argentina. 2 Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 1: 99-114, Buenos Aires.
- Llambías, E.J., Melchor, R.N., Tickyj, H. y Sato, A.M., 1996. Geología del Bloque del Chadileuvú. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° de Exploración de Hidrocarburos, Actas 5: 417-425, Buenos Aires.
- Ludwig, K.R., 2003. *Isoplot 3.0. A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 4, Berkeley.

- Melchor, R.N., 1995. Sedimentología de las unidades paleozoicas aflorantes del centro-oeste de la provincia de La Pampa, Argentina. Universidad Nacional de La Plata. Tesis doctoral inédita, 272 pp., La Plata.
- Melchor, R.N., 1999. Redefinición estratigráfica de la Formación Carapacha (Pérmico), Provincia de La Pampa, Argentina, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 54, 99–108.
- Melchor, R.N. y Césari, S.N., 1997. Permian floras from Carapacha Basin, La Pampa Province, central Argentina. Description and importance, *Geobios*, 30(5), 607–633.
- Mielgo, V., 2007. Evaluación de la aptitud como roca ornamental de las volcanitas del Cerro Las Piletas (38°34' S, 65°41' O), provincia de La Pampa. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UNLPam). Tesina de Licenciatura (Inédita), 28p.
- Montenegro, T., Llambías, E.J. y Quenardelle, S., 2003. Estudios termométricos de granitoides de Algarrobo del Águila, provincia de La Pampa. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 8 (4): 643-652.
- Owens, W.H., 1974. Mathematical model studies on factors affecting the magnetic anisotropy of deformed rocks. *Tectonophysics*, 24:115-131.
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W. Fanning, C.M., Márquez, M., 2006. Gondwanide continental collision and the origin of Patagonia. *Earth-Sciences Reviews*, 76, 235-257.
- Quenardelle, S. M. y Llambías, E. J., 1997. Las riolitas de Sierra Chica (37°S, 65°O): un centro eruptivo gondwánico en el bloque del Chadileuvú, provincia de La Pampa, Argentina. *Rev. Asoc. Geol. Argentina*, 52(4), 549–558.
- Ramos, V.A., 1984. Patagonia: ¿Un continente paleozoico a la deriva? 9º Congreso Geológico Argentino, Bariloche, Actas 2: 311-325.
- Ramos, V.A., 2008. Patagonia: a Paleozoic continent adrift? *Journal of South American Earth Sciences* 26: 235–251.
- Rapalini, A.E., Lopez de Luchi, M., Martinez Dopico, C., Lince Klinger, F., Gimenez, M., Martinez, M.P., 2010. Did Patagonia collide against Gondwana in the Late Paleozoic? Some insights from a multidisciplinary study of magmatic units of the North Patagonian Massif. *Geológica Acta*, 8: 349-371.
- Rapela, C. y Llambías, E. 1999. El magmatismo Gondwánico y los ciclos Fanerozoicos: En: Caminos R. (Ed.): *Geología Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales* 29 (3): 373- 376, Buenos Aires.
- Sato, A.M., Tickyj, H. y Llambías, E.J., 1996. Geología de los afloramientos graníticos del sur de la provincia de La Pampa. 13º Congreso Geológico Argentino y 3º Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 5: 429-439.
- Sato, A.M., Tickyj, H., Llambias, E.J. y Sato, K., 2000. The Las Matras tonalitic-trondhjemitic pluton, central Argentina: Grenvillian-age constraints, geochemical characteristics, and regional implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 13: 587-610.
- Sobral, J. M., 1942. Geología de la región occidental del territorio de La Pampa. Primer Congreso Panamericano de Minas y Geología, Anales 2: 668.750. Santiago de Chile.
- Stappenbeck, R. 1913. Investigación hidrogeológica de los Valles de Chapalcó y Quehué y sus alrededores. Dirección General de Minas y Geología. Ministerio de Agricultura. Boletín 4, Serie B, Geología, 55 p. Buenos Aires.
- Tapia, A., 1939. Chacharramendi y alrededores. *Physis*, XIX: 221-224. Buenos Aires.
- Tarling, D.H. y Hrouda, F., 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman & Hall, London, 217 p.
- Tickyj, H., 1999. Estructura y petrología del basamento cristalino de la región centro-sur de la provincia de La Pampa, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata, 228. La Plata.

- Tomezzoli, R.N. 1997. Geología y Paleomagnetismo en el ámbito de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires (inérita), 327 p., Buenos Aires.
- Tomezzoli, R.N., 1999. Edad de la sedimentación y deformación de la Formación Tunas en las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires (37°-39°S - 61°-63°W). *Rev. de la Asoc. Geol. Argentina*, 54 (3), 220-228.
- Tomezzoli, R.N., 2009. The Apparent Polar Wander Path for South America During the Permian-Triassic. *Gondwana Research*, 15: 209 – 215.
- Tomezzoli, R.N., 2012. Chilenia y Patagonia: ¿un mismo continente a la deriva? *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69(2): 222-239.
- Tomezzoli, R.N. y Cristallini, E.O., 2004. Secciones estructurales de Las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires: Repetición de la secuencia estratigráfica a partir de fallas inversas? *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (2): 330-340.
- Tomezzoli, R.N., Vilas, J.F., 1997. Paleomagnetismo y fábrica magnética en afloramientos cercanos a las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires (López Lecube y González Chaves). *Rev. de la Asoc. Geol. Argentina*, 52 (4), 419-432.
- Tomezzoli, R.N. y Vilas, J.F., 1999. Paleomagnetic constraints on age of deformation of the Sierras Australes thrust and fold belt, *Geophysical Journal International*, 138: 857-870.
- Tomezzoli, R.N., Melchor, R. y MacDonald, W.D. 2006. Tectonic implications of post-folding Permian magnetizations, Carapacha basin, Argentina. *Paleomagnetism in Latinamerica Special Volume. Earth and Planets Space*, 58: 1235-1246.
- Valencio, D. A., 1980. El magnetismo de las rocas. EUDEBA. p:351.
- Van der Voo, R. 1993. Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus oceans. Cambridge University Press, 411 p.
- Vilela, C.R. y Riggi, J.C., 1956. Descripción geológica de las Hojas 33 h, Sierra de Lihué Calel, y 33 i, Sierra Chica, provincia de La Pampa. Dirección Nacional de Geología y Minería, Informe Inédito. Buenos Aires.
- Walker, G.P.L., 1983. Ignimbrite types and ignimbrite problems: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 17, p. 65–88.
- Wegener, A., 1924. The origin of Continents and Oceans (English traslation). Methuen, pp.212, London.
- Wichmann, R., 1928. Contribución a la geología de los departamentos Chical-Có y Puelén, de la parte occidental de La Pampa Central. Publicación de la Dirección General de Minas, Geología e Hidrogeología, 40. Buenos Aires.

ANEXO I

Redes Estereográficas sitio por sitio.

