

Geometría y cinemática de la Zona de Cizalle Seno Arcabuz, Andes patagónicos, Chile

Beatriz Olivares

Departamento de Geología, Universidad de Chile,
Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile
moliv008@stgo.codelco.cl

José Cembrano

Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte,
Avda. Angamos 0610, Antofagasta, Chile
jcembrano@ucn.cl

Francisco Hervé

Departamento de Geología, Universidad de Chile,
Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile
fhervé@cec.uchile.cl

Gloria López

Departamento de Geología, Universidad de Chile,
Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile
glope002@codelco.cl

David Prior

Department of Earth and Ocean Sciences,
University of Liverpool, L69 3GP, U.K.
davep@liv.ac.uk

RESUMEN

La Zona de Cizalle Seno Arcabuz (ZCSA) de rumbo general noroeste yuxtapone dos unidades de rocas metamórficas de distintas edades y niveles estructurales en la isla Diego de Almagro (51°15'-51°40'S): una unidad occidental, de facies esquistos verdes y esquistos azules; y otra unidad oriental, de rocas metasedimentarias. Las rocas de la ZCSA están deformadas dúctilmente y presentan, al menos, dos eventos de deformación documentados por sendas fábricas coexistentes y sobrepuestas: una foliación y lineación milonítica tempranas y una foliación y lineación de bajo 'strain' tardías originadas por plegamiento de la fábrica milonítica. La lineación milonítica está bien preservada y posee buzamiento general hacia el norte (~40°). El grado metamórfico de la deformación corresponde a la facies esquistos verdes y se incrementa hacia el sur donde se encuentran rocas de más alto 'strain'. La deformación dúctil es de naturaleza triclinica, evidenciada por una lineación de estiramiento oblicua la que es típica de zonas de cizalle transpresionales. Así lo corroboran los indicadores cinemáticos, principalmente sinistral inversos. Se proponen y discuten dos diferentes escenarios que dan cuenta de la relación espacial entre la ZCSA y los dos niveles estructurales yuxtapuestos: (1) La ZCSA es coetánea a la exhumación diferencial del bloque oeste, en cuyo caso las lineaciones minerales buzantes al norte se habrían formado durante este evento, lo que implicaría un movimiento sinistral inverso, consistente con la cinemática de la ZCSA. (2) La ZCSA no es coetánea a la exhumación, en este caso la zona de cizalle habría generado lineaciones minerales horizontales formadas durante un evento transcurrente sinistral y la exhumación habría ocurrido con posterioridad, debido a un basculamiento tectónico cuyo pivote estaría al norte de la zona de estudio.

Palabras claves: Zonas de cizalle, Milonitas, Isla Diego de Almagro, Magallanes, Chile.

ABSTRACT

Geometry and kinematics of Seno Arcabuz Shear Zone, Patagonian Andes, Chile. Metamorphic units of different age and structural levels occur at Isla Diego de Almagro (51°30'S), where they are juxtaposed by the Seno Arcabuz Shear Zone (SASZ). The SASZ strikes NNW and exposes deeper structural levels to the west of it. The SASZ

rocks are ductilely deformed and document, at least, two deformation events evidenced by coexistent superposed fabrics. An early mylonitic foliation and lineation, and a late low strain foliation and lineation originated by folding of the early fabric. The mylonitic lineation is well preserved and plunges moderately to the north (ca. 40°); the rock strain and metamorphic grade increase progressively to the south. Ductile deformation is triclinal, as documented by oblique stretching lineations, typical of transpressional shear zones. Kinematic indicators, which are mainly sinistral-reverse, are consistent with bulk transpressional kinematics. According to field geology, shear zone kinematics and available geologic and chronologic data, two possible scenarios are proposed to account for the spatial relationship between the SASZ and the two different structural levels juxtaposed by it: (1) The SASZ is coeval with the differential exhumation of the western block, and then the north-plunging lineations formed during sinistral-reverse motion or (2) The SASZ is not coeval with differential exhumation of the western block, in such case the mylonitic lineation formed in a formerly sinistral strike-slip shear zone and the exhumation of the western block took place later, by block tilting to the north.

Key words: Shear zones, Mylonites, Diego de Almagro, Magallanes, Chile.

INTRODUCCION

El objetivo de este trabajo es comprender la naturaleza y cinemática de la deformación en las unidades de rocas metamórficas y plutónicas asociadas espacialmente a la Zona de Cizalle Seno Arcabuz (ZCSA) (Forsythe *et al.*, 1981). Para esto se establece la trayectoria y las condiciones físicas bajo las cuales se ha producido la deformación, mediante el análisis microscópico de secciones delgadas, combinado con antecedentes macroscópicos generales de la fábrica de las rocas pertenecientes a ZCSA. Este conocimiento contribuye a comprender mejor la evolución tectónica mesozoica de un área poco conocida de los Andes australes. La zona de cizalle en estudio, se encuentra sobre los lineamientos regionales ubicados al sur del Golfo de Penas, los cuales han sido homologados a la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), descrita más al norte, cuya traza se extiende, aproximadamente, entre los 39 y 47°S (Forsythe y Nelson, 1985).

El área de estudio (Fig. 1a) se ubica entre los 50°15' y los 51°40'S y a longitudes cercanas a los 75°00' en la XII Región de Chile. Esta zona corresponde al Seno Arcabuz, perteneciente a la isla Diego de Almagro, ubicada a 100 km al sur del archipiélago Madre de Dios. Los afloramientos estudiados en el Seno Arcabuz se han enumerado correlativamente de sur a norte como localidades y su ubicación se presenta en la figura 1b. En terreno, se tomaron datos referentes a la fábrica macroscópica de la ZCSA y se recolectaron muestras

orientadas para estudios de microestructura (este trabajo) y determinación de edad absoluta de deformación Ar-Ar (trabajo en preparación). La estructura y fábrica macroscópica es difícilmente observable en terreno debido a la escasez de buenos afloramientos; en consecuencia, este trabajo se basa principalmente en el estudio microscópico de muestras orientadas. Para el estudio microscópico se utilizaron siete muestras, pertenecientes a las cuatro localidades de observación. Con el propósito de establecer la cinemática de la deformación se obtuvieron, para cada muestra, dos cortes orientados, ambos perpendiculares a la foliación. Las secciones fueron cortadas paralelas y normales a la lineación de estiramiento (secciones P y N, respectivamente). Las secciones P corresponden a los ejes XZ del elipsoide de 'strain' finito (*e.g.*, Simpson and Schmidt, 1983) que es donde se encuentran los indicadores cinemáticos del sentido de cizalle. En esta sección se observa el mayor estiramiento y acortamiento de los elementos deformados (Fig. 2). Las secciones N corresponden a los ejes YZ del elipsoide de 'strain' finito, que es donde se observa el alargamiento intermedio y mayor acortamiento de elementos. El estudio de estas secciones intenta determinar la presencia de algún tipo de asimetría estructural en el plano YZ, lo que indicaría la ocurrencia de flujo no-coaxial en este plano producido por una componente de cizalle perpendicular a la lineación de estiramiento.

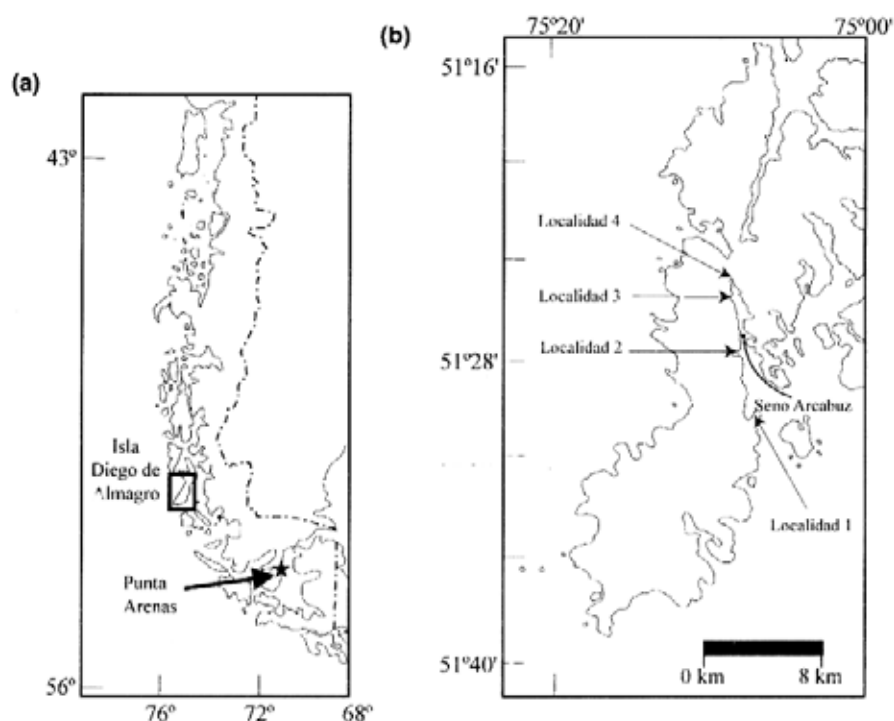


FIG. 1. a- ubicación de la isla Diego de Almagro en el margen continental de los Andes australes; b- localidades de estudio en el seno Arcabuz, Isla Diego de Almagro.

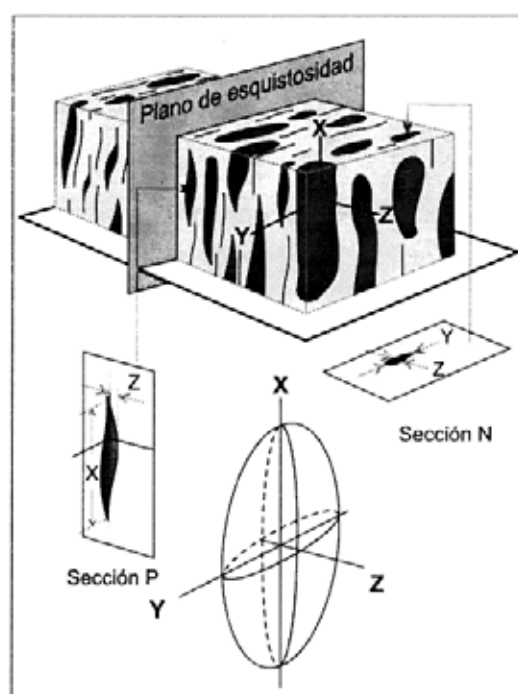


FIG. 2. Esquema general que muestra la relación geométrica entre la esquistosidad y lineación de estiramiento en una roca con los ejes principales del elipsoide de deformación. Se muestra también la ubicación de las secciones P y N discutidas en este trabajo.

MARCO GEOLOGICO REGIONAL

El margen oeste de Sudamérica a partir de los 34°S, está formado por un complejo metamórfico generado en un prisma de acreción perteneciente a un ambiente de antearco. Este prisma se desarrolló a partir del Paleozoico Superior (Hervé, 1988) y se extendió, en algunas áreas, como en Archipiélago Madre de Dios, hasta el Cretácico Inferior (Hervé *et al.*, 1999).

La geología de la isla Diego de Almagro (Fig. 3) está compuesta, a grandes rasgos, por dos unidades de roca que poseen diferentes historias tanto deposicionales como de metamorfismo. Estas unidades están yuxtapuestas por la Zona de Cizalle Seno Arcabuz (ZCSA), la cual puede ser considerada como una importante discontinuidad tectónica (Hervé *et al.*, 1999).

En el sector noreste de la isla Diego de Almagro, al este de la ZCSA, afloran tres unidades estratificadas, las cuales se correlacionan con las tres unidades metamórficas de bajo grado definidas en la zona del archipiélago Madre de Dios (Forsythe y Mpodozis, 1983) ubicada a ca. 100 km al norte. Estas son el Complejo Denaro (CD) compuesto de metabasitas, calizas y chert, la Caliza Tarlton (CT) formada de calizas y mármoles de edad pérmica inferior y el Complejo Duque de York (CDY) formado de una serie detrítica (turbidítica) de lutitas y grauvacas. Estas unidades, interdigitadas, fueron depositadas en condiciones subacuáticas de fondo y plataforma marinos y luego acrecionadas al margen continental, lo que las dejó tectónicamente intercaladas como escamas. Ellas están intruidas por el Batolito Surpatagónico (BSP) de edad cretácica inferior en la isla Diego de Almagro.

En el sector suroeste y separadas por la ZCSA, afloran rocas metamórficas altamente deformadas de manera dúctil correspondientes a esquistos azules, esquistos verdes, rocas ultramáficas y meta-chert. Esta asociación de rocas fue definida por Hervé *et al.* (1999) como Complejo Metamórfico Diego de Almagro (CMDA).

Estudios geocronológicos recientes (Hervé *et al.*, 1999) han determinado que las unidades de roca del bloque suroeste (CMDA) poseen un protolito

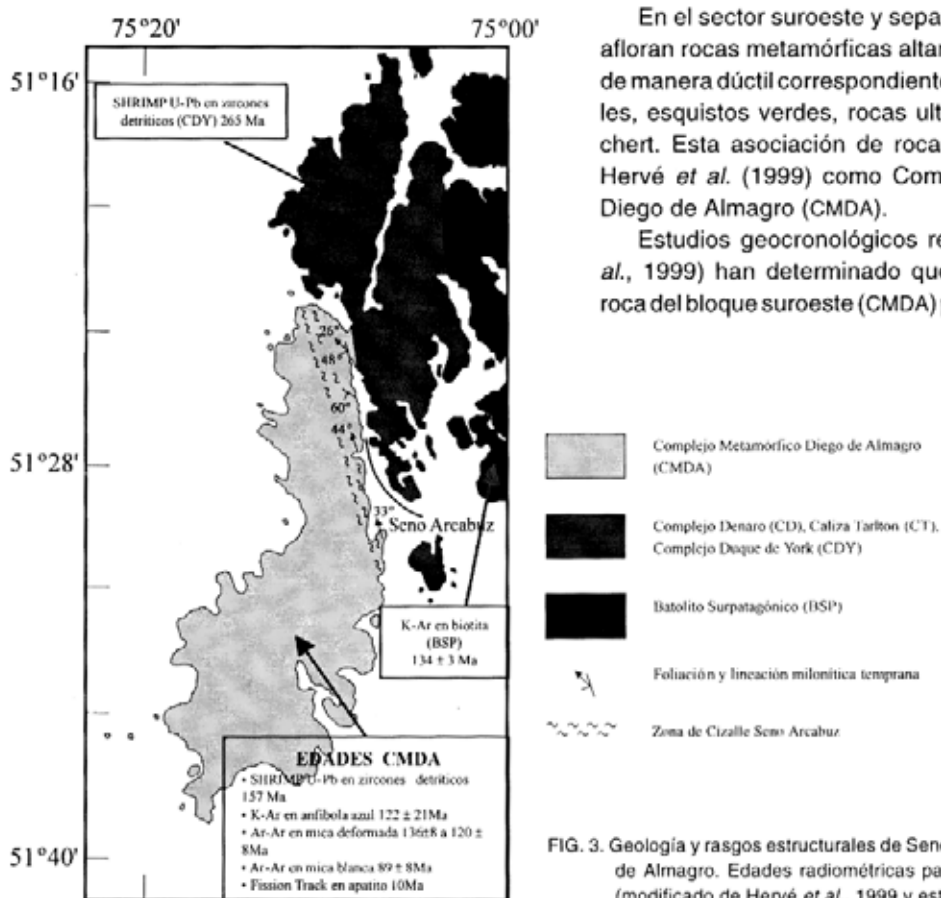


FIG. 3. Geología y rasgos estructurales de Seno Arcabuz en Isla Diego de Almagro. Edades radiométricas para CMDA, CDY y BSP (modificado de Hervé *et al.*, 1999 y este trabajo).

de edad máxima de formación 157 Ma (Jurásico Medio-Superior), notoriamente más joven que la edad máxima del protolito del bloque noreste (CDY): 265 Ma (Pérmico Inferior).

Dataciones K-Ar en anfíbolos azules del CMDA, indicaron una edad de metamorfismo cretácico inferior de 122 ± 21 Ma y 117 ± 11 Ma, lo cual podría corresponder al principal evento deformativo y metamórfico desarrollado en el prisma acrecionario de la zona de subducción (Hervé *et al.*, 1999). Asimismo, edades en biotita del BSP (134 ± 3 Ma) indicarían que la acreción habría ocurrido contemporáneamente a la intrusión del batolito. Es así como la ZCSA podría constituir una discontinuidad tectónica, por medio de la cual ha ocurrido una importante exhumación diferencial del bloque oeste (acrecionado al margen durante el Cretácico Inferior), en contraste con las rocas del bloque este acrecionadas durante el Paleozoico Superior (Hervé

et al., 1999). Edades Ar-Ar en porfiroclastos de mica deformados tomados en milonita (protolito granítico) de la ZCSA, entregan 136 ± 8 a 120 ± 8 Ma. Otra edad Ar-Ar en agregados de mica blanca probablemente recrystalizada de la ZCSA entregó 89 ± 8 Ma. Estas últimas edades posteriores al primer evento deformativo y metamórfico pueden ser interpretadas como relacionadas al proceso de exhumación del CMDA. Edades de traza de fisión en apatita indican que las rocas del CMDA pasaron por la isoterma de $\sim 100^\circ\text{C}$ (3-4 km) alrededor de 10 Ma, en el sector sur de la isla (Hervé *et al.*, 1999).

Las rocas de la ZCSA están deformadas de manera dúctil, presentando una fábrica planar y linear bien desarrollada con buzamiento general hacia el norte, mostrando un incremento en el grado metamórfico de norte a sur. Esto se evidencia por la presencia de pizarras y filitas en el sector norte y esquistos y gneises miloníticos en el sector sur.

FABRICA DE LAS ROCAS EN LA ZONA DE CIZALLE SENO ARCABUZ

FABRICA MACROSCOPICA

La Zona de Cizalle Seno Arcabuz posee un rumbo aproximado nornoroeste, manteo general hacia el oeste y una longitud expuesta de alrededor de 12 km.

A pesar de las dificultades geográficas que presenta la zona para la observación de estructura y fábrica macroscópicas, se puede decir que las rocas de la ZCSA exhiben fábricas tanto planares como lineares correspondientes a tectonitas SL. A lo largo de toda la zona de cizalle se observa una foliación y una lineación milonítica temprana. La foliación es más penetrativa en el extremo norte del seno y la lineación, lo es en el extremo sur.

La foliación temprana está intensamente plegada a diversas escalas incluyendo crenulación en algunos dominios. Así se genera una segunda fábrica planar y linear: planos axiales y ejes de los pliegues de crenulación. La presencia de este intenso plegamiento genera una fábrica compleja, que impide, en muchos lugares, reconocer la foliación temprana de la roca.

FOLIACIONES

- La foliación temprana o principal (S_1): varía desde un clivaje de pizarra-filita en el norte a una esquistosidad gruesa en el sur. En la localidad 1 (extremo sur), la foliación está definida por lentes anastomosados de cuarzo recrystalizado dinámicamente, dentro de los cuales se encuentran porfiroclastos milimétricos de feldespato potásico y plagioclasa. Estos lentes están limitados por bandas anastomosadas de micas. En el sector norte el cuarzo no se presenta como dominios anastomosados, sino segregado en venas de cuarzo. En general, las bandas o lentes de cuarzo son de diferentes espesores y varían desde 5 hasta menos de 0,5 mm. Algunas bandas de cuarzo se presentan entre agregados finos de micas blancas, clorita y biotita orientadas subparalelas entre sí. En la localidad 2 la foliación está dada además por la orientación preferencial de anfíbola (tremolita-actinolita). Debido al intenso plegamiento de la foliación, es difícil determinar una orientación preferencial homogénea; sin embargo, se distingue una esquistosidad principal

de rumbo nornoroeste a noroeste y manto de 48 a 60° al oeste (Fig. 3).

- Clivaje de crenulación (S_2): está dado por los planos axiales de los pliegues de la foliación S_1 y por crenulación de algunos niveles, cuyas orientaciones son nornoroeste a noroeste y manteos subverticales, al este y al oeste.
- Superficies S-C: todas las rocas de Seno Arcabuz, a excepción de las rocas del extremo norte (localidad 4), exhiben la coexistencia de dos foliaciones típicas de rocas de alto 'strain'. La primera corresponde a la esquistosidad o clivaje (S_1) y la otra a superficies C, definidas como discontinuidades físicas a escala centimétrica que contienen micas finas. El ángulo entre las superficies S y C varía entre 30 y 40°.

LINEACIONES

Las lineaciones de estiramiento y de minerales (e.g., Twiss y Moores, 1992) corresponden al rasgo principal en el sector sur de Seno Arcabuz (localidad 1). Hacia el norte, los granos minerales presentan un arreglo más isótopo en el plano de foliación.

Se reconocieron los siguientes tipos de lineación (Fig. 4):

- Lineación de estiramiento de cuarzo, agregados policristalinos de cuarzo dispuesto en cintas, feldespato potásico y localmente plagioclasa estirados. La lineación dada por cuarzo aparece en todas las rocas de la ZCSA, mientras que la asociada a feldespato se restringe al sector sur.
- Lineación otorgada por orientación preferencial de mica blanca, clorita y, en menor proporción, biotita. Aparece distribuida en todas las rocas del área en forma homogénea.
- Lineación dada por la orientación preferencial de anfíbola (tremolita-actinolita). Aparece restringida a una muestra ubicada en la localidad 2.
- Lineación dada por ejes de pliegues y/o crenulación. Con diferencias en la intensidad del plegamiento o crenulación, aparece en todas las rocas estudiadas.

Las lineaciones minerales poseen un azimut promedio nor-noroeste a noroeste y 'rake' al norte de 40° aproximadamente (Fig. 3). Las lineaciones de crenulación muestran un azimut nornoroeste a oeste noroeste y buzán entre 30 y 60° al norte. Ambas lineaciones son, por tanto, subparalelas.

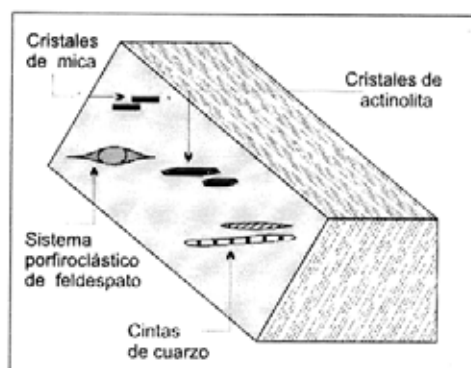


FIG. 4. Diagrama esquemático que muestra los tipos de lineación observados en la Zona de Cizalle Seno Arcabuz.

FABRICA MICROSCOPICA

La microestructura de las rocas deformadas varía de acuerdo a sus características composicionales y mineralógicas, así como también de acuerdo al grado de deformación. Las rocas deformadas corresponden principalmente a granitoides miloníticos y esquistos grises en la localidad 1, esquistos cuarzomicaeos y esquistos verdes en la localidad 2, esquistos cuarcíferos en la localidad 3 y esquistos y filitas de cuarzo en la localidad 4. De esta manera, el análisis microestructural confirma que el grado metamórfico de las rocas de la ZCSA disminuye progresivamente hacia el norte.

Las rocas presentan rasgos microestructurales variables entre esquistosidad incipiente a penetrativa, con y sin desarrollo de asimetrías estructurales. Además, se presentan los clivajes y ejes de crenulación ya reconocidos a la escala macroscópica. En general, se puede decir que la intensidad de deformación se incrementa de norte a sur, pues es en esta última donde se observan indicadores de movimiento mejor desarrollados.

En las secciones P es donde mejor se observa el desarrollo de esquistosidad, lineación mineral e indicadores cinemáticos; en las secciones N en cambio, la fábrica está principalmente dada por esquistosidad pobremente definida, el estiramiento de objetos es mínimo, los dominios anastomosados son caóticos y en general se presenta un mayor plegamiento de la esquistosidad. Los indicadores cinemáticos en las secciones N están pobremente desarrollados.

SECCIONES P

Localidad 1. El cuarzo (~30%) se presenta con extinción ondulosa (tamaño <0,1 mm y hasta 2,5 mm) y bandas de deformación (Fig. 5a). En los bordes del cuarzo se observan subgranos de tamaños 0,1-0,2 mm generando colas tipo σ con geometría sinistral; también se presenta como agregados policristalinos, recrystalizados, con bordes lobulados que se disponen en bandas anastomosadas ('ribbons') algunas de las cuales poseen geometrías tipo σ sinistral.

La plagioclasa y el feldespato-K (25-40%) generan lineación y se presentan como porfiroclastos subhedrales a anhedrales que poseen entre 0,5 y 4 mm. Se muestran alterados a sericita y poseen inclusiones de cuarzo con extinción ondulosa. Exhiben algunas sombras de 'strain' con diferentes minerales: muscovita, biotita, clorita y cuarzo, con geometrías tipo σ sinistral.

La mica blanca (15-20%) se presenta en dos tamaños, las más pequeñas ocurren limitando, preferentemente, dominios anastomosados en superficies C (Fig. 5A); en algunos casos, acompaña al cuarzo recrystalizado. Las de mayor tamaño, tipo muscovita (0,5-3 mm), se presentan principalmente en superficies S y generan estructuras de peces de mica sinistral (Figs. 5A y 5B). Localmente, aparece muscovita que, orientada perpendicular a la lineación, presenta cintas plegadas ('kink band'), cuyos ejes son paralelos a la lineación.

Porfiroclastos de granate subhedrales (Fig. 5C) poseen tamaños de entre 0,5 y 1,5 mm y presentan inclusiones de feldespato potásico, cuarzo, esfeno y epidota; exhiben fracturas en las que ocurre clorita o muscovita. Además, muestran sombras de 'strain' de biotita, clorita y sericita que indican movimiento sinistral.

La biotita (10%) se presenta entrecrecida con muscovita y alterada, en parte, a clorita.

Las superficies S-C (Fig. 5A) muestran el patrón típico anastomosado (e.g., Lister y Snoke, 1984) en que la esquistosidad se curva asintóticamente a las superficies C. El sentido de movimiento indicado por estas superficies es sinistral, pero su observación se dificulta debido a que ellas se encuentran generalmente plegadas, lo cual genera la segunda foliación (clivaje de crenulación) y lineación. La asociación mineralógica de las rocas de esta localidad indica facies metamórfica de esquistos verdes.

Localidad 2. En este sector, las dos muestras analizadas, un esquistos cuarzomícaleo y un esquistos verde, presentan diferente mineralogía, pero similar fábrica. Debido a sus diferencias mineralógicas se postula que el protolito de ambas rocas es diferente: el primero correspondería a una roca (sedimentaria o metamórfica) de composición félsica y la segunda, a una de composición máfica. Se observa en ambas una foliación S-C moderadamente desarrollada.

El cuarzo presenta, en general, las mismas características microestructurales que en la localidad 1, aunque ocurre en diferentes proporciones (30 y 10%, respectivamente).

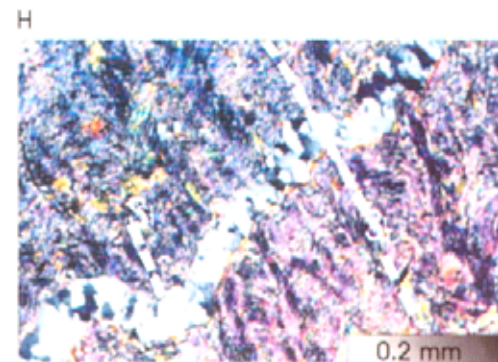
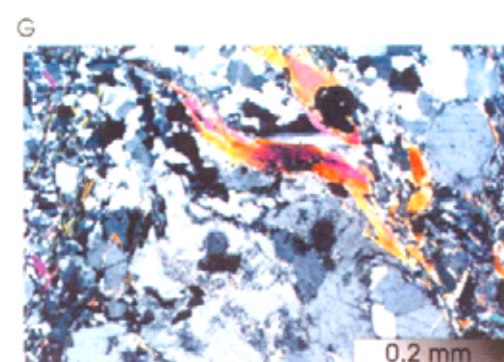
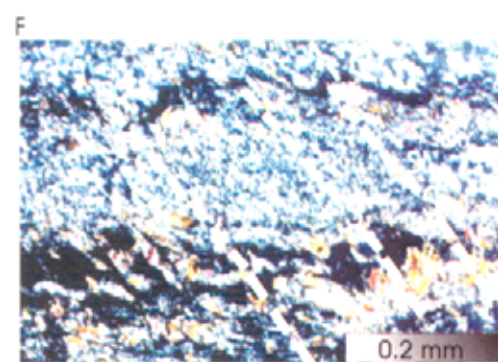
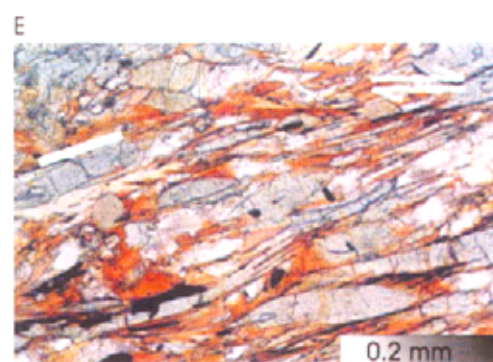
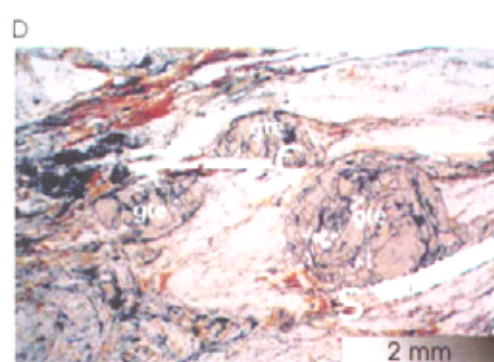
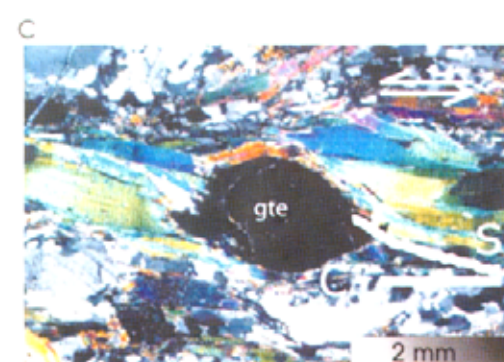
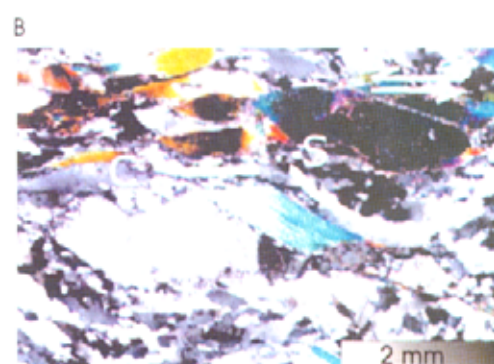
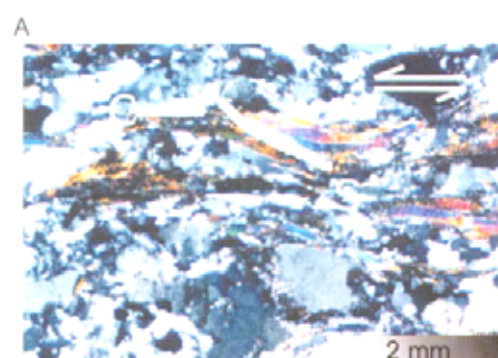
El feldespato potásico y la plagioclasa del esquistos cuarzomícaleo miden entre 0,5 y 3 mm, se presentan muy alterados a sericita, muestran bordes lobulados y poseen inclusiones de cuarzo, muscovita, biotita y clorita; además, generan sombras de 'strain' dextral. El feldespato potásico en el esquistos verde es escaso, con cristales más pequeños (<0,8 mm) alterados en parte a sericita y poseen extinción ondulosa, también colas de feldespato potásico con geometría dextral.

Los granates del esquistos cuarzomícaleo poseen una forma redondeada de hasta 2 mm de diámetro (Fig. 5D) y presentan dos tipos de indicadores cinemáticos: el primero correspondería a sombras de 'strain', ubicadas sobre el plano S, de cuarzo policristalino que evidencian un movimiento dextral, y el segundo corresponde a un granate fracturado y desplazado a través de la superficie C por un movimiento también dextral. Los granates muestran inclusiones de cuarzo cuya geometría helicítica indica movimiento dextral (e.g., Brown and Talbot, 1989). Los granates del esquistos verde muestran inclusiones de biotita y anfíbola.

La mica blanca aparece principalmente en el esquistos cuarzomícaleo y lo hace en bandas junto al cuarzo; también aparece intercalada con biotita y clorita y ubicada preferentemente en superficies C.

En el esquistos verde, la tremolita-actinolita (70%) genera tanto foliación como lineación, su hábito es prismático y los cristales se ubican principalmente subparalelos entre sí, aunque localmente lo hacen subperpendiculares. Poseen alteración a biotita y generan estructuras de peces de anfíbola de geometría dextral (Fig. 5E).

La biotita se dispone en agregados laminares que generalmente limitan dominios anastomosados



y se ubica de preferencia en superficies C.

La asociación mineralógica de ambas rocas indica facies metamórfica de esquistos verde.

Localidad 3. Un kilómetro al sur de la localidad 4, se presentan esquistos cuarcíferos cuya foliación está dada por bandas de cuarzo y micas. Se observa una estructura S-C pobremente definida que indica movimiento sinistral; la lineación es tosca y dada por cuarzo estirado y orientación de micas.

El cuarzo (60%) se presenta alternadamente en dos tipos de bandas de anchos 0,3-5 mm y 1,3 mm, respectivamente. La primera posee principalmente subgranos < 0,1 mm, la segunda granos con bordes lobulados y extinción ondulosa y también subgranos de tamaños entre 0,5 y 1 mm.

Las bandas de mica blanca (10%) y biotita (10%) se presentan de preferencia en las superficies C. La biotita está alterada, en parte, a clorita y junto a muscovita generan estructura tipo peces de mica sinistral.

En esta localidad la asociación mineralógica indica facies de esquistos verde.

Localidad 4. Los esquistos y filitas cuarcíferas presentan una foliación dada por bandas de cuarzo (60%) no anastomosadas (venas de cuarzo) de dos anchos tipo. En ciertos sectores la foliación principal se encuentra plegada generando micropliegues y una consecuente segunda foliación: clivaje de crenulación (Fig. 5F). En los limbos de los micropliegues se observan microfracturas subperpendiculares a la foliación temprana que la desplaza. En esta localidad, la lineación es pobre, dada por ejes mayores de cuarzo y orientación de micas. Estas características de la fábrica metamórfica muestran

una deformación finita menos intensa que en las localidades anteriormente descritas.

Algunas bandas de ancho < 1 mm poseen subgranos de tamaños < 0,1 mm, en las que el cuarzo está acompañado de muscovita y clorita. Otras bandas más gruesas, de entre 1 y 2 mm, presentan cuarzo con extinción ondulosa, bordes lobulados y serrados. Algunos subgranos aparecen entrecrecidos con clorita y feldespato potásico alterado a sericita; otros están fracturados y rellenos con turmalina.

La mica blanca y clorita se disponen en bandas espaciadas y generan la esquistosidad.

La asociación mineralógica corresponde a facies metamórfica de esquistos verde de baja temperatura.

SECCIONES N

La fábrica, en general, está peor definida que en las secciones P y la esquistosidad es difícil de identificar pues los dominios anastomosados son más caóticos. Los elementos son más cortos y menos deformados que en las secciones P, lo que es consistente con una superficie perpendicular a la lineación de estiramiento global de la roca. En general, se presenta una mayor intensidad en el plegamiento de la esquistosidad.

En cuanto a los indicadores cinemáticos, éstos son casi inexistentes, pero en ciertas secciones se los pudo observar sugiriendo movimientos locales en sentido perpendicular a la lineación.

En la localidad 1, los indicadores observados son principalmente peces de mica (Fig. 5G), sombras de 'strain' en plagioclasa y granate.

En las localidades 2 y 4, la esquistosidad se

FIG. 5. Microfotografías de la fábrica de secciones delgadas XZ (sección P; A-F) e YZ (sección N; G-H) en rocas deformadas de la Zona de Cizalle Seno Arcabuz. La escala se indica para cada microfotografía (sección N; G-H) en rocas deformadas de la Zona de Cizalle Seno Arcabuz. La escala se indica para cada fotografía; (A) Superficies S-C, en la que se observan dos tamaños preferenciales de mica blanca, las más pequeñas se ubican en superficies C y las grandes en superficies S. La mica grande presenta estructura tipo pez con geometría de cizalle sinistral; (B) Pez de mica con geometría de cizalle sinistral; (C) Granate con fibra de 'strain'; asimétrica sinistral; (D) Granates que presentan dos generaciones de indicadores cinemáticos: el primero corresponde a sombras de 'strain' de cuarzo policristalino, ubicadas en el plano S que evidencian movimiento sinistral, y el segundo corresponde a un granate fracturado y desplazado a través de la superficie C por un movimiento de tipo dextral; (E) Cristales de anfíbola con estructura de pez dextral y alteración a biotita; (F) Clivaje de crenulación (S_2) generado por el plegamiento de la esquistosidad principal; se observan microfracturas subparalelas a los clivajes de crenulación, a través de los cuales se produjo desplazamiento; (G) Desarrollo de objetos asimétricos, los que evidencian flujo no coaxial en este plano (YZ). En este caso, se presenta mica blanca con estructura tipo pez de mica sinistral (?); los minerales deformados (cuarzo, plagioclasa) se presentan más equidimensionales que en las secciones P; (H) Microfracturas subparalelas a los clivajes de crenulación (S_2) a través de los cuales se produjo desplazamiento.

encuentra notablemente más plegada (micropliegues) generando un marcado clivaje de crenulación (Fig. 5H), el cual aparece más localizado en bandas micáceas y menos, en bandas de cuarzo. En los sectores de mayor curvatura se producen microfracturas, a través de las cuales

ocurre desplazamiento. Estas microfracturas pueden ser interpretadas como bandas de cizalle en donde se concentra la deformación. El cuarzo de las bandas más gruesas se dispone perpendicular a la orientación de la banda.

INTERPRETACION DE LA FABRICA

TRAYECTORIA DE LA DEFORMACION

Tanto a escala macro como microscópica se observan diversas asimetrías estructurales, las cuales indican que los ejes de 'strain' finito han rotado con respecto a los ejes de estiramiento instantáneo (e.g., Lister, 1984). Por lo tanto, condiciones de flujo no coaxial han estado involucradas en el origen de la fábrica metamórfica. Del análisis de la fábrica de las rocas expuestas en el seno Arcabuz, se desprende que la historia de deformación es compleja, y generó dos fábricas principales:

- foliación y lineación milonítica temprana.
- plegamiento suave de la fábrica temprana, generando una segunda foliación y lineación de crenulación de bajo 'strain'.

La orientación similar de la esquistosidad y lineación mineral en todas las rocas estudiadas, indica que ambas se habrían formado en un mismo evento, es decir, las rocas estarían espacialmente asociadas a una misma zona de cizalle, la cual pudo tener más de un sentido de movimiento en su historia de deformación. Esto último se sustenta en el hecho de que si bien predomina el movimiento sinistral inverso, se presentan indicadores cinemáticos con sentido de movimiento opuestos en algunas localidades.

Del estudio microscópico, las secciones P entregaron la mayor cantidad de información. Los indicadores cinemáticos utilizados fueron: fábrica S-C, colas tipo σ , sombras de 'strain', peces de mica y de anfíbola.

En el sector norte, localidad 4, no se observan indicadores de movimiento presentándose una fábrica planar que evidencia menor deformación (bajo 'strain'). Hacia el sur, la presencia de indicadores de movimiento señalaría un incremento en la componente de cizalle de la deformación en esa dirección.

Al sur de la localidad 4, a pesar de la diferencia de protolito, se observa una fábrica S-C en todas las rocas; en las S se ubican de preferencia lineaciones minerales de estiramiento y en las C, micas orientadas y estiradas.

En la localidad 1, los dos tamaños observados en micas blancas obedecen a diferencias en la concentración del 'strain': las superficies C corresponden a discontinuidades discretas que se interpretan como zonas de intenso cizalle lateral; es ahí donde se concentra mayor deformación y se generan micas de menor tamaño ya sea vía recristalización dinámica o cataclasis local; por el contrario, las superficies S representan la esquistosidad que está caracterizada sólo por el aplanamiento de los granos, por lo cual se desarrollan micas de mayor tamaño. Tanto en las localidades 1 y 3, la geometría S-C indica movimiento sinistral; únicamente en la localidad 2 se puede observar S-C dextral en granate; ambos sentidos de movimiento son reafirmados en cada lugar por colas, sombras de 'strain' y peces de mica sintéticos.

Surge una aparente contradicción en relación con el sentido de movimiento de la zona de cizalle. Debido al intenso plegamiento es posible que en la localidad 2 se observen indicadores tomados del limbo opuesto de un pliegue, por lo cual el sentido de movimiento observado sea también opuesto, de esta forma se explicaría la aparente contradicción.

La información, en cuanto a la trayectoria de deformación, entregada por las secciones N, indica movimientos locales perpendiculares a la lineación de estiramiento. Dado que la lineación de estiramiento tiene un 'rake' oblicuo sobre el plano de esquistosidad, la deformación global de la roca tiene geometría triclinica, lo que es típico de zonas de deformación dúctil transpresionales (e.g., Jiang *et al.*, 2001).

CONDICIONES FÍSICAS DE LA DEFORMACION

Las condiciones físicas documentadas a través de la microestructura son consistentes con una disminución en la intensidad de la deformación de sur a norte. En la localidad 1, la extinción ondulosa y las bandas de deformación en cuarzo dan cuenta del deslizamiento de dislocaciones dentro del cristal. Asimismo, la operación del mecanismo 'climb' facilita el movimiento de estas dislocaciones con lo cual se produce el desarrollo de subgranos, los que al rotar progresivamente generan granos pequeños dentro del grano deformado. Por otra parte, los granos con bordes lobulados y los agregados policristalinos de cuarzo poligonal evidencian recristalización dinámica parcial producida por migración del borde del grano. Estos procesos de plasticidad del cuarzo dan cuenta de temperaturas alrededor de los 350°C, correspondientes a las partes media y superior de la facies esquistos verdes. El feldespato potásico se presenta como porfiroclastos alargados que generan sombras de 'strain', lo cual es indicativo del comienzo de su deformación, lo que sería concordante con las condiciones físicas de deformación

del cuarzo el cual ha recristalizado parcialmente.

En la localidad 2, independiente de las diferencias litológicas, las condiciones físicas de la deformación parecen ser las mismas o similares que en la localidad 1, puesto que el cuarzo y el feldespato potásico muestran, en general, las mismas características. Ello sugiere, por lo tanto, que estas rocas habrían sido formadas bajo condiciones de metamorfismo de las partes media a alta de la facies esquistos verdes.

En la localidad 4, al norte del seno de Arcabuz, el cuarzo y los demás minerales no presentan deformación intracrística significativa (localmente). Asimismo, la ausencia de lineación de estiramiento bien definida, indica menores montos de 'strain' en comparación con las otras localidades. La microestructura de la localidad 4 indica que temperaturas menores que 350°C, correspondientes a la parte baja de la facies de esquistos verdes han afectado a las rocas de este sector.

Fracturas en los limbos de los micropliegues en la zona norte, indican un comportamiento más frágil, probablemente más alejados de la zona de intensa deformación (o menos profundos).

DISCUSION

Del análisis de la fábrica de las rocas expuestas en la Zona de Cizalle de Seno Arcabuz, se desprende que la historia de deformación es compleja, y generó dos fábricas importantes:

- Foliación y lineación milonítica temprana, con indicadores de movimiento sinistral inverso. Esta fábrica se habría generado durante el Cretácico Inferior, de acuerdo a edades Ar-Ar obtenidas en mica blanca de las rocas miloníticas (Hervé *et al.*, 1999).
- Plegamiento local de la fábrica temprana, generando una segunda foliación y lineación de crenulación de bajo 'strain'.

De acuerdo a los antecedentes geológicos y cinemáticos presentados en este trabajo y a los trabajos disponibles para la Zona de Cizalle Seno Arcabuz (Hervé *et al.*, 1999) se plantean dos escenarios diferentes (Fig. 6) para explicar la estrecha relación espacial entre la ZCSA y la naturaleza de los bloques yuxtapuestos por ella:

Escenario 1: la ZCSA es coetánea a la exhumación diferencial del bloque occidental.

En este escenario las lineaciones minerales buzantes al norte (~40°) se habrían formado durante la exhumación diferencial del bloque occidental lo que necesariamente implicaría un movimiento sinistral inverso, el cual sería consistente con los indicadores cinemáticos observados. La componente sinistral se registra en la mayoría de las rocas analizadas y la orientación de su componente inversa estaría dada por el manteo hacia el oeste del plano de foliación principal. La existencia de indicadores cinemáticos que indican movimiento dextral pueden ser explicados por plegamiento producido durante el proceso de milonización de la zona (e.g., Bell y Hammond, 1984), por lo que se estaría observando un indicador volcado correspondiente al limbo opuesto de un pliegue. En este sentido, Bell y Hammond (1984) propusieron que las geometrías generadas durante la milonización son muy susceptibles a remodificaciones en la medida que progresa el proceso de deformación, lo cual genera una geometría compleja de pliegues, nuevas lineaciones y foliaciones.

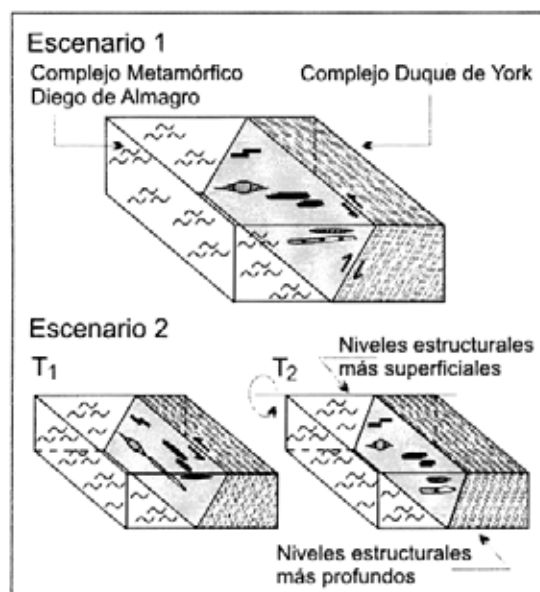


FIG. 6. Bloque diagrama que ilustra los dos escenarios posibles discutidos en el texto para explicar la geología, geometría y cinemática de la ZCSA. (1) La ZCSA es coetánea con la exhumación del bloque occidental: se trata de una zona de cizalle sinistral inversa que habría yuxtapuesto un nivel estructural profundo (bloque colgante, oeste) con un nivel estructural más somero (bloque yacente, este); (2) La ZCSA no es coetánea con la exhumación del bloque occidental: se trata de una zona de cizalle originalmente de rumbo sinistral la cual generó un basculamiento tectónico cuyo pivote se encuentra en el extremo norte de la zona estudiada.

Escenario 2: la ZCSA no es coetánea con la exhumación.

En este caso, la zona de cizalle habría generado lineaciones minerales horizontales las que se habrían formado durante un evento transcurrente sinistral y la exhumación habría ocurrido después, debido a un basculamiento tectónico cuyo pivote estaría al norte de la zona estudiada; este movimiento habría exhumado diferencialmente el bloque occidental y dejado las lineaciones buzando al norte, como se presentan en terreno.

El bajo grado y bajo 'strain' de la deformación que se observa en la zona norte, localidad 4, no concuerda con ninguna de las historias deformacionales anteriormente planteadas. Si se acepta la primera hipótesis, en el sector norte se deberían observar niveles estructurales más profundos de los que ocurren en terreno y por tanto, más intensa-

mente deformados (microestructura diagnóstica de mecanismos de deformación y condiciones físicas asociadas). Si se acepta la segunda, se observaría, al menos, el mismo grado de deformación. Esta inconsistencia podría ser explicada de diferentes formas (Fig. 7):

- Un desplazamiento abrupto al oeste de la franja de más intensa deformación de la ZCSA, dejaría las rocas de la localidad 4 en el margen de bajo 'strain' de la franja de más intensa deformación (Fig. 7a).
- Durante el desarrollo de la zona de cizalle y su foliación milonítica, se genera una geometría anastomosada alrededor de lentes elipsoidales de material menos deformado, lo que muestra la heterogeneidad de la deformación, lo cual ocurre a todas las escalas (*e.g.*, Bell y Hammond, 1984). Por esto, dada la naturaleza anastomosada de la deformación observada, se propone que el sector norte de Seno Arcabuz, corresponda a un lente kilométrico de roca menos deformada rodeado por bandas miloníticas de alto 'strain' de la Zona de Cizalle Seno Arcabuz (Fig. 7b).

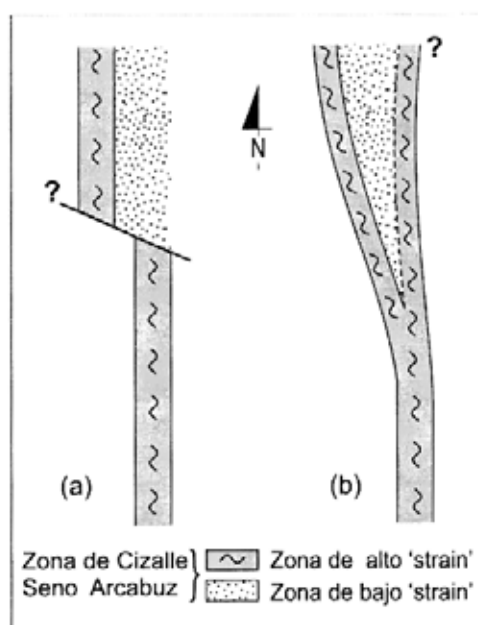


FIG. 7. Esquema que ilustra dos explicaciones alternativas para la disminución del 'strain' hacia el norte dentro de la ZCSA; (a) zona de alto 'strain' que ha experimentado abrupto desplazamiento hacia el oeste; (b) franjas de roca de alto 'strain' con geometría anastomosada en torno a lentes de roca de bajo 'strain'.

CONCLUSIONES

- Observaciones de terreno combinadas con el estudio microscópico de muestras orientadas, permiten señalar que las rocas metamórficas de Seno Arcabuz, pertenecientes a la zona de cizalle del mismo nombre, documentan al menos dos episodios de deformación: uno temprano, asignado al Cretácico Inferior, de carácter milonítico con indicadores de movimiento sinistral inverso y otro tardío, de bajo 'strain', producido durante el plegamiento de la fábrica milonítica.
- La fábrica milonítica temprana está dada por una foliación de rumbo nornoroeste a noroeste, manteo de 48 a 60°W, y por una lineación de azimuth nornoroeste a noroeste y 'rake' de 40° al norte aproximadamente. Esta fábrica milonítica presenta indicadores cinemáticos principalmente sinistral inversos, los que incluyen peces de mica, porfiroclastos asimétricos y superficies S-C. La presencia de una muestra con indicadores de movimiento contradictorio se explicaría por la superposición de un movimiento dextral que habría afectado sólo en forma localizada las rocas de la ZCSA o por un plegamiento de la fábrica temprana. La asociación mineralógica y la microestructura de todas las rocas corresponden a una facies metamórfica de esquistos verdes; en el sector norte, las rocas pertenecen a la parte baja de los esquistos verdes y en el sur, a las partes media a alta.
- La fábrica tardía corresponde al plegamiento de la foliación milonítica y está dada por un clivaje local y espaciado y por una lineación de crenulación. El clivaje posee rumbo nornoroeste a noroeste y manteo subvertical al este y oeste. La lineación de crenulación posee una orientación similar a la presentada por la lineación milonítica.
- De acuerdo a la geología y cinemática presentada en este trabajo y a los antecedentes geológicos y geocronológicos, existentes para la Zona de Cizalle Seno Arcabuz, se proponen dos diferentes escenarios para la relación espacial estrecha entre la ZCSA y los bloques de roca que ésta yuxtapone. El primero asume que la exhumación diferencial del bloque occidental es coetánea con la ZCSA, lo que es consistente con el movimiento sinistral inverso documentado en terreno. El segundo escenario posible es que la ZCSA no sea coetánea a la exhumación diferencial del bloque occidental, en cuyo caso la zona de cizalle se habría formado durante un evento transcurrente sinistral y su exhumación habría ocurrido con posterioridad, debido a su basculamiento tectónico, cuyo pivote estaría al norte de la zona estudiada. Aunque ambos escenarios son posibles, no explican de manera sencilla que el grado metamórfico e intensidad de la deformación aumenten hacia el sur.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio contó con el financiamiento de la Cátedra Presidencial en Ciencias a uno de los autores (FH) y de los proyectos FONDECYT 1980741 y 1010412. El capitán V. Alvarez y su tripulación en el cutter 21 de Mayo permitieron el trabajo de terreno, en el que también participaron J. y M. Bradshaw (Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda). El señor L. Jofré (Universidad Católica del Norte),

preparó con excelente disposición varias de las figuras. Se agradece al Editor Emérito, Sr. E. Pérez d'A. (Sernageomin) y a los evaluadores señores R. Forsythe (University of North Carolina, U.S.A.), E. Godoy (Sernageomin) y J. Skármeta (Codelco-Chile), por las sugerencias que contribuyeron a mejorar el manuscrito.

REFERENCIAS

- Bell, T.H.; Hammond, R.L. 1984. On the internal geometry of mylonite zones. *Journal of Geology*, Vol. 92, p. 667-686.
- Brown, E.; Talbot, J. 1989. Orogen-parallel extension in the North Cascades crystalline core, Washington. *Tectonics*, Vol. 8, No. 6, p. 1105-1114.
- Forsythe, R.D.; Dalziel, I.W.D.; Mpodozis, C.; Hall, B.; Barrientos, S. 1981. Geologic studies in the outer Chilean fjords, R.V. Hero cruise 79-5. *Antarctic Journal of the United States*, Vol. 15, No. 5, p. 109-111.
- Forsythe, R.; Mpodozis, C. 1983. Geología del basamento pre-Jurásico Superior en el Archipiélago Madre de Dios, Magallanes, Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín*, No. 39, 63 p. Santiago.
- Forsythe, R.D.; Nelson, E. 1985. Geological manifestation of ridge collision: evidence for the Golfo de Penas, Taitao basin, southern Chile. *Tectonics*, Vol. 4, p. 477-495.
- Hervé, F. 1988. Late Paleozoic subduction and accretion in southern Chile. *Episodes*, Vol. 11, No. 3, p. 183-188.
- Hervé, F.; Prior, D.; López, G.; Ramos, V.A.; Rapalini, A.; Thomson, S.; Lacassie, J.P.; Fanning, M. 1999. Mesozoic blueschists from isla Diego de Almagro, southern Chile. In *South American Symposium on Isotope Geology, No. 2, Actas*, Vol. 2, p. 318-321. Córdoba, Argentina.
- Jiang, D.; Lin, S.; Williams, P.F. 2001. Deformation path in high strain zones, with reference to slip partitioning in transpressional plate boundary regions. *Journal of Structural Geology*, Vol. 23, p. 991-1005.
- Lister, G.S.; Snoke, A.W. 1984. S-C Mylonites. *Journal of Structural Geology*, Vol. 6, p. 619-638.
- Simpson, C.; Schmid, S.M. 1983. An evaluation of criteria to deduce the sense of movement in sheared rocks. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. 94, p. 1281-1288.
- Twiss, R.J.; Moores, E.M. 1992. *Structural Geology*. W.H. Freeman and Co., 332 p. New York.