

RASGOS ESTRUCTURALES Y PETROGRÁFICOS DE PLUTONES LOCALIZADOS ENTRE SAN QUINTÍN Y LA SIERRA SAN PEDRO MÁRTIR, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Luis A. Delgado-Argote¹, Tomás A. Peña-Alonso¹⁻², Elisa Ramírez¹, Harald Böhnel³, Roberto Molina-Garza³ y Amabel Ortega-Rivera³

¹ División de Ciencias de la Tierra, CICESE

² Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

³ Centro de Geociencias, UNAM

RESUMEN

De la interpretación de una imagen satelital de un área de 5,000 km² ubicada entre el sur de la sierra San Pedro Mártir y el este de San Quintín se infieren relaciones complejas entre plutones cuyo emplazamiento, a diferencia de los cuerpos zonados típicos, parece regirse por un control estructural regional. Los lineamientos rectilíneos pueden asociarse a sistemas regionales de fracturas y fallas, mientras que los curvilíneos pueden reflejar los contactos y el fracturamiento interno de los plutones. Los cuerpos curvilíneos más pequeños pueden estar relacionados con estructuras subvolcánicas del último periodo del arco Alisitos del Cretácico.

Regionalmente, la zona analizada se dividió en occidental y oriental a partir de un Lineamiento Principal orientado N30°W que en esta zona es subparalelo a la frontera magnetita-ilmenita. La región occidental, donde se encuentra la sección El Socorro, se caracteriza por el dominio de rasgos estructurales entre 0.5 y 10 km de longitud orientados N10°E, N25°W y N40°E que pueden asociarse al desarrollo de complejos plutónico-volcánicos.

Se interpretaron los complejos plutónicos El Quiote (EQ), El Socorro A (SOC_A), El Socorro B (SOC_B), Agua Escondida (AGE) y El Salto (SA) y una alineación de plutones (E2) a lo largo de la sección. La clasificación petrográfica de 28 muestras representativas indica una variación de diorita a granito (*sensu lato*) con predominio de cuarzomonzonita-cuarzomonzodiorita, sin zonamiento aparente. Las intrusiones son múltiples y los emplazamientos sucesivos desarrollan complejos plutónicos donde el proceso de mezcla de magmas es común.

El fracturamiento vertical en los plutones muestra un paralelismo notable con las orientaciones de los lineamientos, mientras que del análisis de las fracturas horizontales se interpreta basculamiento de EQ, AGE y SA hacia el occidente. El análisis geobarométrico de una muestra de SA indica una profundidad de enfriamiento equivalente a 2 kbar, dentro de la zona de deformación frágil.

Se interpretó de las relaciones de campo que EQ y SOC_A están separados por los plutones E2; SOC_A y SOC_B forman un complejo plutónico donde SOC_B es más antiguo y AGE intrude su borde oriental; SA es una estructura compleja de plutones que aparentemente no afecta a AGE. Se infiere que SOC_A, SOC_B y E2 pudieron emplazarse simultáneamente y que E2 basculó hacia el W a EQ_D. Al continuar la acreción magmática los cuerpos fueron levantados y se aceleró la exhumación. AGE y SA fueron basculados hacia el occidente posiblemente por factores de acreción tectónica o por el emplazamiento de los plutones orientales del sur de la sierra San Pedro Mártir.

Palabras clave: Complejo plutónico, fracturamiento, deformación, petrografía, basculamiento.

ABSTRACT

From a satellite image of a 5,000 km² area located between San Quintín and Sierra San Pedro Mártir, complex internal relationships are inferred between plutonic bodies, whose mode of emplacement seems to be controlled by regional linear structures, in contrast with the typical concentric plutons north of this area.

Rectilinear lineaments can be associated to regional fault systems, while the curvilinear features may be due to internal fractures and contacts of the plutonic bodies. The smallest curvilinear features can be related to subvolcanic structures of a late period of the Cretaceous Alisitos arc.

Regionally, the study area was divided into an Eastern and a Western part based on a N30°W regional Main Lineament, subparallel to the magnetite-ilmenite border zone. The El Socorro section is located in the western zone which is characterized by 0.5 to 10 km long rectilinear lineaments oriented toward N10°E, N25°W and N40°E, to which can be related some plutonic-volcanic complexes.

The El Quiote (EQ), El Socorro A (SOC_A), El Socorro B (SOC_B), Agua Escondida (AGE) and El Salto (SA) plutonic complexes, and one alignment of small plutons were interpreted along the section. The petrographic classification of 28 representative samples indicates a variation from diorite to granite (*sensu lato*), with quartz-monzonite and quartz-monzodiorite being the most abundant, without apparent zoning. Most intrusions are multiple, and their successive emplacement developed plutonic complexes where magma mingling is common.

Vertical fractures in the plutons show a remarkable parallelism with respect to the lineaments. It is interpreted from horizontal fractures that EQ, AGE and SA are tilted westward. The geobarometric analysis of a sample from SA indicates a cooling depth equivalent to 2 kbar, in the brittle deformation zone.

It is interpreted, from field relationships, that E2 separates EQ from SOC_A; SOC_A and SOC_B form a plutonic complex, the dioritic SOC_B being the oldest with AGE intruding its eastern border; SA is a complex plutonic structure that apparently do not intrude AGE. It is inferred that SOC_A, SOC_B and E2 were emplaced simultaneously, but E2 tilted EQ₀ westward. It is also interpreted that plutons exhumation was accelerated during magmatic accretion, and that AGE and SA were tilted, probably by tectonic accretion or by the emplacement of the eastern plutons located south of the sierra San Pedro Mártir.

Keywords: Plutonic complex, joints, deformation, petrography, tilting.

INTRODUCCIÓN

El Batolito de las Sierras Peninsulares o Complejo Batolítico Peninsular (CBP) expone afloramientos continuos de rocas intrusivas desde el sur de Los Angeles, California hasta el paralelo 28°N, en donde se ven interrumpidos por una cubierta extensa de rocas volcánicas terciarias. El CBP ha sido dividido con criterios petrológicos (Gastil, 1983) y geoquímicos (Silver *et al.*, 1979); el que se adopta en este trabajo, se refiere al predominio de magnetita o ilmenita como mineral accesorio (Gastil *et al.*, 1986).

El registro de la actividad magmática en la margen occidental de Norteamérica sugiere que existió un arco continuo que se caracterizó por una fase volcánico-intrusiva que migró de W a E del Jurásico-Cretácico al Paleoceno (Ortega-Rivera, 2003). La reconstrucción de la margen californiana pre-terciaria permite suponer la continuidad inicial del complejo de los batolitos cordilleranos del occidente de Estados Unidos con los de Baja California y Sonora (Silver, 1982; Ross, 1984; Silver y Mattison, 1986; Silver y Chapell, 1988; Nicholson *et al.*, 1994).

Los estudios efectuados en los granitoides de la península de Baja California y Sonora indican variaciones petrológicas que, en general, se manifiestan como cinturones composicionales que de occidente a oriente, pueden incluir desde rocas de composición gabrónica a granítica en Baja California, y que en Sonora pueden llegar a ser alcalinas (Gastil, 1983). En general, los batolitos tienden a estar zonados casi concéntricamente; los núcleos en los cuerpos del occidente (zona de magnetita) son máficos, mientras que en los orientales (zona de ilmenita) son félsicos (Gastil *et al.*, 1975). Trabajos de detalle en plutones con núcleos gabrónicos y dioríticos (Delgado-Argote *et al.*, 1995) muestran que las rocas más máficas son las más antiguas y las de la periferia, principalmente monzoníticas, levantaron y arrancaron mecánicamente de raíz a los plutones de primera generación durante su emplazamiento. Algunos de los plutones más característicos o mejor conocidos se muestran en la Figura 1. En estos complejos, los plutones se consideran cámaras magmáticas

fósiles de volcanes extintos del arco Alisitos (Cretácico). Los complejos plutónicos del área de estudio pertenecen al grupo del occidente, cuyo núcleo tiende a ser máfico, aunque el zonamiento no es siempre evidente.

Los mapas geológicos del INEGI y el mapa de reconocimiento geológico de Gastil *et al.* (1975) se usaron como base para la cartografía regional de este trabajo (Figura 2.a). El área de análisis con imágenes de satélite y la sección El Socorro (definida por la línea de muestreo en puntos) se muestra en el mapa litológico de la Figura 2.a. La línea de muestreo atraviesa por lo menos dos cuerpos composicionalmente distintos en donde Gastil *et al.* (1975) identificaron rocas que varían de gabro a granodiorita en plutones posiblemente zonados.

Recientemente, los trabajos más importantes relacionados con los complejos plutónicos cretácicos de Baja California se han enfocado al estudio de la paleoposición y edad (Böhnell y Delgado-Argote, 2000; Böhnell *et al.*, 2002; Ortega-Rivera, 2003), así como de la geocronología y estructura (Delgado-Argote *et al.*, 1995; Johnson *et al.*, 1999a y b). De los anteriores, sólo el trabajo de Böhnell *et al.* (2002) incluye un análisis regional basado en la interpretación de imágenes de satélite.

Se ha documentado que algunos plutones zonados fueron emplazados diapíricamente, observándose fenómenos de inflamamiento (*ballooning*; Chávez-Cabello, 1998), mientras que otras estructuras plutónicas son el resultado de diapiros producidos por intrusiones múltiples (Delgado-Argote *et al.*, 1995). Otros cuerpos con fracturamiento circular que incluyen diques anulares, cuyas dimensiones son menores, se interpreta que son resultado del emplazamiento de intrusivos asociados con actividad volcánica (Johnson *et al.*, 1999a). En el área de estudio se desconoce el estilo de emplazamiento y las variaciones mineralógicas y litológicas de los cuerpos plutónicos por lo que, a partir del análisis petrográfico de muestras selectas, se analizaron las variaciones mineralógicas regionales en sentido WSW-ENE de la sección El Socorro. Cronológicamente, según los crontornos (líneas que representan una edad resultante de

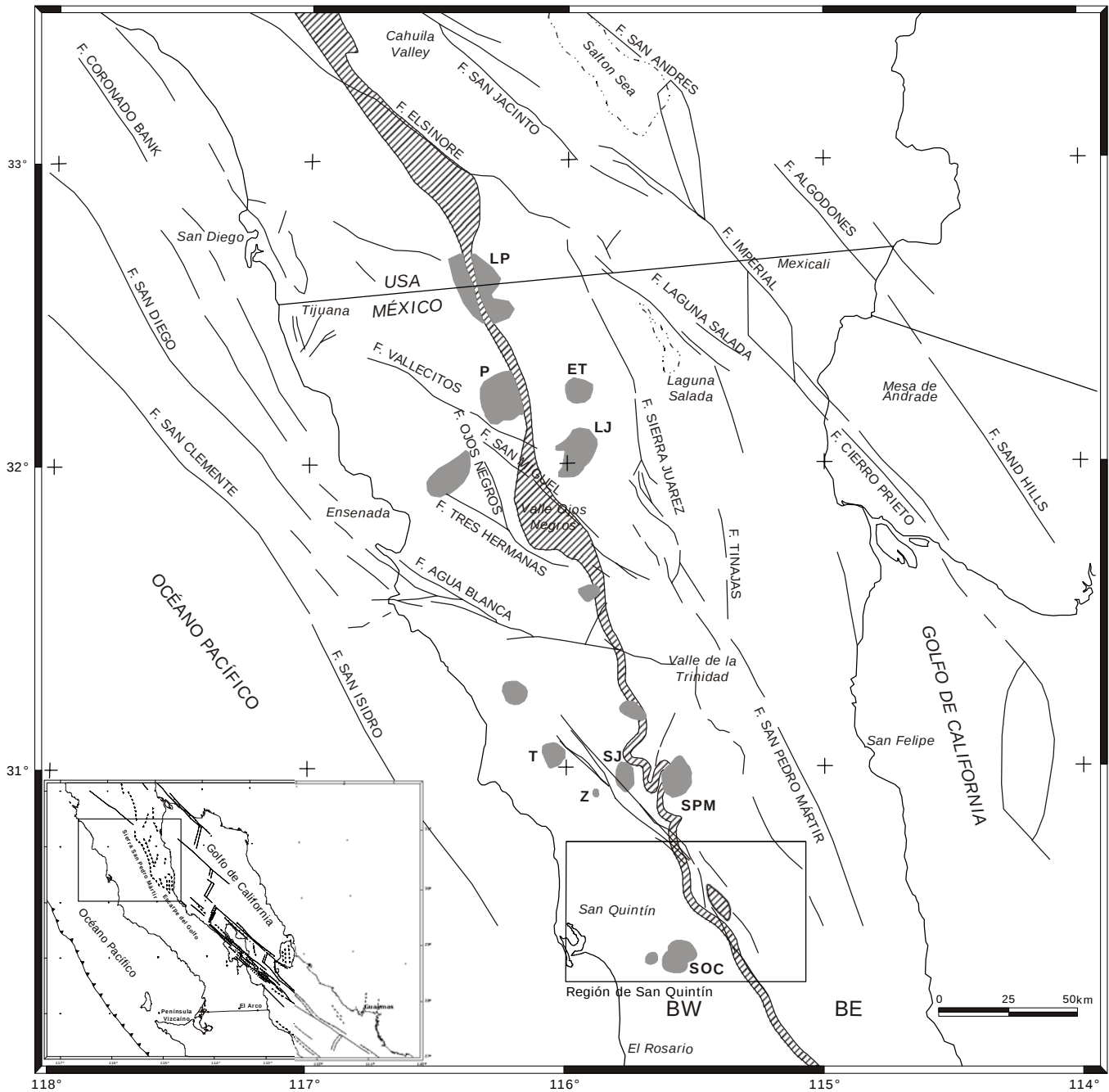


Figura 1. Mapa de localización de la región de San Quintín y de los rasgos geológicos mayores de Baja California (modificado de Böhnel et al., 2002). Las zonas sombreadas son los principales plutones identificados de imágenes satelitales (Romero-Espejel y Delgado-Argote, 1997). El área con líneas en diagonal es la frontera magnetita-ilmenita (Gastil et al., 1990) y el lineamiento semiparalelo a ésta, entre las latitudes de los plutones San Telmo y El Socorro es el Lineamiento Principal (Delgado-Argote et al., 2003). BW y BE corresponden al Batolito Occidental y Batolito Oriental de acuerdo a su posición con respecto a la frontera magnetita-ilmenita. El significado de las abreviaturas de los plutones es: ET = El Topo; LP = La Posta; P = Pinal; LJ = Laguna Juárez; T = San Telmo; SJ = San José; Z = La Zarza; SPM = San Pedro Mártir; SOC = Socorro.

la interpolación de valores geocronológicos de un tipo de mineral utilizando el mismo método) definidos por Ortega-Rivera (2003) indicados en la Figura 3, la zona de estudio se localiza entre los valores de 120 y 110 Ma (edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en hornblenda y biotita).

En este trabajo, a través de la visión sinóptica del terreno con una imagen de satélite, se interpretaron: 1) los lineamientos estructurales rectilíneos con significado o alcance regional y 2) los

curvilineamientos producidos muy probablemente por el emplazamiento de los plutones (Figuras 1 y 3). A través de la cartografía litológica y del fracturamiento, así como de la interpretación de la imagen, se propone una relación temporal entre los grupos de plutones que afloran a lo largo de la sección.

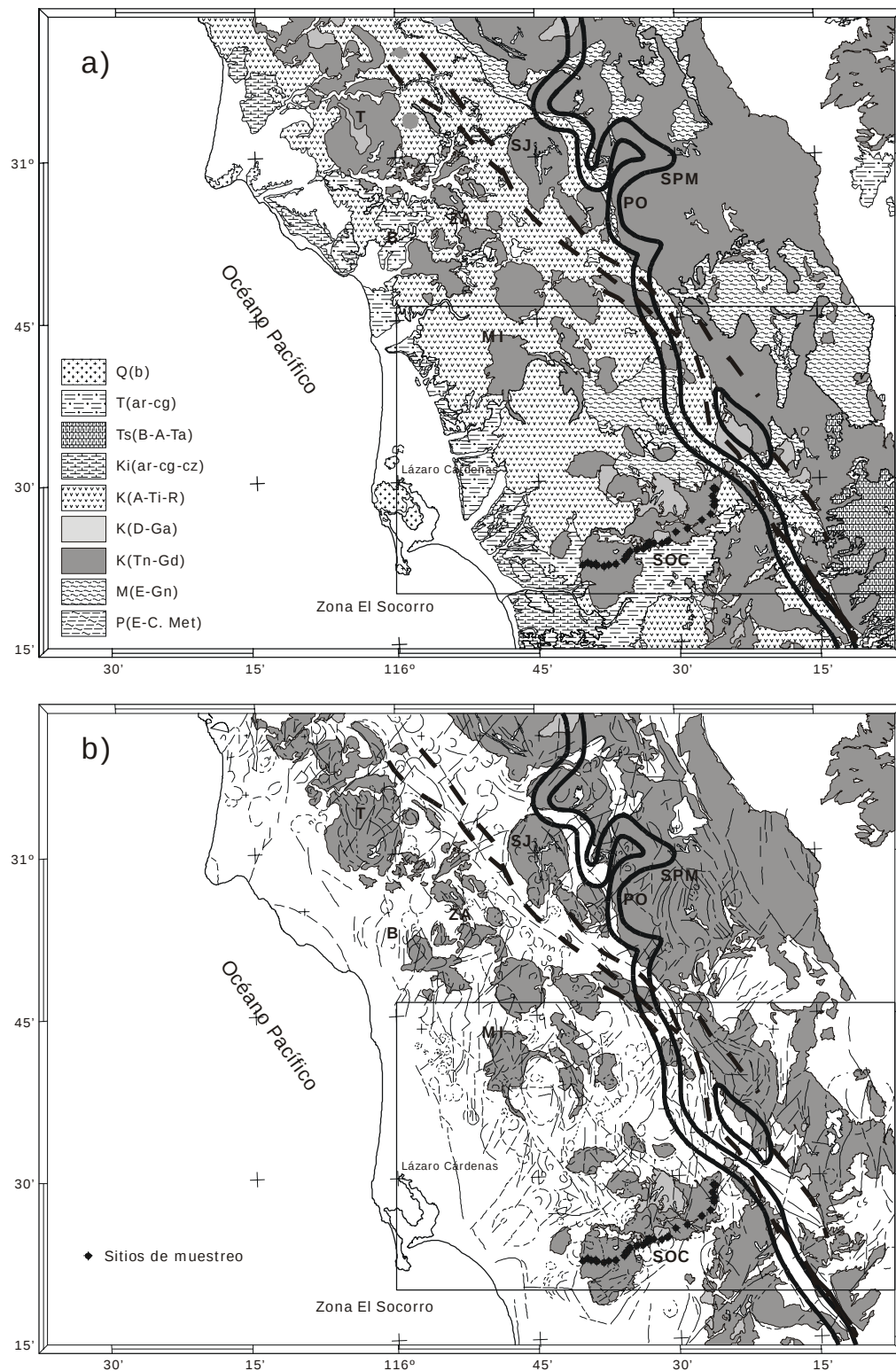


Figura 2. Mapa litológico (a) y de lineamientos interpretados en imagen de satélite (b) entre las latitudes 30° y 31°30' (modificado de Delgado-Argote et al., 2003). Se indica la ubicación de la frontera magnetita-ilmenita en doble línea continua, el Lineamiento Principal en doble línea discontinua, los principales plutones identificados en esta zona, la región de San Quintín y la sección El Socorro. Los plutones son: B = Aguaje del Burro; MI = El Milagro; PO = El Potrero; SJ = San José; SOC = El Socorro; SPM = San Pedro Mártir; T = San Telmo; Z = La Zarza. La litología es: Paleozoico: P(E-C. Met.) = complejo metamórfico de esquistos. Mesozoico: M(E-Gn) = esquisto y gneiss. Cretácico: K(Tn-Gd) = tonalita-granodiorita; K(D-Ga) = diorita-gabro; K(A-Ti-R) = rocas andesíticas, tobas indiferenciadas y rocas riolíticas del Grupo Alisitos; Ki(ar-cg-cz) = areniscas, conglomerados y calizas del Grupo Alisitos. Terciario: T(B-A-Ta) = basalto-andesita y toba ácida; T(ar-cg) = areniscas y conglomerados. Cuaternario: Q(b) = basalto. Las zonas sin nomenclatura corresponden a depósitos principalmente aluviales del Cuaternario. En la Figura (b) se indica en sombreado la distribución de las rocas plutónicas.

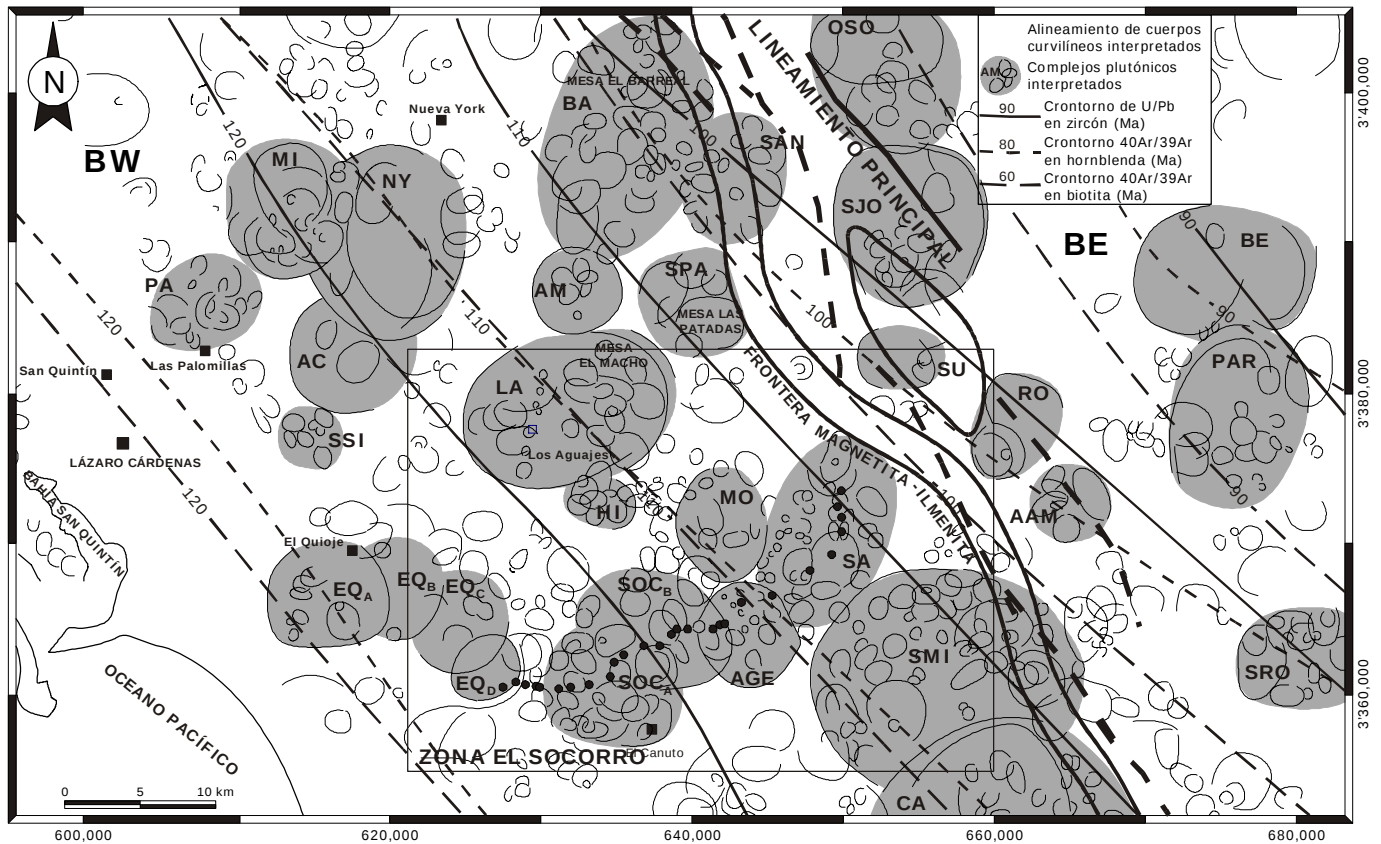


Figura 3. Mapa de plutones y alineamientos de curvilineamientos interpretados de la región de San Quintín. Se indica la zona de frontera magnetita-ilmenita y un segmento del Lineamiento Principal de la Fig. 2. Los cronotornos tomados de (Ortega-Rivera, 2003) en la región se indican en el recuadro superior (ver texto). El recuadro ubicado en el interior de la figura es la región de El Socorro, mostrando con puntos sólidos los sitios de muestreo de la sección El Socorro. Las abreviaturas de las zonas y plutones significan: BE= Batolito Oriental; BW = Batolito Occidental; MI = El Milagro; PA = Las Palomillas; SSI = San Simón; NY = Nueva York; AC = Agua Chiquita; BA = El Barreal; SAN = San Antonio; AM = Agua del Monte; SPA = San Pablo; HI = Las Hilachas; LA = Los Aguajes; EQ_A = El Quiote A; EQ_B = El Quiote B; EQ_C = El Quiote C; EQ_D = El Quiote D; SOC_A = El Socorro A; SOC_B = El Socorro B; AGE = Agua Escondida; SA = El Salto; MO = El Morro; SMI = San Miguel; CA = El Carrizo. BE = Batolito Oriental; SRO = Santa Rosa; AAM = Agua Amarga; RO = El Rosarito; PAR = El Parral; BE = El Berrendo; SU = La Suerte; SJO = San José; OSO = Campo del Oso. La base cartográfica y la toponimia fueron tomadas de la Carta Geológica Lázaro Cárdenas del INEGI (H11-5-6; 1:250,000).

CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES REGIONALES

En esta sección se analizan los rasgos estructurales de los complejos de plutones del área cercana a la sección El Socorro, desde la perspectiva regional. Consideramos complejo plutónico a aquella asociación de plutones que guarda una geometría con tendencia circular, distinguiéndose de los plutones alineados que, en general, son más pequeños. De esta forma, un complejo puede contener o estar afectado por alineaciones de plutones; las asociaciones en complejos o alineaciones no implican necesariamente que los cuerpos intrusivos estén genéticamente relacionados.

RASGOS ESTRUCTURALES REGIONALES

De la interpretación estructural de la imagen satelital entre la costa Pacífico y el Escarpe del Golfo (10,000 km²), se interpretaron cuerpos plutónicos a partir de lineamientos curvilíneos (Figura 2.b). Se observa que muchos plutones son cuerpos individuales y comúnmente forman complejos plutónicos constituidos por cuerpos de as-

pecto anidado. Se puede observar en las Figuras 2.a y b que los rasgos curvilíneos son característicos de las unidades del arco magmático del Grupo Alisitos del Cretácico y más antiguas, mientras que en las unidades sedimentarias terciarias sólo se reconocen lineamientos rectilíneos, pues los rasgos relacionados con la actividad magmática del arco están cubiertos por las rocas más jóvenes. Esta diferencia en la geometría de los lineamientos nos permite inferir que todos los rasgos curvilíneos tienen correlación con actividad magmática.

Regionalmente, uno de los rasgos más importantes y tectónicamente significativos es el conjunto de lineamientos rectilíneos (que en adelante llamaremos lineamientos) de hasta 25 km de longitud de la parte central del área que, a la latitud de San Pedro Mártir se orienta 340°, mientras que a la latitud de San Quintín se orienta en promedio hacia 320° (Figura 2.b). A estos conjuntos los llamaremos aquí el Lineamiento Principal que, salvo en el occidente de la Sierra San Pedro Mártir, coincide con el Cabalgamiento Principal Mártir (*Main Mártir Thrust*) interpretado por Johnson *et al.* (1999b) como un contacto tectónico entre las unidades cretácicas del Grupo Alisitos y las metamórficas paleozoicas. En esa región, el cabalga-

miento se ubica al oriente del plutón San José, mientras que el Lineamiento Principal se localiza al occidente del mismo y coincide con la zona de contacto entre los dominios sedimentarios y volcánico-volcanoclásticos del Grupo Alisitos. Un rasgo notable del Lineamiento Principal es que no afecta a las rocas plutónicas; sólo atraviesa a las rocas del Grupo Alisitos y parece definir los bordes de algunos plutones, como es el caso del oriente del plutón Potrero y sur del plutón San Pedro Mártir (Figura 2.a y b); otros rasgos estructurales paralelos al Lineamiento Principal tampoco cortan a los plutones. Otra característica importante del Lineamiento Principal es su paralelismo con respecto a la frontera magnetita-ilmenita, sobre todo hacia el sur de la Sierra San Pedro Mártir, lo que le imprime un valor tectónico adicional en esta zona.

Los plutones del oriente de la frontera magnetita-ilmenita son más grandes e intruden a rocas metamórficas, principalmente del Paleozoico, mientras que los intrusivos occidentales están más directamente asociados con las secuencias de rocas volcánicas del Grupo Alisitos. En la zona oriental los lineamientos estructurales y el Escarpe del Golfo tienden a ser paralelos.

LINEAMIENTOS RECTILÍNEOS

Los lineamientos estructurales individuales o discretos interpretados de la imagen satelital a escala 1:250,000 (Figura 4) varían en longitud de 500 m a aproximadamente 10 km. Para facilitar el análisis de los lineamientos, se dividió la región en zona occidental y oriental a partir del Lineamiento Principal.

En la zona occidental del área El Socorro se observa una concentración máxima orientada aproximadamente N10°E (Figura 4), que contrasta con la tendencia regional hacia el N10°W reportada por Delgado-Argote *et al.* (2003) desde el sur de la Falla Agua Blanca hasta la región de San Quintín (Figura 1); otras concentraciones importantes se encuentran aproximadamente en N25°W y N40°E (Figura 4), similares a las regionales reportadas por los mismos autores. Por su continuidad, destacan dos lineamientos orientados aproximadamente N40°W (Nueva York y Agua del Monte), casi paralelos al Lineamiento Principal y otros dos N70°E (Santo Domingo y El Socorro; Figura 4); el mayor (Nueva York) tiene una longitud cercana a 40 km y los restantes tienen cerca de 25 km. Hacia el oriente, la concentración máxima está en N10°E. Otras concentraciones importantes en la zona occidental se orientan N20°W y N45°E. Los lineamientos orientados hacia el NW en esta región posiblemente

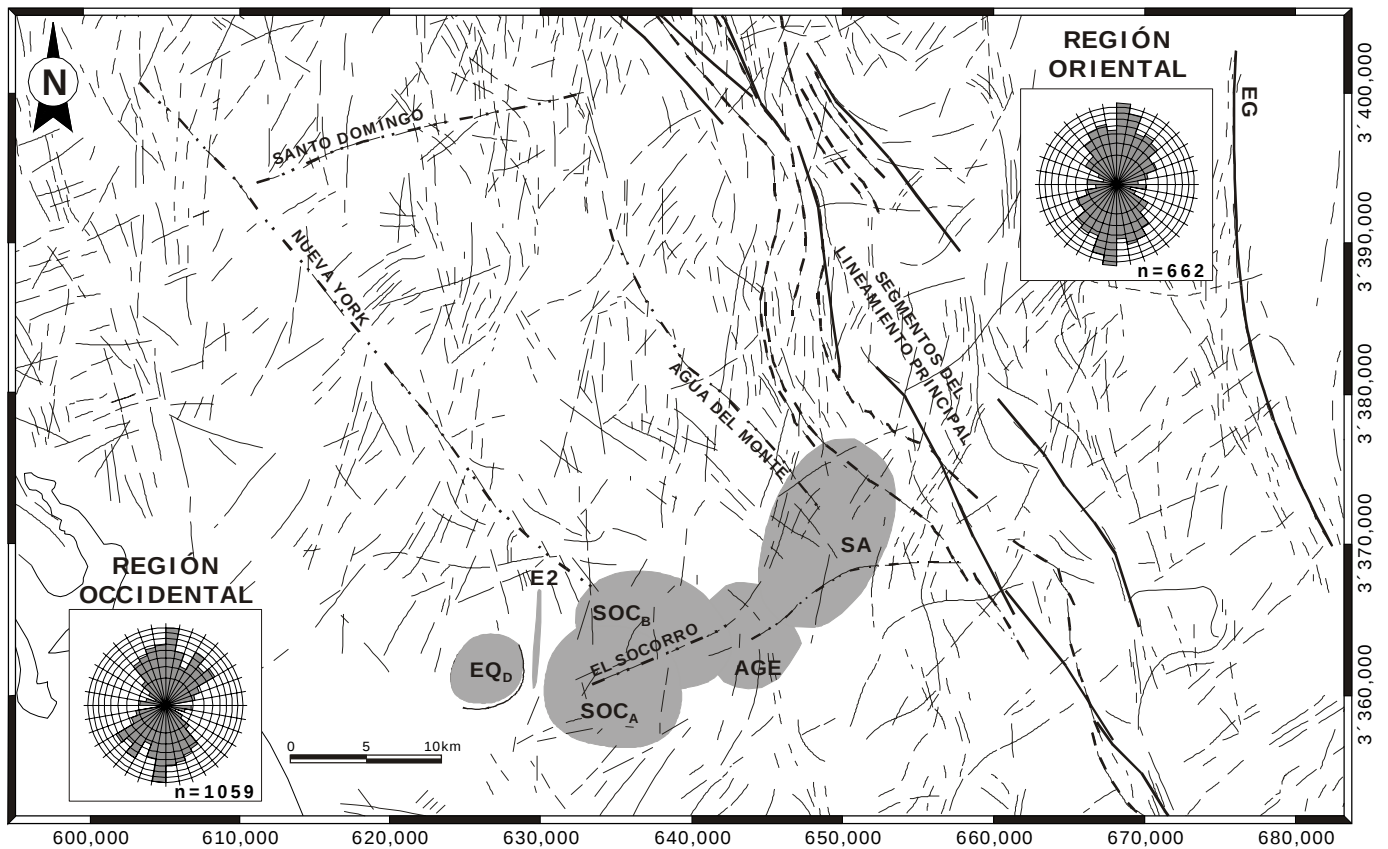


Figura 4. Lineamientos rectilíneos con sus respectivos diagramas de rosa de la región occidental y oriental con respecto al Lineamiento Principal. Además se muestran lineamientos mayores (Santo Domingo, El Socorro, Nueva York y Agua del Monte) interpretados de la imagen satelital de la región de San Quintín. Se incluyen de oeste a este las estructuras plutónicas identificadas en la sección El Socorro (las abreviaturas son como en la figura 3), el Lineamiento Principal (Delgado-Argote et al., 2003) y el Escarpe del Golfo (EG). Para la elaboración de las rosas de orientación de los lineamientos rectilíneos se efectuó un conteo en una retícula de 10 x 10 km para ponderar la longitud de los lineamientos.

te se relacionen con la formación del Escarpe del Golfo (EG; Figura 4), debida a la deformación extensional que dio origen a la provincia *Basin and Range*.

LINEAMIENTOS CURVILÍNEOS

Se infiere que estas estructuras corresponden a plutones individuales o conjuntos anidados cuyas formas varían de redondeadas a elípticas. También es común encontrar cuerpos curvilíneos alineados (alineaciones) cuya alineación, al igual que los lineamientos estructurales, posiblemente está asociada a estructuras regionales a lo largo de las cuales se emplazaron cuerpos discretos de magma o bien, al movimiento horizontal del magma durante la evolución de complejos volcánico-plutónicos (Marsh, 2000), como los documentados en la costa del Golfo de California (Delgado-Argote y García-Abdeslem, 1999) y otros lugares del mundo (Shaw, 1980). En las siguientes secciones sólo se hará referencia a los lineamientos curvilíneos no alineados.

Se observa en la Figura 3 que los plutones individuales al occidente de la frontera magnetita-ilmenita tienen diámetros que oscilan entre 350 m y poco menos de 7 km, mientras que aquellos que se encuentran en el oriente varían de 600 m a poco menos de 10 km. La superficie de los complejos plutónicos varía de 15 a 140 km² en la región occidental y de 20 a 80 km² en la región oriental. No se identificaron cuerpos curvilíneos bien definidos dentro de la unidad metasedimentaria del Cretácico, correspondiente a la parte oriental del Grupo Alisitos.

DESCRIPCIÓN DE LOS COMPLEJOS PLUTÓNICOS

A lo largo de la sección El Socorro aflora una serie de plutones [K(Tn-Gd) y K(D-Ga)] que intrude al Grupo Alisitos [K(A-Ti-R) y K(ar-cg-cz)]; ambos grupos de rocas pueden estar parcialmente cubiertos por conglomerados continentales del Paleoceno [T(ar-cg)], según se muestra en la Figura 2.a. El muestreo de los cuerpos plutónicos termina a 3 km de la frontera magnetita-ilmenita y a 6 km del Lineamiento Principal, los que se separaron de acuerdo con la figuras 3 y 5. A lo largo de la sección se colectaron 28 muestras con las que se realizó un análisis petrográfico detallado (Peña Alonso, 2003) y cuya clasificación modal, de acuerdo con el diagrama QAPF (Streckeisen, 1973), se presenta en la Figura 6. En los mismos sitios de muestreo de roca se midieron fracturas primarias, que se analizan en la segunda parte de esta sección.

PLUTÓN EL QUIOTE D (EQ_D)

El Quiote D (EQ_D) es un plutón simple de 16 km² cuyo borde NW está aparentemente cortado por El Quiote C (EQ_C); es el miembro del extremo SE de una serie de cuatro plutones que aparentemente forman un complejo que se alinea en forma de arco, burdamente orientado E-W (Figura 4). Los tres puntos de muestreo sólo permiten conocer la composición de la periferia del plutón que, según se observa en la Figura 6, muestra una composición que varía de monzonita a cuarzo monzodiorita. Las asociaciones de minerales máficos son: 1. hornblenda (Hbl)-hiperstena (Hy), 2. hornblenda-biotita (Bi) y 3. biotita para las muestras 1 a 3, respectivamente; la oligoclasa es la plagioclasa dominante. La magnetita, identificada por su susceptibilidad magnética alta, es el mineral opaco más abundante y se presenta en cristales entre 0.2 a 0.8 mm de diámetro. Es constante la presencia de hematita y rutilo.

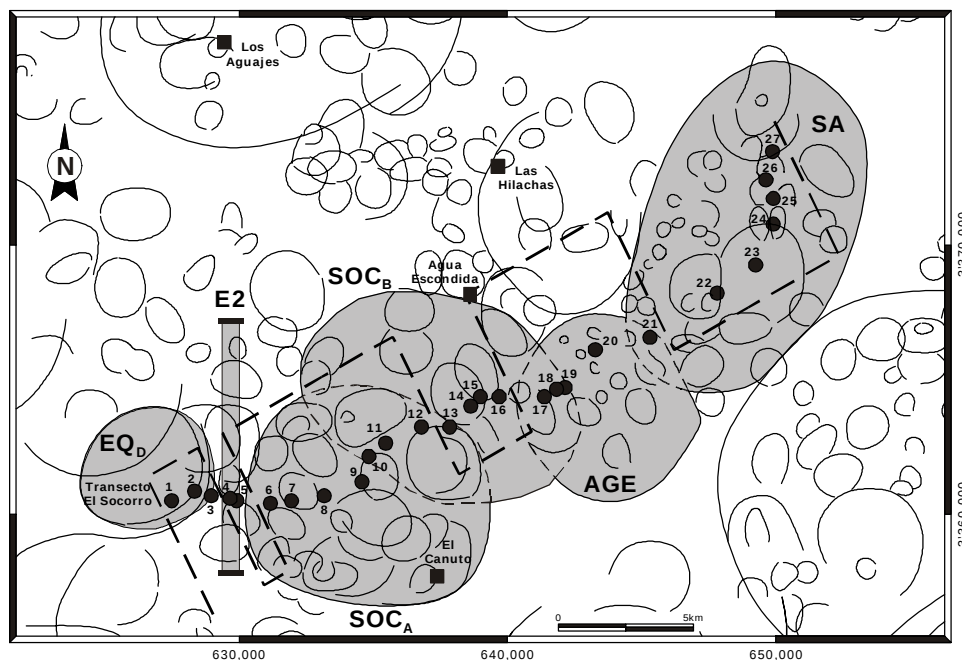


Figura 5. Plutones interpretados en la sección El Socorro. La línea discontinua indica el agrupamiento de los sitios de muestreo para determinar el estilo de fracturamiento de El Quiote D (EQ_D), E2, El Socorro A (SOC_A), El Socorro B (SOC_B), Agua Escondida (AGE) y El Salto (SA). Los números de los puntos sólidos son las muestras que aparecen en el diagrama de la Fig. 6 y los números entre paréntesis corresponden a los plutones indicados en la Fig. 9.

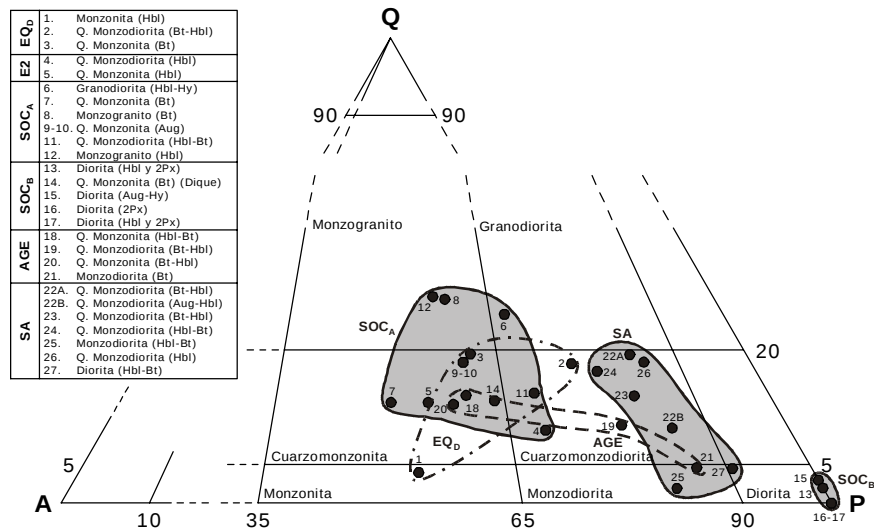


Figura 6. Clasificación modal de 28 muestras del mismo número de sitios a lo largo de la sección El Socorro utilizando el diagrama QAPF (Streckeisen, 1973). Las esquinas del triángulo son: P = plagioclasa, A = feldespatos alcalinos, Q = cuarzo. Las áreas encierran a las muestras correspondientes a cada cuerpo plutónico y las áreas sombreadas envuelven a las muestras correspondientes a los complejos plutónicos donde hay más de tres sitios de muestreo. Abreviatura de los minerales: Aug = Augita; Hy = Hiperstena; Hbl = Hornblenda; Bt = Biotita. El cálculo de la moda se basó en el conteo de puntos (605) de cinco áreas representativas de la lámina delgada (121 puntos por área).

ALINEACIÓN E2

E2 es un alineamiento de cinco cuerpos curvilíneos elípticos. Los plutones están yuxtapuestos a lo largo de seis km y el alineamiento está orientado N5°E (Figuras 3, 4 y 5). E2 se localiza entre los complejos de plutones EQ_D y SOC_A. La sección W-E corta al conjunto en su extremo sur, de donde se tomaron las muestras 4 y 5, clasificadas como cuarzomonzodiorita y cuarzomonzonita, respectivamente y que por su afinidad con las rocas de SOC_A, se agruparon con éstas. Las dos muestras analizadas tienen un contenido de óxidos y paragénesis minerales (Hy, Hbl y Bi) similares y su textura es porfídica granular. La proporción de Hbl es mayor en la muestra 4 (9.3%) que en la 5 (0.7%); el ortopiroxeno se encuentra casi en la misma proporción (0.7 a 0.5%); la biotita se mantiene constante. En ambas muestras la mayoría de los minerales opacos (magnetita y hematita) tienen un tamaño constante cercano a los 0.3 mm.

COMPLEJO PLUTÓNICO EL SOCORRO

Está ubicado al oriente de E2. Para fines de descripción, se dividió en los complejos discretos SOC_A y SOC_B (Figuras 3 y 5). Se colectaron 12 muestras, de las que siete son de SOC_A y las cinco restantes son de SOC_B. Ambos complejos discretos forman dos conjuntos petrográficamente distintos: SOC_A varía de monzogranito a cuarzomonzodiorita, predominando la cuarzomonzonita, mientras que cuatro muestras de SOC_B grafican en el campo de la diorita (Figura 6), indicando zonamiento composicional del complejo. Aunque no puede hacerse una separación clara de los dos complejos a partir de la imagen de satélite, las relaciones de contacto (mezcla de magmas), como se verá adelante, sí indican dos episodios de emplazamiento.

EL SOCORRO A (SOC_A)

Este complejo plutónico aflora en un área de aproximadamente 55 km², está formado por 31 cuerpos circulares que varían de 0.5 a 2.7 km de diámetro. Los extremos E y N están parcialmente cubiertos por la unidad de areniscas y conglomerados terciarios (Figura 2.a). La mayoría de las muestras grafican en los campos de la cuarzomonzonita y el monzogranito (Figura 6). Con excepción de los bordes del plutón, en el resto de las muestras domina la textura



Figura 7. Zona de mezcla de magmas (*mingling*) en la zona de contacto entre los plutones El Socorro A (SOC_A) y El Socorro B (SOC_B). La porción oscura corresponde a rocas de composición diorítica (SOC_B), mientras que la roca clara penetrante es de composición monzogranítica (SOC_A).

xenomórfica de grano medio, mientras que en los bordes la textura es xenomórfica subhedral de grano medio a fino, por lo que se interpreta que en esas zonas las variaciones en las temperaturas de enfriamiento (D&T) fueron considerables. En la parte central del plutón (muestras 8, 9 y 10) el contenido de ortopiroxeno es bajo (Opx < 1%), mientras que el de rutilo puede alcanzar hasta el 1.5% (muestra 9);

la Hbl aumenta hacia los bordes y en el occidente la asociación es $Hbl > Opx$, mientras que en el oriente es $Hbl > > \text{clinopiroxeno (Cpx)}$. El porcentaje y tamaño de la magnetita (0.1-0.2 mm) aumenta gradualmente de oeste a este y la hematita se encuentra prácticamente en todo el complejo plutónico. En la parte oriental la cloritización es notable y además se distingue epidota de alteración (hasta 9.0%), que indica saussuritización incipiente.

En los bordes, los afloramientos se caracterizan por tener estructuras de mezcla mecánica de magmas (mingling) entre cuarzomonzonita y granodiorita en el occidente y entre diorita y monzogranito en el oriente (Figura 7); en ambos casos el primer tipo de roca es la más antigua.

EL SOCORRO B (SOC_B)

Este es un complejo plutónico de aproximadamente 50 km² que anida a 12 cuerpos intrusivos cuyos diámetros varían de 0.6 a 2 km. Le sobreyace el Grupo Alisitos en su borde NW y, al igual que SOC_A, está cubierto parcialmente por conglomerados indiferenciados del Terciario T(ar-cg) en su porción S-SE. Este plutón está formado principalmente por diorita que, en la parte occidental, está intrudida por el complejo SOC_A, por lo que se interpreta que es más antiguo. En el punto 14 aflora un dique cuarzomonzonítico de 20 m de espesor al que se asocia la alteración hidrotermal de la roca encajonante diorítica, caracterizada por la presencia de actinolita. Otra evidencia que atestigua la antigüedad de las rocas máficas es la incorporación de fragmentos de la diorita de SOC_B en una matriz de la cuarzomonzonita de SOC_A en la zona de mezcla de magmas que se muestra en la Figura 7.

La mineralogía característica en el occidente es plagioclasa (oligoclasa-andesina) y los minerales máficos [Hbl, Cpx (augita) e Hy], que se encuentran aproximadamente en la misma proporción. Puede tener biotita y rutilo y es común la presencia de vetillas en enrejado de actinolita. La porción oriental de SOC_B (muestras 16 y 17) se diferencia mineralógicamente de la occidental por la presencia de andesina-labradorita, así como de la ausencia de Bi y rutilo. El tamaño de los cristales de magnetita varía de 0.05 a 0.15 mm en el oeste y de 0.1 a 0.6 mm en el este. La hematita es omnipresente en el complejo plutónico.

AGUA ESCONDIDA (AGE)

Este es un complejo plutónico de 38 km² cuya definición geométrica es pobre e incluye varias alineaciones de plutones pequeños, cuyas dimensiones son equivalentes a las de troncos. Se encuentra entre dos complejos distintos, tanto por sus características estructurales, como composicionales. AGE anida 14 cuerpos intrusivos cuyo diámetro varía de 0.3 a 2.3 km. La mitad sur está cubierta por la unidad de areniscas y conglomerados del Terciario y en la mitad norte le sobreyace el Grupo Alisitos (Figura 2). De acuerdo con la interpretación de complejo circular, el borde occidental de AGE y el borde oriental de SOC_B se intersectan; tres muestras se localizan en la zona de sobreposición y la asignación de las muestras a uno u otro plutón es simplemente por afinidad composicional (Figuras 5 y 6). De este complejo son las muestras 18 a 21, las que varían de cuarzomonzonita a monzodiorita (Figura

6). En la Figura 5 se observa que la muestra 17 podría pertenecer a AGE, sin embargo, debido a su composición diorítica es más probable que esté asociada a SOC_B. En todo el complejo plutónico la plagioclasa dominante es oligoclasa-andesina, excepto en el borde occidental, donde también cristalizó labradorita. La Hbl y la Bi, que en conjunto pueden alcanzar el 23% del volumen total, son los principales minerales máficos. La Bi aumenta gradualmente conforme disminuye la Hbl en dirección W-E. La magnetita es el único óxido presente. El grado de alteración hidrotermal se incrementa progresivamente conforme se ubican más cerca del complejo plutónico El Salto (SA).

EL SALTO (SA)

El oriente de este complejo se pone en contacto con la frontera magnetita-ilmenita y se ubica a 3 km del Lineamiento Principal (Figuras 3 y 4). Es un complejo plutónico elíptico de aproximadamente 84 km² formado por más de 30 cuerpos intrusivos que varían de 0.3 a 3.7 km de diámetro. Una de las características más importantes del complejo es estar formado por intrusivos alineados que, para fines de descripción, se cree forman un solo cuerpo por tener una composición similar. Cinco de las siete muestras son de cuarzomonzodiorita y las restantes son monzodiorita y diorita (Figura 6); todas contienen Bi y Hbl como principales constituyentes máficos y se observa que en la mitad sur de SA la proporción de la Bi es mayor. También la augita se encuentra en todas las muestras en cantidades que varían entre 1.3 y 0.3%. En los puntos 26 y 27, los más cercanos a la frontera magnetita-ilmenita, se observa mezcla de magmas; la presencia de xenolitos de diorita en todo el complejo plutónico es común. En general, la susceptibilidad magnética es alta y el contenido de magnetita es casi constante. La hematita aparece en asociación con la magnetita, principalmente en la Bi; no se observó rutilo.

FRACTURAMIENTO DE LOS COMPLEJOS PLUTÓNICOS

A lo largo de la sección W-E de la sección El Socorro se midieron sistemáticamente las fracturas en 26 de los 27 sitios de muestreo. En ninguno de los sitios se observaron evidencias de fallamiento; aquellas fracturas que muestran estrías están relacionadas con el emplazamiento mismo de los plutones y, los desplazamientos observados en rasgos como los de foliación, enclaves u otros, son de algunos centímetros.

De acuerdo con la clasificación de fracturas primarias en plutones de Balk (1937; en Price y Cosgrove, 1991), en la sección se observan longitudinales y cruzadas (verticales) o "acostadas" (horizontales) según se muestran en la Figura 8 a y b. Dentro del grupo de las verticales, se midieron las longitudinales que, de acuerdo con lo observado y con los autores anteriores, son subverticales, comúnmente no alojan diques y, a diferencia de las cruzadas, rara vez se observa cizallamiento en ellas. Se ha propuesto (Price y Cosgrove, 1991) que las fracturas longitudinales se relacionan con la anisotropía básica de los esfuerzos, por lo que reflejan el modo de emplazamiento del intrusivo. En el mismo sentido, los autores anteriores sugieren

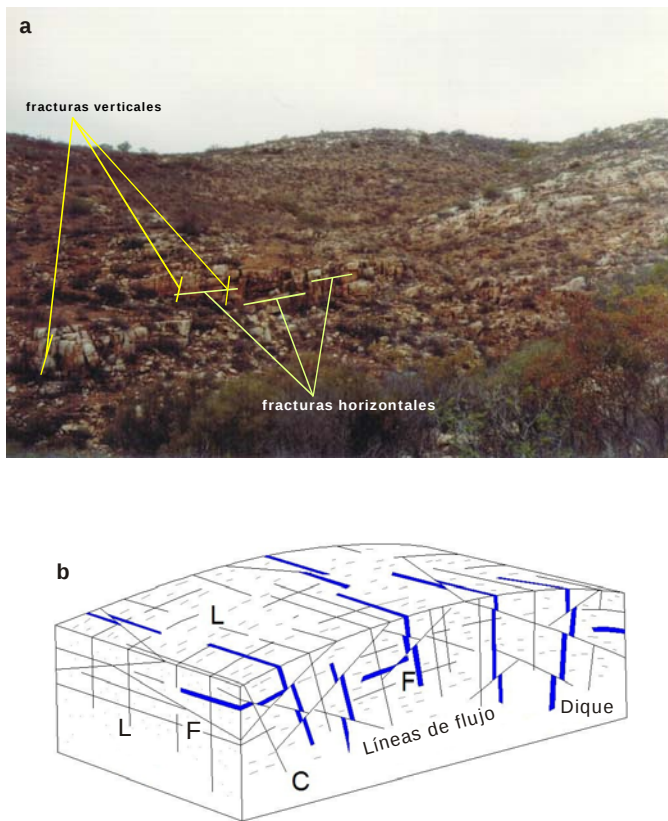


Figura 8. a) Fracturas penetrativas y persistentes, horizontales y verticales, de las rocas graníticas aflorantes en el borde occidental de El Socorro A. b) Clasificación y distribución de fracturas en batolitos de acuerdo con Closs (1922; Modificado de Price y Cosgrove, 1991). Los tipos de fractura son: C = cruzada, L = longitudinal, F = horizontal. En el texto se hace referencia a C y L como verticales.

que las fracturas horizontales son un reflejo de las variaciones en la presión magmática y resultarían de la inyección de magma bajo un mecanismo de hidrofracturamiento. Las fracturas horizontales, en particular, pueden ser secundarias y, en ese sentido, ser fracturas de exfoliación formadas por extensión. Si este fuera el caso, entonces el efecto de fracturamiento por extensión de la superficie sería similar o igual al producido por el esfuerzo térmico que causa extensión (Turcotte y Schubert, 2002), por lo que las rocas plutónicas experimentarían deformación retrógrada. En ese sentido, actúa sobre los intrusivos un esfuerzo remanente que se refiere a esfuerzos in situ de rocas que están actualmente a poca profundidad o expuestos a la superficie y que sufrieron enfriamiento, levantamiento y exhumación (Price and Cosgrove, 1991). De acuerdo con lo anterior, la orientación de los esfuerzos remanentes se obtiene a partir de la orientación de las fracturas.

La apariencia que guardan las fracturas horizontales se muestra en la Figura 8.a. En muchos lugares son tan persistentes que su aspecto es similar al de las rocas estratificadas. Las fracturas longitudinales, que a partir de ahora se nombrarán verticales, tienden a ser perpendiculares a las horizontales y son igualmente persistentes. Para que la medición de las fracturas en el campo fuera representativa y para evitar la redundancia, se procuró tomar un mínimo de 3 mediciones por sitio con la condición de que la estruc-

tura fuera penetrativa y separada del dato anterior, entendiéndose que un rasgo estructural penetrativo es aquel que puede observarse por decenas de metros y que no es único del afloramiento de muestreo. De acuerdo con lo anterior, cada dato representaría el promedio de más de diez mediciones, por lo que, independientemente de la densidad de las fracturas, las estructuras cuyos rasgos geométricos se repiten sólo se consideraron una vez.

En la Figura 5 se muestran los sectores y los sitios de muestreo para los que se elaboraron los estereogramas de fracturas de la Figura 9. Cada sector representa cada uno de los cinco complejos de plutones y una alineación de pequeños intrusivos (E2) que separa al plutón EQ_D del SOC_A. En el sitio de muestreo E2 tiene el aspecto de un dique que composicional y temporalmente puede ser parte de SOC_A (Figura 6). En las secciones siguientes se discute de oeste a este el significado del fracturamiento vertical y horizontal en cada uno de los seis sectores.

PLUTÓN EL QUIOTE D (EQ_D)

En el plutón EQ_D se midieron seis fracturas verticales y dos horizontales en los sitios 1 y 2. Ambos tipos de fracturas son muy persistentes y representan el fracturamiento dominante en el plutón. El promedio de los polos de los cinco datos concentrados en el cuadrante SW del estereograma está en S81°W/27°, cuyo plano se encuentra en N10°W/63°E (Figuras 5 y 9.1.a). Las fracturas horizontales son muy persistentes y están representadas por un polo por sitio, cuyo promedio se localiza en N46°E/68° que define el plano S44°E/22°SW (Figura 9.1.b). La inclinación de las fracturas horizontales hacia el occidente sugiere que el plutón podría estar basculado en esa dirección por el emplazamiento de los intrusivos más jóvenes localizados en el oriente.

COMPLEJO PLUTÓNICO EL SOCORRO

EQ_D está separado del complejo plutónico El Socorro por el alineamiento de intrusivos E2. Para facilitar su descripción, El Socorro se dividió en los complejos discretos El Socorro A (SOC_A) y El Socorro B (SOC_B), que aunque estructuralmente son similares (Figuras 9.2 y 9.3), composicionalmente son distintos (Figura 6). Aunque E2 es aparentemente una estructura que corta a SOC_A, los dos sitios del alineamiento se agruparon con ese complejo pues tanto su composición como la actitud de sus fracturas son similares. Además, se infiere de esa similitud que ambos cuerpos son penecontemporáneos.

EL SOCORRO A (SOC_A) Y E2

E2 se muestreó en los sitios 4 y 5 (Figuras 5 y 9.2). Las fracturas verticales son penetrativas, persistentes y perpendiculares entre sí. Las fracturas horizontales contrastan ligeramente con respecto a las de EQ_D pues están menos inclinadas, lo que sugiere que este cuerpo no ha sido perturbado por el emplazamiento de los plutones vecinos.

El muestreo del complejo plutónico SOC_A se hizo en los sitios 6 al 12 donde, de acuerdo con la interpretación de lineamientos de la imagen satelital, los tres últimos se localizan en una zona de traslape

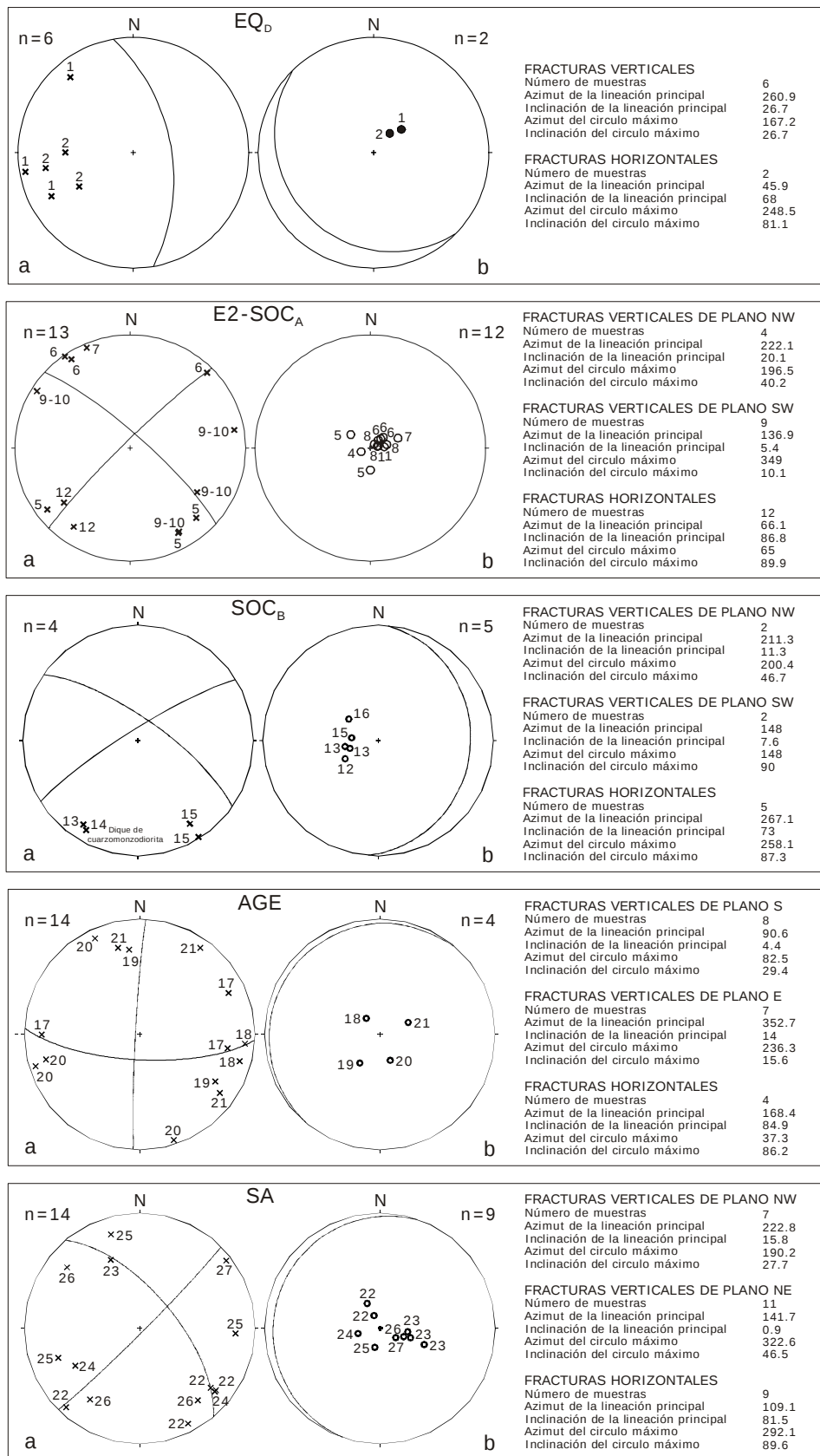


Figura 9. Estereogramas de las fracturas verticales (a) y horizontales (b) según la proyección de Schmidt de El Quiote D (EQ_D), E2, El Socorro A (SOC_A), El Socorro B (SOC_B), Agua Escondida (AGE) y El Salto (SA). Se indica en la base de cada estereograma el azimut e inclinación de la lineación principal y del gran círculo de cada plano. Los números dentro del estereograma representan el número de sitio.

con el complejo El Socorro B (SOC_B ; Figura 5). Con base en las relaciones de contacto entre los plutones SOC_A y SOC_B , discutidas en la sección de descripción petrográfica de los plutones, se interpreta que A es más joven que B, por lo que A le imprime su estilo de fracturamiento a B. En la Figura 7.2a se presentan los polos de las fracturas verticales que muestran un arreglo ortogonal según se resuelve en los planos $N48^\circ W/80^\circ NE$ y $S45^\circ W/85^\circ NW$. Los planos tienden a ser paralelos, tanto a la orientación e inclinación de los planos de las fracturas verticales de la alineación E2, como a la orientación de los lineamientos regionales y de las alineaciones de las estructuras curvilíneas que aparentemente definen a SOC_A (Figuras 3 y 4). El arreglo ortogonal de fracturas verticales sugiere un aspecto dómico al complejo. Los polos de las fracturas horizontales se concentran notablemente alrededor de $N63^\circ E/80^\circ$, cuyo plano se encuentra en $S25^\circ E/10^\circ W$.

EL SOCORRO B (SOC_B)

Los sitios considerados para el análisis de fracturas de SOC_B comprenden del 13 al 16, pues los sitios localizados hacia el oriente tienen la huella estructural del plutón Agua Escondida, que se supone que es más joven. Los polos de las fracturas verticales están contenidos en los planos $S58^\circ W/82^\circ NW$ y $N59^\circ W/22^\circ NE$, cuyo arreglo es casi ortogonal (Figura 9.3). Todas las fracturas horizontales buzcan hacia el oriente según el plano $S3^\circ W/27^\circ E$, cuyos polos tienen una concentración promedio $S87^\circ W/73^\circ$. Las fracturas verticales de SOC_B tienen orientaciones prácticamente idénticas a las de SOC_A , en ambos complejos, sus fracturas horizontales se orientan casi N-S. Es notable que todas las fracturas horizontales de SOC_A buzcan hacia el occidente mientras que las de SOC_B lo hacen hacia el oriente, lo que le imprime un aspecto de antiformal al conjunto.

AGUA ESCONDIDA (AGE)

La periferia del complejo plutónico Agua Escondida (AGE) corta a SOC_B y podría ser contemporáneo al plutón El Salto pues con éste las relaciones de contacto no están bien definidas. En AGE se midieron fracturas entre los sitios 17 y 21. Como se muestra en la Figura 9.4, los polos de las fracturas verticales definen los planos $S03^\circ W/87^\circ W$ y $S87^\circ E/72^\circ S$, ortogonales entre sí. Son más abundantes las fracturas cuya orientación es casi N-S, paralelas a la tendencia de los lineamientos mostrados en la Figura 4, sugiriendo cierto control estructural regional en su emplazamiento. Con respecto a las fracturas horizontales, sus polos se distribuyen alrededor del centro del estereograma, lo que sugiere que no hubo perturbación estructural debida al emplazamiento de los plutones cercanos o por fallamiento posterior. Finalmente, es probable que AGE sea posterior a SOC_B pues en la zona de traslape (sitios 17 y 18) domina el estilo estructural del primero.

EL SALTO (SA)

En este complejo plutónico formado por alineaciones de intrusivos de dimensiones variables en diferentes direcciones se midieron fracturas en los sitios 22 al 27 (Figura 5). Al igual que en

SOC_A , los polos de las fracturas verticales de SA definen los planos $N40^\circ W/65^\circ NE$ y $N45^\circ E/87^\circ SE$, que son casi ortogonales y paralelos a la tendencia estructural regional.

Las fracturas horizontales de SA tienen una tendencia similar a la observada en el complejo de AGE pues el plano resultante es $N19^\circ E/8^\circ NW$, por lo que se interpreta que está ligeramente basculado hacia el occidente.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De la interpretación regional de las estructuras de una imagen satelital que cubre 5,000 km² se interpretó una serie de lineamientos que define un Lineamiento Principal. Este lineamiento está orientado $N30^\circ W$ y coincide burdamente con la frontera magnetita-ilmenita que separa a los plutones ricos en Fe del occidente de los ricos en Ti del oriente (Gastil *et al.*, 1990). Las estructuras dominantes en la región de San Pedro Mártir se orientan hacia el NW, mientras que las dominantes en la región cercana a San Quintín son casi N-S. En las dos regiones los rasgos orientados $N40^\circ E$ son muy notables y se considera que se formaron como resultado de un sistema de deformación en cizalla durante el proceso de captura del extremo occidental de Norteamérica por la placa Pacífico (Delgado-Argote *et al.*, 2002). Este proceso de deformación es similar al observado actualmente en el norte de la península, donde son comunes los rasgos de fracturas orientadas hacia el NE (Böhnell *et al.*, 2002) y con alineaciones de epicentros (Frez y Frías-Camacho, 1998). Consistente con las observaciones anteriores, Frez *et al.* (2004), a partir de datos de sismicidad, interpretaron la propagación de fracturamiento en sentido NE-SW, casi perpendicular a las fallas transcurrentes activas del norte de la península. Con base en la geometría de las fracturas y las interpretaciones sismológicas, inferimos que los sistemas de fracturas del área de estudio, ahora inactivos, se formaron durante los periodos iniciales del sistema San Andrés-Golfo de California.

Utilizando como referencia la frontera magnetita-ilmenita se observa, en lo general, que los plutones orientales son más grandes y se emplazaron en rocas paleozoicas, mientras que los occidentales están asociados con rocas del arco cretácico del Grupo Alisitos.

De la interpretación más detallada de la imagen de satélite del sector de El Socorro de 1,100 km² al oriente de San Quintín, se identificaron cinco complejos plutónicos, uno de ellos (E2) formado por la alineación de rasgos curvilíneos. El conjunto está litológicamente definido por rocas que varían de diorita a granodiorita, aunque ninguno de ellos muestra zonamiento bien definido, como el que caracteriza a plutones como San Telmo en el norte (Delgado-Argote *et al.*, 1995). Se interpreta que los complejos fueron formados por intrusiones múltiples y los emplazamientos sucesivos se manifiestan como cuerpos anidados complejos, donde el proceso de mezcla de magmas es común, particularmente en ambos bordes del cuerpo SOC_A .

En el oriente de la región de El Socorro, el Lineamiento Principal y la frontera magnetita-ilmenita son subparalelos y se cruzan al norte de la sección El Socorro (Figura 2.b); la región se caracteriza por el dominio de rasgos estructurales lineales cuyas concentraciones máximas se orientan N10°E, N25°W y N40°E, similares a las regionales. Los lineamientos individuales varían entre 0.5 y 10 km de longitud, pueden estar asociados a la deformación regional o bien, a deformaciones debidas a la evolución de complejos volcánico-plutónicos discretos. El significado tectónico del Lineamiento Principal puede referirse al contacto entre los subterrenos occidental (arco) y oriental (cuenca) del terreno Yuma propuesto por Rangin (1978) y Sedlock *et al.* (1993). Al igual que los autores anteriores, Johnson *et al.* (1999b) infieren que el terreno del oriente está emplazado tectónicamente sobre el occidental en una zona de sutura que coincidiría con este lineamiento.

En los cinco plutones se observa un marcado paralelismo entre las orientaciones promedio de las fracturas verticales primarias con respecto a los lineamientos. Las relaciones de campo indican además que el plutón EQ está separado de SOC_A por la alineación de plutones E2 orientada N-S. Hacia el oriente, SOC_A y SOC_B forman un plutón complejo donde el primero intrude al segundo, según se desprende por las relaciones de mezcla mecánica de magma (mingling) de componentes dioríticos de SOC_B en cuarzomonzodiorita de SOC_A, así como por la presencia de diques de SOC_A cerca del borde occidental de SOC_B. Además, del análisis estructural se observa que el estilo del fracturamiento vertical de SOC_A está impreso en el borde de SOC_B. Composicionalmente, el contacto de SOC_B con el de AGE es difuso o poco contrastante pero, este último imprime su arreglo de fracturamiento vertical en el borde oriental del complejo SOC_B. Por su parte, el plutón SA es un complejo plutónico formado por

cuerpos alineados con orientación NNE que, aparentemente, no afectan directamente al plutón AGE; sin embargo, es probable que lo basculen ligeramente hacia el occidente, según se desprende del análisis de fracturas horizontales.

A partir de las relaciones de contacto observadas, de las relaciones temporales propuestas por Ortega-Rivera (2003) y del análisis de las fracturas horizontales, se propone el esquema de la Figura 10. Se asume que las fracturas se asocian a un régimen de extensión al actuar sobre los intrusivos un esfuerzo remanente interpretado como los esfuerzos *in situ* de rocas que sufrieron enfriamiento, levantamiento y exhumación. En esa figura se propone que EQ₀ pudo haber sido levantado por el cuerpo de plutones alineados (E2) y basculado hacia el SW. E2 se presenta como una estructura angosta que posiblemente está asociada a un sistema de fracturas o fallas que separa a los plutones EQ de SOC_A; este último se considera contemporáneo o más joven pues asimila a una fracción de E2 sin afectar la tendencia horizontal de sus fracturas. También a partir del fracturamiento horizontal se infiere que el complejo plutónico El Socorro (SOC_A y SOC_B) forma una estructura antiformal amplia desarrollada por el emplazamiento diapírico de dos cuerpos, donde el de composición diorítica (SOC_B) es más antiguo y fue intrudido por diques cuarzomonzoníticos de SOC_A. El arreglo de fracturas horizontales que imprime el aspecto de antiformal al conjunto permite considerar un régimen común de emplazamiento. El borde oriental de SOC_B contiene diques de la composición de AGE, más joven. Las relaciones de contacto entre AGE y SA no se observan, pero el buzamiento promedio hacia el occidente del fracturamiento horizontal de AGE, permite inferir que este plutón fue basculado por el emplazamiento posterior de SA.

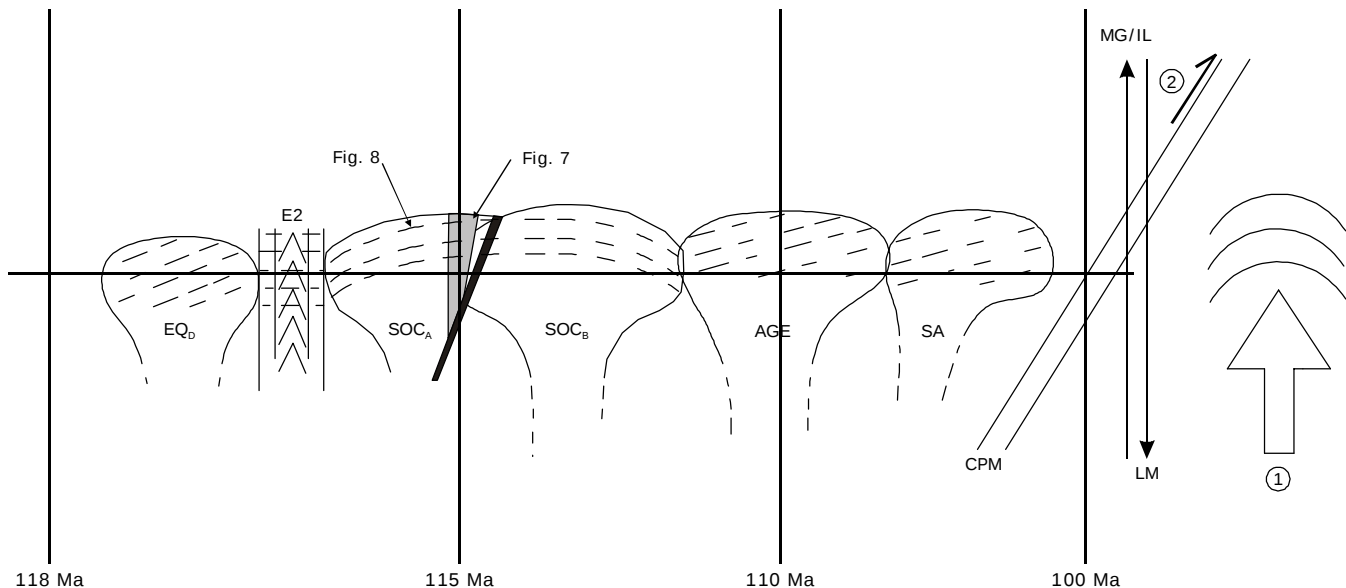


Figura 10. Representación esquemática de las estructuras plutónicas de la sección El Socorro. Entre SOC_A y SOC_B la región sombreada representa a la zona de mezcla, o bordera, y la línea gruesa el dique cuarzomonzonítico que intruye en las rocas dioríticas de SOC_B. Como referencia se muestra los contornos de edades de ⁴⁰Ar/³⁹Ar en biotita (Ortega-Rivera, 2003). Las flechas verticales indicadas como Mg/Il al extremo derecho representan la frontera de magnetita-ilmenita de Gastil *et al.* (1990) y al Lineamiento Principal (LM) de Delgado-Argote *et al.* 2003 (LM). El aparente basculamiento de los plutones hacia el occidente de la sección El Socorro posiblemente se deba al Cabalgamiento Principal Mártir (CPM) interpretado por Johnson *et al.* (1999b) o al emplazamiento más joven de los plutones localizados al oriente de la frontera magnetita-ilmenita/Lineamiento Principal. La escala vertical es mucho mayor que la horizontal.

Las fracturas horizontales de estos dos últimos plutones buzan de forma casi paralela hacia el occidente, por lo que se infiere que fueron levantados y basculados en estado rígido (posterior a la acción de los esfuerzos térmicos que causan extensión) al emplazarse los plutones orientales más jóvenes. Es posible, sin embargo, que el basculamiento haya ocurrido también bajo condiciones más dúctiles durante el emplazamiento de los plutones orientales a lo largo de la zona de deformación del Lineamiento Principal, tal y como ha sido documentado por métodos paleomagnéticos y de fábrica magnética entre los plutones San José y San Pedro Mártir, al norte de El Socorro (Molina-Garza et al., 2003a y 2003b; 2 en Figura 10).

Para tener una estimación de la profundidad de emplazamiento, que es importante para considerar la rigidez del medio, se hizo un estudio de barometría de Al en hornblenda (Hbl) de una cuarzomonzodiorita de Bi-Hbl (muestra 23) del plutón SA. Los cristales de Hbl, de aproximadamente 200 a 400 μ , están fracturados pero no muestran evidencias de alteración hidrotermal. Para el estudio se utilizaron las paqueterías AMPHCAL de Yavuz (1996) y HBPL 1.2 de Holland y Blundy (1994).

AMPHCAL calcula la fórmula estructural de la Hbl, clasifica los anfíboles y resuelve las presiones utilizando los principales geobarómetros de Hbl de la literatura. La composición de los anfíboles que resulta del análisis corresponde a magnesio-hornblenda, edenita y actinolita, mientras que el promedio de las presiones calculadas de 15 puntos de análisis por microsonda de cinco cristales es de 1.8 ± 0.6 kbar. Las presiones se obtuvieron aplicando el geobarómetro de Schmidt (1992), cuya expresión es $P = -3.01 + 4.76Al_{tot}$. La elección de ese geobarómetro, que considera presiones en las zonas de frontera o extremos de los plutones, se basó principalmente en la semejanza entre la asociación mineralógica para la que se desarrolló el método (hornblenda-biotita-plagioclasa-ortoclasa-cuarzo-esfena-óxido Ti-Fe) y la de la muestra seleccionada del plutón SA.

HBPL 1.2 es un geotermobarómetro que complementa, con base en los análisis de la plagioclasa y la Hbl, los resultados de AMPHCAL. En la Figura 11 se muestra la estimación de las presiones "máximas" y temperaturas resultantes al aplicar este método. En los grupos se observa una tendencia similar en la variación de presión de cada uno de los cristales, cuyas presiones medias están ubicadas a los 4 ± 0.4 kbar y 2 ± 0.5 kbar, con temperaturas correspondientes a $692 \pm 13^\circ\text{C}$ y $682 \pm 26^\circ\text{C}$, respectivamente.

Ambos métodos coinciden en la estimación de una presión mínima cercana a 2 kbar que, para la asociación mineralógica de la muestra, la temperatura cercana a 700°C correspondería a una región cercana al punto eutéctico (Best y Christiansen, 2001). Por ello, se considera que la presión refleja la profundidad de la roca cristalizada cuya densidad sería cercana a 2.7 g/cm^3 (Best y Christiansen, 2001), que ubica al plutón a una profundidad del orden de 7 km para esa presión, dentro de la zona de deformación frágil. Si la presión fuera de 4 kbar, la profundidad sería aproximadamente del doble, lo que definiría un ambiente de emplazamiento en la frontera entre dúctil y frágil de la corteza, que es la región en donde el movimiento lateral de magma es más acentuado (Shaw, 1980).

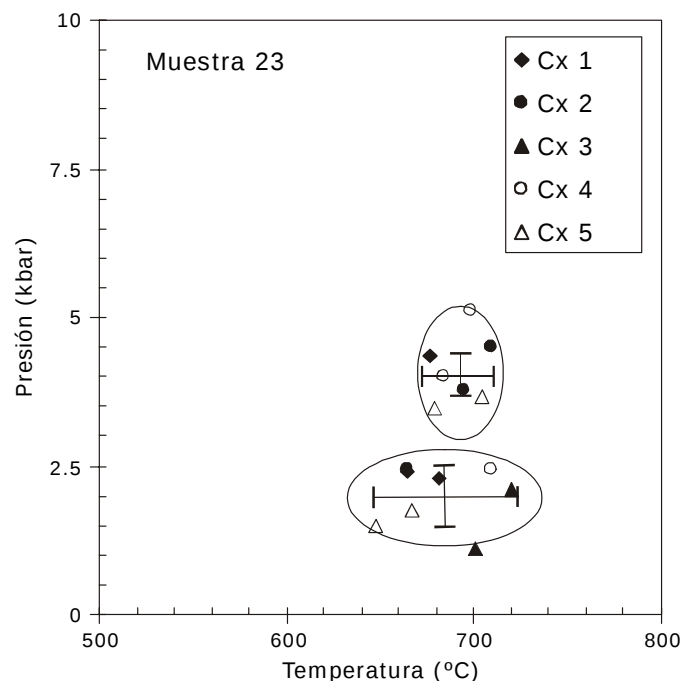


Figura 11. Gráfica P-T acerca de la variación de las presiones máximas en cinco cristales (Cx) de la muestra 23 de El Salto, obtenidas mediante la paquetería HBPL 1.2 (Holland y Blundy, 1994). Los puntos indican la intersección entre las rectas resultantes de los dos modelos termodinámicos (TA y TB) propuestos por Holland y Blundy (1994), en los que se cumple que $TA > TB$, donde TA es el termómetro Edenita-Tremolita para asociaciones con cuarzo y TB es el termómetro Edenita-Richterita para asociaciones con o sin cuarzo. Las barras indican los valores promedio y desviación estándar de las presiones y las temperaturas de los grupos.

Las presiones de los cuerpos más orientales se localizarían dentro de la región de deformación frágil, donde el magma avanza a través de un medio fracturado, por lo que la presencia de diques y troncos, así como otras estructuras subvolcánicas, son más comunes. Si suponemos que la composición de los plutones tuvo un equivalente volcánico en el arco magmático, entonces los productos volcánicos asociados a cada uno de estos complejos plutónicos serían de andesita basáltica (SOC_B) hasta riolita (SOC_A), posiblemente relacionados con estratovolcanes en el caso de SOC_B , o con una caldera o volcanes compuestos en el caso de SOC_A . Con respecto a AGE, los productos volcánicos serían de cuarzolita y, con SA, de andesita rica en cuarzo, posiblemente asociados con sistemas calderícos. La actividad volcánica del complejo El Socorro podría tener manifestaciones efusivas y explosivas, lo que promovería relaciones de contacto complejas al interior de la o las cámaras magmáticas, según se deduce de la mezcla de magmas, la presencia de diques félsicos en el contacto SOC_A - SOC_B y la intensidad de actividad hidrotermal de alta temperatura manifestada por las vetillas de actinolita con arreglo en enrejado. Por su lado, los plutones AGE y SA, por su composición más félsica, podrían asociarse a manifestaciones volcánicas más explosivas, correspondientes a niveles de emplazamiento más someros.

Finalmente, se puede considerar que las manifestaciones plutónicas en la sección El Socorro muestran un ambiente de actividad magmática continua caracterizado por relaciones cortantes entre plutones que pueden tener equivalentes volcánicos, cuyas cámaras magmáticas, corresponden a profundidades máximas localizadas en y arriba de la frontera dúctil-frágil. Las variaciones mineralógicas indican procesos de diferenciación magmática por cristalización fraccionada y mezcla de magmas por efectos mecánicos, posiblemente relacionados con la actividad volcánica dominante. Aunque los cratónos ofrecen una buena referencia temporal regional, éstos no tienen la resolución suficiente para resolver las relaciones de contacto a la escala de trabajo de este estudio. Se espera que el muestreo con fines paleomagnéticos y geocronológicos efectuado durante el trabajo de campo resuelva en el futuro la relación temporal de los emplazamientos individuales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por CONACYT (33-100T) y el CICESE (proyecto 6941). Agradecemos las discusiones en el campo con Bodo Weber y sus estudiantes, la colaboración de Luis Gradilla en el microscopio electrónico del CICESE y de Víctor Frías en la edición del material gráfico. Los arbitrajes de Jaime Roldán y Jorge Aranda ayudaron enormemente a mejorar este trabajo.

REFERENCIAS

- Best, M.G. and Christiansen, E.H., 2001. *Igneous Petrology*, Blackwell Science, Inc., 458 pp.
- Böhnell, H. and Delgado-Argote, L.A., 2000. Paleomagnetic data from northern Baja California (México): Preliminary results from the Cretaceous San Telmo Batholith. *En: H. Delgado, G. Aguirre and J. Stock, editors, Cenozoic Tectonics and Volcanism of México*, Geological Society of America Special Paper 334, p. 157-165.
- Böhnell, H., Delgado-Argote, L.A., and Kimbrough, D., 2002. Discordant paleomagnetic data for middle-Cretaceous intrusive rocks from northern Baja California: latitude displacement, tilt, or vertical axis rotation? *Tectonics*, vol. 21, no. 5, p. 1049-1062.
- Chávez Cabello, G., 1998. Mecanismos de ascenso, emplazamiento y evolución magmática de varios plutones al oeste de la Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. Tesis de Maestría, División de Ciencias de la Tierra, CICESE, 165 pp.
- Delgado-Argote, L.A. and García-Abdeslem, J., 1999. Shallow Miocene basaltic magma reservoirs in the Bahía de los Angeles Basin, Baja California, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 88-1, p. 29-46.
- Delgado-Argote, L., López-Martínez, M., Pérez-Flores, M., and Fernández-Tomé, R., 1995. Emplacement of the nucleus of the San Telmo Pluton, Baja California, from geochronologic, fracture, and magnetic data, *Geological Society of America, Special Paper 301*, p. 191-204.
- Delgado-Argote, L.A., Frías-Camacho, V.M. e Hinojosa-Corona, A., 2002. Reconocimiento estructural de plutones localizados entre la costa Pacífico y San Pedro Mártir, Baja California. *GEOS*, vol. 22-2, p. 170-171.
- Delgado-Argote, L., Böhnell, H., Molina-Garza, R., and Ortega-Rivera, A., 2003. Structural survey in plutons from the pacific coast to the Sierra San Pedro Mártir, Central Baja California: 2003, *Geological Society of America, Abstracts with Programs, Cordilleran Section*, vol. 35, no. 4, p. 73.
- Frez, J., Nava, E.A., and Acosta, J., 2004. Source rupture plane determination from doppler effect for small earthquakes recorded by local networks. *Geophysical Research Letters* (en prensa).
- Frez C., J. y Frías-Camacho, V.M., 1998. Mapas anuales de sismicidad para la región fronteriza de ambas californias. *GEOS*, vol. 18-2, p. 112-130.
- Gastil, R. G., 1983. Mesozoic and Cenozoic granitic rocks of Southern California and Western Mexico. *En: J.A. Roddick, editor, Circumpacific plutonic terranes*, Geological Society of America, Memoir 159, p. 265-275.
- Gastil, R. G., Phillips, R.P., and Allison, E.C., 1975. Reconnaissance geology of the State of Baja California, *Geological Society of America Memoir* 140, 170 pp.
- Gastil, R., Diamond, J., and Knaack, C., 1986. The magnetite ilmenite line in peninsular California, *Geological Society of America, Abstracts with Programs* 18, 109.
- Gastil, R. G., Diamond, J., Knaack, C., Wallawender, M., Marshall, M., Boyles, C., Chadwick, B., and Erskine, B., 1990. The problem of the magnetite/ilmenite boundary in southern and Baja California. *En: Anderson, J.L., ed., The Nature and Origin of Cordilleran Magmatism*, Geological Society of America Memoir 174, p. 19-32.
- Holland, T. and Blundy, J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 116, p. 433-447.
- Johnson, S. E., Paterson, S. R. and Tate, M. C., 1999a. Structure and emplacement history of a multiple-center, cone-sheet-bearing ring complex: The Zarza Intrusive Complex, Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 111-4, p. 607-619.
- Johnson, S. E., Tate, M. C. and Fanning, C. M., 1999b. New geologic mapping and SHRIMP U-Pb zircon data in the Peninsular Ranges batholith, Baja California, *Geology*, vol. 27, no. 8, p. 743-746.
- Marsh, B.D., 2000. Magma chambers. *En: Encyclopedia of Volcanoes*, H. Sigurdsson (editor), Academic Press, p. 191-206.
- Molina-Garza, R., Böhnell, H., Chávez-Cabello, G., Ortega-Rivera, A., and Delgado-Argote, L. A., 2003a. A Paleomagnetic Transect of the Peninsular Ranges Batholith near the 31st parallel, Part II, 99th Annual Meeting Cordilleran Section, 2003 Abstracts with Programs, vol. 35, Number 4, p. 74.
- Molina-Garza, R., Böhnell, H. y Delgado-Argote, L. A., 2003b. Paleomagnetismo y fábrica magnética en los plutones de la Sierra San Pedro Mártir, Baja California: implicaciones tectónicas y modelos de emplazamiento. *GEOS*, vol. 23-2, p. 97-98.

- Nicholson, C., Sorlien, C. C., Atwater, T., Crowell, J. C., and Luyendyk, B. P., 1994. Microplate capture, rotation of the Western Transverse Ranges and initiation of the San Andreas transform as a low-angle fault system, *Geology*, vol. 22, 491-495.
- Ortega-Rivera, A., 2003. Geochronological constraints on the tectonic history of the Peninsular Ranges Batholith of Alta and Baja California: tectonic implications for western Mexico. *En* Johnson, S.E., Paterson, S.R., Fletcher, J.M., Girty, G.H., Kimbrough, D.L., and Martín-Barajas, A., eds., *Tectonic evolution of northwestern México and the southwestern USA: Boulder, Colorado Geological Society of America Special Paper 374*, p. 297-335.
- Peña Alonso, T.A., 2003. Características petrográficas y de fracturamiento de los plutones localizados entre San Quintín y sur de San Pedro Mártir, transecto El Socorro, Baja California, Departamento de Ciencias de la Tierra, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, 2003, 100 pp.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W., 1991. Analysis of geological structures, Cambridge University Press, Cambridge, G.B., 502 pp.
- Rangin, C., 1978. Evidence for superimposed subduction and collision processes during Jurassic-Cretaceous time along Baja California continental borderland. *En*: Abbott P. L. and Gastil R. G., (editors), 1979, *Baja California Geology Field Guides and Papers*, Department of Geological Science, San Diego State University, San Diego, California, p. 37-51.
- Romero-Espejel, J.G.H. y Delgado-Argote, L.A., 1997. Granitoides en el noreste de Sierra Juárez, Baja California: Una historia de emplazamiento para la parte norte del Batolito Oriental del Cretácico Tardío, *GEOS*, vol. 17-3, p. 139-154.
- Ross, D. C., 1984. Possible correlations of basement rocks across the San Andreas, San Gregorio-Hosgri and Rinconada-Reliz-King City Faults, California, U. S. Geological Survey, Professional Paper, 37 pp.
- Schmidt, M., 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 110, p. 304-310.
- Sedlock, R.L., Ortega-Gutiérrez, F., and Speed, R.C., 1993. Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico, *Geological Society of America Special Paper 278*, Boulder Colorado, 153 pp.
- Shaw, H. R., 1980. The fracture mechanisms of magma transport from the mantle to the surface. *En*: R.B. Hargraves, editor, *Physics of Magmatic Processes*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, p. 201-264.
- Silver, L. T., 1982. Evidence and a model for west-directed early to mid-Cenozoic basement overthrusting in southern California, *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, vol. 14, p. 617.
- Silver, L. T., and Chapell, B. W., 1988. The Peninsular Ranges Batholith: an insight into the evolution of the cordilleran batholiths of southwestern North America, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, vol. 79, p. 105-121.
- Silver, L. T., and Mattinson, J. M., 1986. Orphan Salinia, has a home, *EOS Transactions*, vol. 67, p. 1215.
- Silver, L. T., Taylor, H. P., and Chapell, B., 1979. Some petrological, geochemical and geochronological observations of the Peninsular Ranges batholith near the international border of the U.S.A. and Mexico. *En*: P. L. Abbott, and V. R. Todd, editors, *Geological Society of America, Guidebook 1979*, p. 83-110.
- Streckeisen, A. L., 1973. Plutonic rocks—Classification and nomenclature, *Geotimes*, vol. 18, p. 26-30.
- Turcotte, D.L. and Schubert, G., 2002. *Geodynamics*. Second Edition, Cambridge University Press, 456 pp.
- Yavuz, E. (1996) AMPHCAL: quickbasic program for determining the amphibole name from electron microprobe analysis using the IMA rules. *Computer & Geosciences*, vol. 22-2, p. 101-107.

Recepción del manuscrito: 15 marzo, 2004

Recepción del manuscrito corregido: 15 de septiembre, 2004

Aceptación del manuscrito: 1 de octubre, 2004