

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra con
orientación en Geología**

**Análisis petrológico y estructural de los plutones del Cinturón
Batolítico Peninsular que delimitan el Valle de Ojos Negros,
Baja California, México**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestra en Ciencias

Presenta:

Blanca Sughey Apolinar Morales

Ensenada, Baja California, México
2025

Tesis defendida por
Blanca Sughey Apolinar Morales

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Luis Alberto Delgado Argote
Director de tesis

Dr. Bodo Weber

Dr. Pedro Negrete Regagnon

Dr. Marco Antonio Pérez Flores

Dr. Manuel Contreras López



Dr. Diego Ruiz Aguilar
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Blanca Sughey Apolinar Morales** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología

Análisis petrológico y estructural de los plutones del Cinturón Batolítico Peninsular que delimitan el Valle de Ojos Negros, Baja California, México

Resumen aprobado por:

Dr. Luis Alberto Delgado Argote
Director de tesis

El registro geológico del valle de Ojos Negros comprende desde el Triásico-Jurásico hasta el Presente. Sucesiones de metapelitas y metasamitas en facies de anfibolita inferior afloran en el sector este de valle, asociadas al Complejo Bedford Canyon (210-170 Ma). Le sobreyacen metalavas en facies de esquistos verdes y lo intrusionan *sills* que se asocian con basaltos picríticos de la Formación Santiago Peak. Esas secuencias se deformaron por compresión antes de ca. 126 Ma. Los plutones, del Cinturón Batolítico Peninsular están intrusionados por el Enjambre de Diques San Marcos (ca. 124 Ma), todos pertenecientes al segmento sur del arco Santiago Peak. El último episodio de deformación regional corresponde al fallamiento transcurrente activo que delimita los bordes este y oeste del valle. Los plutones que circundan al valle de Ojos Negros son: Timoteo, El Barbón, La Huerta, Los Cascabeles y El Alamar. Los plutones y diques muestran variaciones composicionales modales desde diorita hasta granito, pertenecientes a las series cálcica y calcoalcalina. De ellos, los plutones orientales de composición granítica de Timoteo, El Barbón y algunos *stocks* de La Huerta, contienen dos micas y granate, son los más diferenciados y menos magnetizados. En contraste, el plutón diorítico Los Cascabeles en el oeste es notablemente más magnetizado. Hacia el sureste del área de estudio, al sur del plutón La Huerta es evidente el traslape entre las series magnéticas, relacionada posiblemente con la naturaleza de su basamento. Geoquímicamente, se concluye que los plutones, el Enjambre de Diques San Marcos y las lavas y *sills* de la Formación Santiago Peak son parte del mismo sistema magmático que evolucionó en el margen occidental de Norteamérica. El modelado magnético 3D evidencia un sistema de conectividad magmática al oeste del área de estudio y que los plutones alcanzan probablemente más de 6 km de profundidad. Las fallas San Miguel y Ojos Negros muestran un decremento en la magnetización hasta los 3 km de profundidad.

Palabras clave: Cinturón Batolítico Peninsular, magmatismo Jurásico-Cretácico, Santiago Peak, Valle de Ojos Negros

Abstract of the thesis presented **by Blanca Sughey Apolinar Morales** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Geology

Petrological and structural analysis of the Peninsular Ranges Batholith plutons that delimit the Ojos Negros Valley, Baja California, Mexico

Abstract approved by:

Dr. Luis Alberto Delgado Argote
Thesis Director

The geologic record of the Ojos Negros valley extends from the Triassic-Jurassic to the present. Lower amphibolite facies metapelite and metapsammite successions in the eastern valley, are associated with the Bedford Canyon Complex (210-170 Ma). Lavas metamorphosed to greenschist facies overlay the Bedford Canyon Complex which is also intruded by sills associated with picritic basalts of the Santiago Peak Formation. These sequences were deformed by compression before ca. 126 Ma. The San Marcos Dike swarm intruded the Peninsular Ranges batholith plutons (ca. 124 Ma), all related to the southern segment of the Santiago Peak magmatic arc. The most recent episode of regional deformation is associated with active strike-slip faulting, which defines the eastern and western boundaries of the valley. The plutons that surround the Ojos Negros valley are named: Timoteo, El Barbón, La Huerta, Los Cascabeles and El Alamar. Modal compositions of the plutons and their dikes vary from diorite to granite, belonging to the calcic and calc-alkalic series. The eastern plutons namely Timoteo, El Barbón and some stocks of La Huerta are granites with biotite, muscovite and garnet, suggestive of strongly differentiated rocks and less magnetized. In contrast, Los Cascabeles dioritic pluton in the west is notably more magnetized. In the southeast of the study area, where La Huerta pluton crops out, there is a clear overlap between magnetic series, potentially related to the nature of its basement. Geochemically, it is concluded that these plutons, the San Marcos Dike swarm, lavas and sills of Santiago Peak Formation belong to the same magmatic system that evolved along the western margin of North America. The 3D magnetic model reveals a plumbing system in western studied area, where plutons probably extend more than 6 km depth. The San Miguel and Ojos Negros faults show a decrease in magnetization down to 3 km depth.

Keywords: Peninsular Ranges batholith, Jurassic-Cretaceous magmatism, Santiago Peak, Ojos Negros Valley

Dedicatoria

Este trabajo está especialmente dedicado a mis padres: Ángel Apolinar Hernández y Blanca Patricia Morales Escamilla por todos los sacrificios que han hecho para que pudiera llegar hasta aquí, por enseñarme a ser resiliente. Todo lo bueno que algún día pueda lograr es gracias a ustedes, ojalá estén orgullosos de mí, como yo siempre lo estaré de ustedes.

A mi hermana y mejor amiga Angélica Patricia Apolinar Morales por ser mi ejemplo a seguir, gracias porque a pesar de la distancia siempre te siento cerquita de mí, siempre serás mi lugar seguro. A Gigi por ser la personita más noble que nos ilumina todos los días, gracias por tanto amor y a Jose María Sequeira Arguedas, por acompañarme en este viaje, por ser mi norte y mi paz en cualquier tormenta, que afortunada soy por crecer alado tuyo, te amo.

En memoria de mis abuelitos Eve, Güellita y Don Ángel que siempre quisieron verme realizada,
esto también es para ustedes (†).

Agradecimientos

Agradezco al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), la División de Ciencias de la Tierra (CT) por la oportunidad de realizar mis estudios de maestría. En el mismo sentido, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por permitirme ser parte del Programa de Becas para Estudios de Posgrado y el cual me permitió la realización de este trabajo a tiempo completo. Este trabajo de investigación fue posible gracias al financiamiento del proyecto 51483: “Evolución y relaciones tectónicas entre los sistemas de arco magmáticos Alisitos y Guerrero: evaluación estratigráfica, petrológica y geofísica” cuyo responsable técnico fue el Dr. Luis A. Delgado Argote y al proyecto interno 644129 (CICESE) “Indicadores estructurales y geoquímicos de las historias de emplazamiento de los plutones del centro de la península de Baja California”.

A Dios por darme fortaleza en tiempos difíciles porque al ponerme en sus manos nada es imposible. Recordando siempre a Josué 1:9 “Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente. No temas, ni desmayes; porque yo, el Señor tu Dios, estaré contigo donde quiera que vayas”.

A mi familia, Ángel Apolinar Hernández, Blanca Patricia Morales Escamilla y Angélica Patricia Apolinar Morales, por ser el motor de mi vida, por estar conmigo en cada momento, por enseñarme a luchar por mis sueños y buscar un cielo cada vez más alto. Ustedes son mi mayor ejemplo de honestidad y bondad que puede haber en las personas. Mi total admiración, amor, respeto y agradecimiento. Así como a mi abuelito Gumaro Morales Hernández y a mi segunda mamá, Olga Araceli Morales Escamilla, gracias por estar orgullosos de mí y porque a pesar de la distancia siempre están conmigo.

Mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis el Dr. Luis Alberto Delgado Argote, por su apoyo y paciencia en cada etapa de este proyecto, por su gran labor como profesor. Gracias por todas las enseñanzas tanto en campo como dentro del instituto. Su conocimiento y exigencia han sido clave tanto en mi crecimiento académico como personal.

Al Dr. Manuel Contreras López por su gran apoyo y disponibilidad en atender mis dudas, por sus comentarios y consejos que notablemente enriquecieron este trabajo. A los Doctores Marco Antonio Pérez Flores y Jonathan Carrillo López, por adentrarme en el mundo geofísico, gracias por sus aportaciones para el modelado magnético. Al Dr. Bodo Weber y al Dr. Pedro Negrete Regagnon gracias

por los comentarios y sugerencias en los avances de tesis y en su revisión, que nutrieron a esta investigación.

Agradezco infinitamente al equipo plutónico que participó en las campañas de campo: Dr. Harald Böhnelt, Dr. Luis, Porfi gracias por librarme de las abejas, Adrián Aguirre por brindarnos su casa en la visita al sur del CBP y Adhara Ávila gracias por alentarme a seguir en tiempos difíciles por todo el apoyo y enseñanzas, gracias por siempre motivarme.

A mis amigos que la ciencia me regaló: Arceo, Julia, Loly, Eli, Nats, Rodri, Raúl y Cristhian, gracias por su amistad y por recorrer juntos este camino llamado tesis, ustedes se han convertido en unas personas muy especiales para mí. Los quiero mucho.

A Dani y Epi por su amistad y por las pláticas geológicas que generaron más respuestas y también más preguntas a este trabajo.

A mi hermana por elección Iris Gauna, porque la vida fue buena en volvernos a juntar y ahora más adultas podemos seguir disfrutando juntas de nuestro amor por la geología, gracias por formar parte de esta etapa, estoy segura que siempre estaremos juntas.

A mis amigos que siempre han estado conmigo a pesar de la distancia. A mis amigos de tierras regias: Sarahí, Emily, Azusena, Maricruz, Victor Leal, Alexia, Wendy y Jerry Patiño. Así como mis amigas de tierras veracruzanas: Paloma, Karina y Vanessa. Gracias por tantas historias y por su amistad a kilómetros de distancia.

A la Dra. Yolanda Pichardo Barrón por estar al pendiente de mis avances en mi maestría por motivarme hasta culminar mis estudios, muchas gracias.

A Chemita y a su familia, que me apoyaron en los momentos más difíciles del camino, por darme la fuerza para que pudiera culminar este trabajo, siempre lo atesoraré. Muchas gracias.

Gracias a las personas que estuvieron, están y estarán. Esto todavía continúa....

¡Hasta la victoria siempre!

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	x
Lista de tablas	xviii
Capítulo 1. Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Magmatismo Mesozoico en el NW de México y SW de Estados Unidos.....	3
1.2.1 Magmatismo Triásico-Cretácico.....	3
1.3 Justificación	5
1.4 Hipótesis.....	6
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo general.....	6
1.5.2 Objetivos específicos.....	7
1.6 Metodología.....	7
1.6.1 Prospección geológica.....	7
1.6.2 Trabajo de campo.....	9
1.6.3 Análisis estructural.....	9
1.6.4 Petrografía.....	10
1.6.5 Análisis geoquímico.....	10
1.6.6 Análisis aeromagnético	13
Capítulo 2. Cinturón Batolítico Peninsular.....	14
2.1 Características geológicas del Cinturón Batolítico Peninsular	14

2.2	Características geofísicas del Cinturón Batolítico Peninsular	17
Capítulo 3.	Geología del área de estudio.....	19
3.1	Cartografía geológica y petrografía.....	19
3.1.1	Rocas encajonantes en el Valle de Ojos Negros.....	21
3.1.1.1	Rocas metasedimentarias	23
3.1.1.2	Rocas metaígneas.....	27
3.1.2	Rocas plutónicas de la región del Valle de Ojos Negros.....	31
3.1.2.1	Plutones El Barbón y Timoteo	32
3.1.2.2	Plutones La Huerta	39
3.1.2.3	Plutón Los Cascabeles	46
3.1.2.4	Plutón El Alamar.....	51
3.2	Geología estructural.....	54
3.2.1	Análisis de foliaciones y lineaciones.....	55
3.2.1.1	Foliaciones en las rocas encajonantes	55
3.2.1.2	Foliación magmática en los plutones	58
3.2.2	Análisis de cizallas	59
3.3	Geoquímica de rocas ígneas.....	62
3.3.1	Geoquímica de elementos mayores.....	64
3.3.2	Química de elementos traza y tierras raras	69
Capítulo 4.	Aeromagnetometría	73
4.1	Principios físicos	74
4.2	Susceptibilidad magnética.....	76
4.2.1	Susceptibilidad magnética de las rocas encajonantes	77
4.2.2	Susceptibilidad magnética de las rocas intrusivas	78
4.3	Modelo magnético tridimensional	81
4.3.1	Perfiles magnéticos 2D.....	84
Capítulo 5.	Discusión.....	86

5.1	Geoquímica de los plutones en el contexto regional.....	88
5.2	Relaciones tectónicas regionales	91
Capítulo 6.	Conclusiones	95
	Literatura citada	97
Anexos		104

Lista de figuras

Figura

Página

- Figura 1. a) Mapa de distribución de batolitos cordilleranos del Cretácico Temprano-Paleógeno del margen occidente de Norteamérica. La distribución de las unidades plutónicas y edades fueron tomadas de la base de datos del mapa geológico de Norteamérica (Garrity y Soller, 2009), mientras que los nombres de los batolitos son de Contreras-López et al. (2021). b) Acercamiento del Cinturón Batolítico Peninsular indicando con un recuadro rojo el área de estudio, en el Valle de Ojos Negros. Coordenadas: WGS 84.2
- Figura 2. Secuencia volcánica representativa del norte de las montañas de Santana, localidad tipo de la Formación Santiago Peak. Los afloramientos volcánicos más comunes son brechas volcanoclásticas, seguido de lavas, tobas, rocas epiclásticas, diques y pequeñas intrusiones hipoabisales. La composición de las lavas varía de basalto a riolita, siendo el basalto menos común y la andesita la más abundante. Tomado de Herzig y Kimbrough (2014).4
- Figura 3. a) Vista satelital del Valle de Ojos Negros. b) Mapa geológico del área de estudio elaborado a partir de las cartas geológicas publicadas por el INEGI, H11B12 (INEGI, 1976a), H11B13 (INEGI, 1976b), I11D83 (INEGI, 1977a), I11D84 (INEGI, 1977b). La distribución de los cuerpos identificados se enumera junto con los nombres propuestos para cada plutón: 1) Plutón Guadalupe (PG), 2) Plutón Timoteo (PT), 3) Plutón El Barbón (PEB), 4) Plutón La Huerta (PLH), 5) Plutón El Alamar (PEA) y 6) Plutón Los Cascabeles (PLC). En el interior del valle se encuentra el cerro Portezuelo (CP) con orientación E-W. Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11.8
- Figura 4. a) Provincias tectonoestratigráficas prebatolíticas delimitadas por sus afinidades litológicas y geocronológicas (Modificado de Contreras-López et al., 2021). La línea continua divide las rocas plutónicas máficas magnéticas del oeste y las rocas plutónicas félsicas del este (Langenheim et al., 2014); la línea discontinua corresponde a la línea magnetita-ilmenita de Gastil et al. (1990). En la porción norte el CBP en el SW de EUA se indican los complejos plutónicos La Posta (P. La Posta; Walawender et al., 1990) y el complejo Ramona (P. Ramona; Todd et al., 2014). El rectángulo amarillo al oriente de Ensenada marca el área de estudio: el Valle de Ojos Negros. Las edades U-Pb en círculo corresponden con: rocas metamórficas prebatolíticas (Sedlock, 2003), plutónicas (Walawender et al., 1990; Ortega-Rivera, 2003; Todd et al., 2014; Almanza-García, 2023), Formación Santiago Peak (Herzig y Kimbrough, 2014) y del Enjambre de Diques San Marcos (Almanza-García, 2023). b) Conjunto de plutones asociados al Cinturón Batolítico Peninsular, en color naranja se muestran los plutones emplazados en una zona de sutura, denominados por Gastil et al. 1990 como plutones tipo La Posta, asociados con la serie ilmenita, mientras que en color rojo se exponen los plutones asociados al arco de islas Alisitos-Santiago Peak desarrollados entre 130-98 Ma (Modificado de Hildebrand y Whalen, 2014). Coordenadas: WGS 84. 16
- Figura 5. a) Mapa aeromagnético del Cinturón Batolítico Peninsular reducido al polo con el software Oasis Montaj, su inclinación y declinación fueron tomados de Langenheim et al. (2014), siendo 54° y 12° respectivamente, los datos utilizados fueron tomados de la base de datos digitales de anomalías magnéticas de Norteamérica del proyecto (NAMAG), la línea negra discontinua corresponde a la línea magnetita-ilmenita de Gastil et al. (1990). b) Mapa del campo magnético, cuyo borde es la línea punteada negra, mientras que la línea delgada roja indica la ubicación de

- los contrastes de magnetización dentro de la corteza superior y media. Tomado de Langenheim et al. (2014). Coordenadas: WGS 84. 18
- Figura 6. a) Mapa geológico del área de estudio y distribución de muestras analizadas petrográficamente. Los plutones Timoteo, La Huerta, Los Cascabeles y Alamar están delimitados de acuerdo con su composición y rasgos morfológicos (contornos continuos y discontinuos en color negro). b) Rocas encajonantes expuestas en el cerro El Portezuelo relacionadas con la Formación Santiago Peak. c) Rocas encajonantes metasedimentarias asociadas con el Complejo Bedford Canyon, las rocas intrusivas hacen referencia a las rocas plutónicas y diques de diferentes composiciones. Los colores litológicos fueron tomados de Gastil et al. (1975) y la base cartográfica fue tomada de los mapas geológicos de las cartas H11B12, H11B13, I11D83 y I11D84) del INEGI (1976a; 1976b; 1977a; 1977b) y del mapa de reconocimiento de Gastil et al. (1975). Abreviaturas: PEA: Plutón El Alamar, PEB: Plutón El Barbón, PG: Plutón Guadalupe, PLC: Plutón Los Cascabeles, PLH: Plutón La Huerta, PT: Plutón Timoteo. Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11..... 20
- Figura 7. Columna estratigráfica compuesta de Santiago Peak y el Complejo Bedford Canyon que aflora en Ojos Negros. Tanto la base de columna estratigráfica como las edades de los plutones de Ensenada fueron tomados de Ledesma-Aguilar (2018), las edades del plutón granítico y diques que afloran en el cañón Agua Caliente (Jamatay) asociados al Enjambre de Diques de San Marcos, fueron tomadas de Almanza-García (2023). 22
- Figura 8. Afloramientos de rocas metasedimentarias encajonantes del plutón El Barbón. a) Afloramiento de metapelitas con foliación definida por biotita y muscovita. b) Afloramiento de metasamitas distinguido por su grano medio y foliación marcada por micas. c) Metapelita-samita de grano fino con visibles minerales de estaurolita y granate marcados con trazos discontinuos. Abreviaturas: Grt: Granate, St: Estaurolita. 23
- Figura 9. Microfotografías de láminas delgadas de rocas metasedimentarias del plutón El Barbón. a) y b) Muestra 2-XII-23 de esquisto de estaurolita rodeado por cristales de muscovita vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. c) y d) Muestra 1-XII-23 de metasamita con textura granoblástica y bandas de micas (muscovita y biotita) paralelas a la foliación vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente; e) y f) muestra 7-XII-23 de metasamita con textura lepidoblástica con clivaje de crenulación marcado por muscovita vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. Abreviaturas: Bt: Biotita, Ep: Epidota, Ms: Muscovita Qz: Cuarzo, St: Estaurolita. 25
- Figura 10. Representación esquemática del desarrollo de clivaje de crenulación en la muestra 7-XII-23 a partir de una foliación preexistente S1 (D1) y una segunda fase de deformación D2. Figura modificada de Winter (2014). 26
- Figura 11. Representación esquemática de los cristales de granate sin-cinemáticos de la muestra 2-XII-23 donde el blasto de Grt giró a medida que crecía, incorporando progresivamente la foliación externa, semejante a una bola de nieve. Modificado de Winter (2014). 27
- Figura 12. Microfotografías de muestra 1-IX-23 del afloramiento de derrame andesítico, al sur de la comunidad Real del Castillo Nuevo, en el cerro Ojos Negros vistas en luz polarizada a) plaza y b) cruzada. Se observa una textura protomilonítica y foliación bien desarrollada en cristales finos de cuarzo, plagioclasa y epidota, con porfiroclastos de clinopiroxeno y hornblenda. Abreviaturas: Cpx: Clinopiroxeno, Qz: Cuarzo. 28

- Figura 13. a) Derrames brechados de andesita deformados y metamorizados al norte de la localidad Real del Castillo Viejo. b) Cuerpo exhalativo formado por fragmentos sedimentarios y volcánicos, el cual sobreyace a los derrames brechados. 28
- Figura 14. Microfotografías de la muestra 6-X-23 de un afloramiento de *sill* andesítico-basáltico al sur del plutón El Barbón en vista de luz polarizada a) plana y b) cruzada. Se observa una textura bandeada de granos gruesos de Cpx y Opx y granos finos Ep y Pl. Abreviaturas: Chl: Clorita, Cpx: Clinopiroxeno, Ep: Epidota, Pl: Plagioclasa. 29
- Figura 15. a) Afloramiento de cata de talco deformado, parte central del cerro El Portezuelo. b) y c) Microfotografías de muestra 2-IX-23 vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente, se observa relictos de plagioclasa y hornblendas en una matriz vítrea recrystalizada. Abreviaturas: Op: Opacos, Pl: Plagioclasa y Tre: Tremolita. 30
- Figura 16. Diagrama de clasificación modal cuarzo-feldespato alcalino- plagioclasa (QAP; Le Maitre et al., 2002) de las rocas intrusivas del Valle de Ojos Negros (con base en el conteo modal de 363 puntos). Series composicionales para rocas plutónicas de acuerdo con Frost y Frost (2008). 31
- Figura 17. Relaciones de campo del plutón El Barbón. a) Mezcla de magma (*mingling*), donde se distingue la interacción física de al menos dos magmas. Enclaves máficos en b) granito y c) granodiorita. Abreviaturas: Grd: Granodiorita, Gr: Granito. 32
- Figura 18. Diagrama de clasificación modal cuarzo-feldespato alcalino- plagioclasa (QAP; Le Maitre et al., 2002) de las muestras intrusivas de los plutones Timoteo y El Barbón (con base en el conteo modal de 363 puntos). Series composicionales para rocas plutónicas de acuerdo con Frost y Frost (2008). 34
- Figura 19. Microfotografías de láminas delgadas del plutón El Barbón. a) y b) Muestra 3-XII-23 granito de dos micas holocristalina hipidiomórfica de grano medio con cristales de granate vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente. c) y d) Muestra 2-X-23 Granito de dos micas, resalta la textura de exsolución en los feldespatos potásicos formada a partir de la separación de un feldespato homogéneo vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. e) y f) Muestra 4-X-23 Granito de dos micas, en la microfotografía se muestra la textura mirmequítica formada en zonas donde la plagioclasa está en contacto con el feldespato potásico vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. Abreviaturas: Bt: Biotita, Grt: Granate, Kfs: Feldespato potásico Mrm: Mirmequita Ms: Muscovita, Pl: Plagioclasa, Qz: Cuarzo. 35
- Figura 20. Microfotografías de diques que intrusionan al plutón El Barbón. a) y b) Muestra 8-X-23 dique máfico porfídico con fenocristales de And-Lab en una matriz rica en clinopiroxeno cloritizado vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. c) y d) Muestra 9-X-23 dique andesítico con fenocristales de And en una matriz que muestra cizallamiento y recrystalización vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. e) y f) Muestra 10-X-23 dique de granodiorita de dos micas y en algunas zonas desarrolla argilitización selectiva vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. Abreviaturas: Bt: Biotita, Cpx: Clinopiroxeno, Ms: Muscovita, Op: Opacos, Pl: Plagioclasa, Qz: Cuarzo. 36
- Figura 21. Microfotografía de la muestra 10-III-24 del plutón Timoteo en vista de luz polarizada a) cruzada y b) plana. Se observa una tonalita de dos micas con plagioclasa de composición oligoclasa-andesina, con abundante cuarzo recrystalizado intersticial. Abreviaturas: Bt: Biotita, Ms: Muscovita, Pl: Plagioclasa, Qz: Cuarzo. 37

Figura 22. Microfotografías de láminas delgadas de diques que intrusionan al plutón Timoteo asociados al Enjambre de Diques San Marcos en vista de luz polarizada cruzada y plana. a) y b) Muestra 9-III-24 dique dacítico con plagioclasas de composición oligoclasa en una matriz rica en clinozoisita, tremolita. c) y d) Muestra 11-III-23 dique dacítico. Abreviaturas: Bt: Biotita, Pl: Plagioclase, Qz: Cuarzo, Tr: Tremolita..... 38

Figura 23. Diagrama de clasificación modal cuarzo-feldespato alcalino- plagioclase (QAP; Le Maitre et al., 2002) de las muestras intrusivas del plutón La Huerta (con base en el conteo modal de 363 puntos). Series composicionales para rocas plutónicas de acuerdo con Frost y Frost (2008). 39

Figura 24. a) Rocas plutónicas cuarzodioríticas de La Huerta en el sitio de toma de la muestra 8-III-24, en el cual afloran cuarzodioritas de hornblenda con enclaves máficos elongados paralelos a la foliación. b y c) Microfotografías de cuarzodiorita de hornblenda y biotita de grano medio con plagioclasas de composición oligoclase- andesina vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente. Abreviaturas: Bt: Biotita, Hbl: Hornblenda, Op: Opacos, Pl: Plagioclase. 41

Figura 25. Rocas plutónicas granodioríticas vistas en afloramiento y en secciones delgadas de La Huerta, muestra 2-III-24. a) Segregaciones félsicas deformadas por flujo viscoso en una granodiorita desarrollaron agregados cristalinos y vetillas paralelas a la foliación. En la parte superior se observa un enclave máfico elipsoide. b) Autolito de grano grueso en granodiorita. c) y d) Microfotografías vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, granodiorita con textura hipidiomórfica de grano medio, andesina y abundante biotita. Abreviaturas: Bt: Biotita, Pl: Plagioclase, Qz: Cuarzo..... 42

Figura 26. a) Afloramiento de dique granodiorítico en el sitio de toma de la muestra 3-III-24, se observan cristales de plagioclase que envuelven minerales opacos. b) y c) Microfotografías vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, se observa una textura holocristalina de grano medio a grande y oligoclase-andesina. Abreviaturas: Bt: Biotita, Op: Opacos, Pl: Plagioclase, Qz: Cuarzo..... 43

Figura 27. a) Afloramiento de tonalita del interior del plutón La Huerta, sitio de toma de la muestra 6-III-24. Tonalita de hornblenda- biotita de grano grueso. b) y c) Microfotografías de láminas delgadas de tonalita de hornblenda y biotita vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, se observa una foliación bien desarrollada por los minerales máficos y félsicos. Abreviaturas: Bt: Biotita, Hbl: Hornblenda, Pl: Plagioclase, Qz: Cuarzo..... 44

Figura 28. a) Granito de dos micas en la parte central del plutón La Huerta, muestra 7-III-24 vista en afloramiento, donde resaltan cúmulos máficos subredondeados formados principalmente por biotita. b) y c) Microfotografías de lámina delgada de granito de dos micas (biotita y muscovita) de grano medio vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, Abreviaturas: Bt: Biotita, Kfs: Feldespato potásico, Ms: Muscovita. 45

Figura 29. a) Dique granodiorítico con textura porfídica en el sitio de toma de la muestra 1-III-24, al oeste del plutón La Huerta. b) y c) Secciones delgadas vistas en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, se observan fenocristales de plagioclase, biotita y cuarzo, su matriz es de grano fino compuesta por minerales de plagioclase y biotita. Abreviaturas: Bt: Biotita, Pl: Plagioclase, Qz: Cuarzo. 45

Figura 30. Diagrama de clasificación modal cuarzo-feldespato alcalino- plagioclase (QAP; Le Maitre et al., 2002) de las muestras intrusivas del plutón Los Cascabeles (con base en el conteo modal de

- 363 puntos). Series composicionales para rocas plutónicas de acuerdo con Frost y Frost (2008). 46
- Figura 31. Microfotografías de láminas delgadas del plutón Los Cascabeles. a) y b) Muestra 6-II-24 de diorita de hornblenda vista en luz polarizada plana y cruzada, se observan hornblendas tremolitizadas, con un hábito fibroso. c) y d) Cuarzodiorita de hornblenda de grano medio de la muestra 9-II-24 vista en luz polarizada plana y cruzada, las plagioclasas subhedrales son de composición andesina. e) y f) Granito de biotita vista en luz polarizada plana y cruzada, se observa una textura holocristalina de grano medio y algunas veces pertitas. Las biotitas muestran un hábito subhedral a xenomórfico. Abreviaturas: Bt: Biotita, Cpx: Clinopiroxeno, Hbl: Hornblenda, Kfs: Feldespato Potásico, Pl: Plagioclasa, Qz: Cuarzo, Tr: Tremolita. 48
- Figura 32. a) Dique diorítico con textura porfídica y fenocristales de plagioclasa del plutón Los Cascabeles, cortando rocas principalmente dioríticas (sitio de muestra 12-II-24). b) Dique de andesita de la muestra 13-III-24 con textura porfídica, en donde los fenocristales de plagioclasa marcan la foliación. c) Diques de diferentes composiciones aparentemente contemporáneos, señalados con líneas discontinuas, el dique máfico, corresponde a la muestra diorítica 7-II-24... 49
- Figura 33. Microfotografías de láminas delgadas de diques que intrusionan al plutón Los Cascabeles. a) y b) Muestra 12-II-24 vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, presenta textura porfídica, además de fenocristales de hornblenda epidotizados y plagioclasas de composición andesina. c) y d) La muestra 7-II-24 (dique diorítico) vista en luz polarizada plana y cruzada, presenta cristales de clinopiroxenos y hornblenda tremolitizados con textura fibrosa y abundantes óxidos de Fe secundarios. e) y f) Muestra 10-II-24 (dique tonalítico) visto en luz polarizada plana y cruzada, compuesto por cristales de plagioclasa de composición oligoclasa-andesina y una matriz de aspecto vítreo recrystalizado. Abreviaturas: Bt: Biotita, Ep: Epidota, Hbl: Hornblenda, Op: Opacos, Pl: Plagioclasa, Qz: Cuarzo, Tr: Tremolita. 50
- Figura 34. Diagrama de clasificación modal cuarzo-feldespato alcalino- plagioclasa (QAP; Le Maitre et al., 2002) de las muestras intrusivas del plutón El Alamar (con base en el conteo modal de 363 puntos). Series composicionales para rocas plutónicas de acuerdo con Frost y Frost (2008). 52
- Figura 35. a) y b) Microfotografía de una granodiorita de biotita vista en luz polarizada plana y cruzada (muestra 15-III-24) de grano grueso con textura subhedral del plutón El Alamar. Abreviaturas: Bt: Biotita, Pl: Plagioclasa, Qz: Cuarzo. 52
- Figura 36. Afloramientos del dique cuarzodiorítico que intrusiona al plutón El Alamar con variaciones texturales en el centro y en sus bordes, a) Periferia del dique, con textura porfídica y fenocristales de plagioclasa. b) Centro del dique, que presenta textura fanerítica. 53
- Figura 37. a) Microfotografías de lámina delgada del dique del plutón El Alamar vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, correspondiente a una cuarzodiorita de hornblenda (muestra 14-III-24) parcialmente tremolitizadas con una textura fibrosa y óxidos de Fe dispersos con hábito subhedral. Abreviaturas: Ep: Epidota, Hbl: Hornblenda, Ox: Óxidos de Fe, Pl: Plagioclasa, Tr: Tremolita. 53
- Figura 38. a) Mapa geológico que muestra las foliaciones de las rocas encajonantes del área de estudio. b) Acercamiento al plutón El Barbón con las foliaciones en rocas metasedimentarias (en color azul) asociadas al Complejo Bedford Canyon. c) Estereogramas de densidad de polos de planos de foliación que se presentan con los contornos de Kamb (%) y lineaciones de rocas metasedimentarias, además se presenta el estereograma para la foliación en un *sill* que se

encuentra en el área del Babón, este cuerpo es asociado a la Formación Santiago Peak. d) Acercamiento al cerro El Portezuelo, que muestra las foliaciones en rocas metaígneas asociado con la Formación Santiago Peak y e) estereogramas de densidad de polos de planos de foliación que presentan los contornos de Kamb (%) y lineaciones de rocas metaígneas de la Formación Santiago Peak del cerro El Portezuelo (cruces). Abreviaturas: n: Número de datos, PEA: Plutón El Alamar, PEB: Plutón El Barbón, PG: Plutón Guadalupe, PLC: Plutón Los Cascabeles, PLH: Plutón La Huerta, PT: Plutón Timoteo y Vc: Valor de correlación. Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11... 56

Figura 39. a) Mapa geológico con las foliaciones de las rocas plutónicas. b) Acercamiento al plutón El Barbón, donde se muestran las foliaciones magmáticas en color rojo c) Acercamiento al cerro El Portezuelo y d) Estereogramas que muestran la densidad de polos de planos de foliación en contornos de densidad Kamb para cada plutón analizado. Abreviaturas: n: Número de datos, PEA: Plutón El Alamar, PEB: Plutón El Barbón, PG: Plutón Guadalupe, PLC: Plutón Los Cascabeles, PLH: Plutón La Huerta, PT: Plutón Timoteo. Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11..... 57

Figura 40. Análisis cinemáticos de sitios en tres zonas del Valle de Ojos Negros. a) Las estructuras de deformación de las rocas metaígneas se asocian con deformación compresiva, la cual es particularmente evidente en el cerro El Portezuelo. b) Soluciones de análisis cinemático para la zona del Barbón medidas en las rocas encajonantes, asociado con el sistema de fallas San Miguel, c) Solución cinemática medidas en las rocas plutónicas de Los Cascabeles, asociada con el sistema fallas Ojos Negros. Donde P es el eje de presión y T el eje de tensión. 60

Figura 41. a) Mapa geológico indicando los sistemas de falla San Miguel y Ojos Negros. b) Acercamiento del plutón El Barbón, donde se muestra la dirección de la estría en cada sitio, c) Acercamiento al cerro El Portezuelo, donde se observa los indicadores de esfuerzo máximo (σ_1) de cada sitio. d) Estereogramas para cada zona analizada: cerro El Portezuelo, Plutón El Barbón y Plutón Los Cascabeles, en donde se marca los ejes de presión (P) y tensión (T) respectivamente. Abreviaturas: PEA: Plutón El Alamar, PEB: Plutón El Barbón, PG: Plutón Guadalupe, PLC: Plutón Los Cascabeles, PLH: Plutón La Huerta y PT: Plutón Timoteo. Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11..... 61

Figura 42. a) Mapa geológico del área de estudio indicando la distribución de muestras analizadas, resalta en color rojo las seleccionadas para el análisis geoquímico. b) Acercamiento a la zona del cerro El Portezuelo. c) Acercamiento a la zona del plutón El Barbón. Abreviaturas: PT: Plutón Timoteo, PEB: Plutón El Barbón, PLH: Plutón La Huerta, PLC: Plutón Los Cascabeles, PEA: Plutón El Alamar. Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11. 63

Figura 43. Diagramas de índice de Intemperismo químico MFW de Otha y Arai (2007), donde M, F y W representan las fuentes máficas, félsicas y materiales intemperizados, respectivamente. a) En el perfil de meteorización del basalto se ubican las rocas metaígneas, donde se definen las facies: fresco, moderadamente meteorizado, intensamente meteorizadas y suelo (facies 1 a 4, respectivamente). b) Las rocas plutónicas del Valle de Ojos Negros grafican en la tendencia de rocas ígneas. En el lado F-W se indican los valores de densidad decrecientes estimados según el grado de Intemperismo. Los números dentro de los símbolos de las muestras indican su respectiva leyenda, la cual se encuentra a su derecha. Las abreviaturas corresponden con rocas ígneas representativas: Kom: komatiita, Bas: Basalto, And: Andesita calco-alcalina, Dac: Dacita calco-alcalina, Gra: Granito, Rio: Riolita calco-calcalina. 64

Figura 44. Clasificación geoquímica de las rocas del Valle de Ojos Negros. a) Diagrama de álcalis totales vs. sílice (TAS; clasificación química y nomenclatura de Le Maitre et al., 2002, según Le Bas et al., 1986) para rocas metaígneas asociadas con la Formación Santiago Peak, b) Diagrama TAS (Middlemost, 1994) para rocas plutónicas y diques del valle de Ojos Negros. La subdivisión entre

- las series alcalina y subalcalina es la propuesta por Irvine y Baragar (1971; tomado de Rollinson y Pease, 2021). Las flechas en las muestras 5-IX-23 y 3-II-24 indican que el contenido de SiO_2 es menor al 30%. El listado numérico indica la clave de cada muestra. 66
- Figura 45. a) Diagrama de clasificación An-Ab-Or (Barker, 1979) para rocas graníticas de acuerdo con su composición normativa CIPW para las rocas plutónicas del Valle de Ojos Negros. b) Diagrama bivariado de Na_2O vs. Sílice. c) Diagrama bivariado de K_2O vs. sílice. El listado numérico indica la clave de cada muestra..... 67
- Figura 46. Diagramas de clasificación geoquímica de Frost y Frost (2008). a) Diagrama de sílice vs. $\text{FeO}^* = \text{FeO}^T / (\text{FeO}^T + \text{MgO})$. b) Diagrama de sílice vs. índice de saturación de aluminio (ASI). c) Diagrama de sílice vs. índice modificado de álcalis menos calcio (MALI) donde se muestra que la mayor parte de las muestras coinciden con el campo principalmente cálcico de las rocas del Cinturón Batolítico Peninsular. El listado numérico indica la clave de cada muestra. Abreviaturas: PEB: Plutón El Barbón, PT: Plutón Timoteo, DP: Dique en el cerro El Portezuelo, PLH: Plutón La Huerta, PLC: Plutón Los Cascabeles, PEA: Plutón El Alamar. 68
- Figura 47. a) Diagrama de clasificación tectonomagmática de rocas basálticas $\text{Ti}/1000$ vs. V de Shervais (1982) para las rocas metaígneas del Valle de Ojos Negros. b) Diagrama de discriminación tectónica para granitos (Pearce et al., 1984). Los números dentro de los símbolos de las muestras indican su respectiva leyenda, la cual se encuentra a la izquierda en rocas metaígneas y derecha para las rocas plutónicas. Abreviaturas: P: Plutón, D: Dique. 70
- Figura 48. Diagrama de elementos de tierras raras normalizados a condritas (McDonough y Sun, 1995) para las rocas metaígneas del Valle de Ojos Negros..... 71
- Figura 49. Diagrama de elementos de tierras raras normalizados a condritas (McDonough y Sun, 1995) para las rocas plutónicas y diques del área de estudio, separada por plutón analizado: a) plutón El Barbón y Timoteo, b) plutón La Huerta, c) plutón Los Cascabeles y d) plutón El Alamar..... 72
- Figura 50. Rangos de susceptibilidad magnética para los principales tipos de rocas. Los cuadros en blanco indican los rangos comunes de susceptibilidad magnética, los cuadros sombreados muestran los rangos máximos de susceptibilidad. Modificado de Clark (1990)..... 75
- Figura 51. Mapa del campo magnético reducido al polo del Valle de Ojos Negros indicando los valores de susceptibilidad magnética medida *in situ*. El valor de referencia entre los valores de baja y alta susceptibilidad magnética es de 2×10^{-3} (SI) (Ávila-Ortiz, 2021). Los círculos corresponden a rocas plutónicas, los triángulos a diques y las cruces a las rocas encajonantes, indicando las metasedimentarias (s) y las metaígneas (i). Abreviaturas: PT: Plutón Timoteo, PEB: Plutón El Barbón, PLH: Plutón La Huerta, PG: Plutón Guadalupe, PLC: Plutón Los Cascabeles, PEA: Plutón El Alamar. Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11. 77
- Figura 52. Susceptibilidad magnética ($\times 10^{-3}$ SI) de las rocas intrusivas y sus encajonantes en el área de estudio agrupados por plutón analizado. La línea discontinua marca 2×10^{-3} (SI) correspondiente a la frontera entre rocas consideradas magnéticas y no magnéticas. Abreviaturas: n: número de sitios medidos..... 80
- Figura 53. Susceptibilidad magnética ($\times 10^{-3}$ SI) de las rocas intrusivas y sus encajonantes en el área de estudio agrupados por litología. La línea discontinua marca 2×10^{-3} (SI) correspondiente a la frontera entre rocas consideradas magnéticas y no magnéticas. Abreviaturas: n: número de sitios medidos..... 81

Figura 54. a) Mapa del campo magnético reducido al polo del Valle de Ojos Negros y zonas aledañas, marcando con líneas discontinuas los plutones identificados y lineamientos estructurales. Se delimita el área de estudio con un cuadro negro y se marca con abreviaturas las unidades litológicas. b) Modelo magnético tridimensional hasta 6 km de profundidad a partir de la inversión magnética. El modelo no tiene exageración vertical. Se muestran isosuperficies de magnetización de 0.4 A/m en anaranjado, hasta 2 A/m, correspondiente a las zonas en rojo. El mapa del campo magnético reducido al polo se presenta sobre las isosuperficies. Los cuerpos magnetizados permiten definir la forma y conectividad entre las rocas ígneas, principalmente en el occidente, mientras que en la zona de La Huerta se definen cuerpos discretos y un cuerpo voluminoso en la esquina SE del mapa magnético. Es notable la indefinición de los plutones Timoteo y El Barbón en el norte. Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11. 82

Figura 55. a) Mapa del campo magnético reducido al polo del Valle de Ojos Negros en donde se marcan los perfiles para las secciones transversales. Secciones transversales extraídas de la inversión magnética tridimensional hasta 6 km de profundidad, para los perfiles b) A-A', c) B-B', d) C-C' y e) D-D'. Las líneas continuas gruesas corresponden a los contactos entre cuerpos magnetizados contrastantes y, las líneas discontinuas indican los contactos con el sistema de fallas Ojos Negros y San Miguel, cartografiadas en superficie. Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11. 83

Figura 56 Diagramas de clasificación geoquímica para muestras correlacionables con las del Valle de Ojos Negros, marcadas con símbolos en color rosa (este trabajo); las muestras de la Formación Santiago Peak se somborean en color verde (Herzig y Kimbrough, 2014) y el conjunto de diques del Enjambre San Marcos en azul (Farquharson, 2004 y Almanza-García, 2023. a) Diagrama de álcalis totales vs. sílice (TAS; Middlemost, 1994) para rocas plutónicas. b) Diagrama de sílice vs. FeO* (Frost y Frost, 2008). c) Diagrama de sílice vs. índice de saturación de aluminio (ASI; Frost y Frost, 2008). d) Diagrama de clasificación An-Ab-Or (Barker, 1979) para rocas graníticas de acuerdo con su composición normativa CIPW, e) diagrama de discriminación tectónica para granitos Y+Nb vs Rb (Pearce et al., 1984). 90

Figura 57 Modelo tectónico propuesto para el área de Ojos Negros que muestra los episodios regionales en el sur de California EUA y noroeste de Baja California. A partir del Triásico, hasta el Jurásico Medio se depositaron rocas sedimentarias con material derivado del continente, formando el Complejo Bedford Canyon, metamorfozadas en facies de anfibolita. Este Complejo está sobreyacido por rocas volcánicas del arco de islas Santiago Peak del Jurásico-Cretácico Temprano que se ubica cerca del margen continental y es parte del norte del Cinturón Batolítico Peninsular. En esa región el magmatismo es continuo hasta el Cretácico Temprano, de forma que los plutones iniciales están intrusionados por plutones de las últimas fases magmáticas de este arco continuo (Shaw et al., 2003). En el área de estudio el emplazamiento de plutones de ca. 126 Ma y del Enjambre de Diques San Marcos es penecontemporáneo. 92

Lista de tablas

Tabla	Página
Tabla 1. Muestras analizadas por geoquímica de roca total.....	11
Tabla 2. Límites de detección de elementos mayores y elementos traza de los análisis “4LithoResearch” reportados por el laboratorio ActLabs de Ontario, Canadá.....	12
Tabla 3. Síntesis petrográfica de las rocas metasedimentarias asociadas al Complejo Bedford Canyon.	24
Tabla 4. Síntesis petrográfica de las rocas plutónicas y diques del plutón El Barbón.....	33
Tabla 5. Síntesis petrográfica de la roca plutónica y diques del plutón Timoteo.	38
Tabla 6. Síntesis petrográfica de la roca plutónica y diques del conjunto La Huerta.	40
Tabla 7. Síntesis petrográfica de las rocas plutónicas y diques del plutón Los Cascabeles.	47
Tabla 8. Síntesis petrográfica de las rocas plutónicas y diques del plutón El Alamar.....	54
Tabla 9. Listado de muestras recolectadas, en donde se muestra su relación en campo, el cuerpo plutónico al que está asociado y el método analítico que fue utilizado.....	104
Tabla 10. Características petrográficas de la muestra metasedimentaria 6-IX-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	107
Tabla 11. Características petrográficas de la muestra 5-X-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	108
Tabla 12. Características petrográficas de la muestra 1-XII-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	108
Tabla 13. Características petrográficas de la muestra 2-XII-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	109
Tabla 14. Características petrográficas de la muestra 5-XII-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	109
Tabla 15. Características petrográficas de la muestra 6-XII-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	110
Tabla 16. Características petrográficas de la muestra 7-XII-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	110
Tabla 17. Características petrográficas de la muestra 1-IX-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	111

Tabla 18. Características petrográficas de la muestra 2-IX-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	111
Tabla 19. Características petrográficas de la muestra 5-IX-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	112
Tabla 20. Características petrográficas de la muestra 1-II-24, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	112
Tabla 21. Características petrográficas de la muestra 3-II-24, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	113
Tabla 22. Características petrográficas de la muestra 6-X-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.	113
Tabla 23. Características petrográficas de la muestra 1-X-23.....	114
Tabla 24. Características petrográficas de la muestra 2-X-23.....	114
Tabla 25. Características petrográficas de la muestra 7-X-23.....	115
Tabla 26. Características petrográficas de la muestra 3-XII-23.....	115
Tabla 27. Características petrográficas de la muestra 8-X-23.....	116
Tabla 28. Características petrográficas de la muestra 9-X-23.....	116
Tabla 29. Características petrográficas de la muestra 10-X-23.....	117
Tabla 30. Características petrográficas de la muestra 10-III-24.....	117
Tabla 31. Características petrográficas de la muestra 9-III-24.....	118
Tabla 32. Características petrográficas de la muestra 11-III-24.....	118
Tabla 33. Características petrográficas de la muestra 2-III-24.....	119
Tabla 34. Características petrográficas de la muestra 5-III-24.....	119
Tabla 35. Características petrográficas de la muestra 6-III-24.....	120
Tabla 36. Características petrográficas de la muestra 7-III-24.....	120
Tabla 37. Características petrográficas de la muestra 8-III-24.....	121
Tabla 38. Características petrográficas de la muestra 1-III-24.....	121
Tabla 39. Características petrográficas de la muestra 3-III-24.....	122
Tabla 40. Características petrográficas de la muestra 5-II-24.....	122
Tabla 41. Características petrográficas de la muestra 6-II-24.....	123

Tabla 42. Características petrográficas de la muestra 9-II-24.....	123
Tabla 43. Características petrográficas de la muestra 7-II-24.....	124
Tabla 44. Características petrográficas de la muestra 10-II-24.....	124
Tabla 45. Características petrográficas de la muestra 12-II-24.....	125
Tabla 46. Características petrográficas de la muestra 12-III-24.....	125
Tabla 47. Características petrográficas de la muestra 13-III-24.....	126
Tabla 48. Características petrográficas de la muestra 15-III-24.....	126
Tabla 49. Características petrográficas de la muestra 14-III-24.....	127
Tabla 50. Características cinemáticas de las rocas metaígneas.	128
Tabla 51. Características cinemáticas de la zona El Barbón.....	128
Tabla 52. Características cinemáticas de la zona Los Cascabeles.	129
Tabla 53. Datos de susceptibilidad magnética promedio por sitio y plutón correspondiente.	130
Tabla 54. Geoquímica en roca total de las rocas metaígneas, plutónicas y diques del Valle de Ojos Negros.	132
Tabla 55. Geoquímica en roca total de las rocas plutónicas y diques del Valle de Ojos Negros.	134

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción

Los márgenes continentales convergentes, donde la litósfera oceánica subduce bajo la litósfera continental, son zonas donde puede ocurrir intenso magmatismo y crecimiento cortical. Por esta razón, comprender los mecanismos que controlan la acreción magmática en los arcos y las tasas de crecimiento de la corteza proporcionan información clave para estudios tectónicos (Kirsch et al., 2016).

Un excelente ejemplo, es el magmatismo del margen oeste de Norteamérica, en donde se registran diferentes periodos de subducción. En algunas partes del sistema, la subducción inició en el Paleozoico Temprano y continúa en la actualidad, proporcionando un registro excepcionalmente extenso (Kirsch et al., 2016). Numerosos plutones fueron emplazados de manera individual o como grandes batolitos desarrollando una corteza madura en la margen occidental de Norteamérica (Valencia-Moreno y Ortega-Rivera, 2011) de más de 15, 000 km de longitud, desde Alaska hasta México (Figura 1).

Con respecto a México, desde la península de Baja California hasta por lo menos Jalisco, se han documentado segmentos de arco que guardan registro de esta evolución en las siguientes regiones: **(a)** el Cinturón Batolítico Peninsular (CBP), **(b)** el Bloque de Los Cabos, **(c)** el Batolito de Sonora-Sinaloa y **(d)** el Batolito de Puerto Vallarta (Figura 1).

El Cinturón Batolítico Peninsular (CBP) aflora desde Riverside, California (EUA) hasta la parte central de la península de Baja California. Gastil (1993) dividió el cinturón en una zona occidental y en una zona oriental, de acuerdo a sus rasgos magnéticos y petrológicos los cuales interpreta como un reflejo de su naturaleza litosférica.

La zona occidental tiene una firma composicional de arco de islas, mientras que la zona oriental se asocia a una corteza madura y continental (Wetmore et al., 2003; Schmidt et al., 2014). Más tarde, basados en la concentración de estudios petrológicos Contreras-López et al. (2021) dividieron latitudinalmente el CBP en las regiones norte, centro y sur.

El área de estudio se localiza en la región norte del CBP y por ello comparte numerosas características con

los plutones del sur de California, por ejemplo, con el complejo plutónico Ramona (Tood et al., 2014), al oriente de San Diego, California, EUA.

Adicionalmente, en algunos cuerpos plutónicos del área de estudio se observa el enjambre de diques reportado por Gastil et al. (1975) denominado como Enjambre de Diques San Marcos analizado por Farquharson (2004) y Almanza-García (2023).

En esta tesis se reportan nuevos datos petrográficos, estructurales, geoquímicos y un análisis de datos aeromagnéticos de la región del Valle de Ojos Negros, Baja California con los cuales se propone un modelo geológico que describe los plutones que circundan el valle y su relación con la porción norte del Cinturón Batolítico Peninsular, separada de la porción central por la falla Agua Blanca.

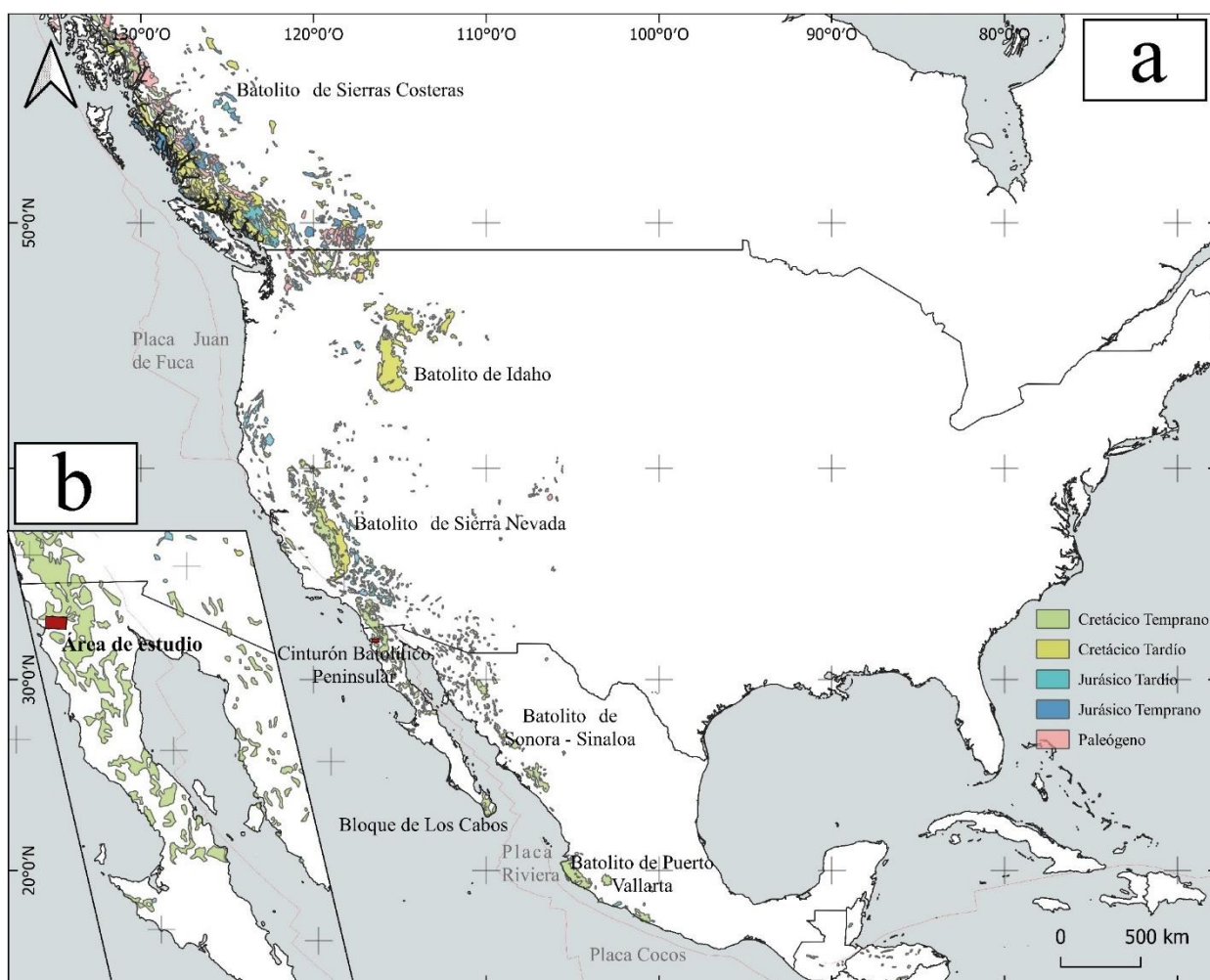


Figura 1. a) Mapa de distribución de batolitos cordilleranos del Cretácico Temprano-Paleógeno del margen occidente de Norteamérica. La distribución de las unidades plutónicas y edades fueron tomadas de la base de datos del mapa geológico de Norteamérica (Garrity y Soller, 2009), mientras que los nombres de los batolitos son de Contreras-López et al. (2021). b) Acercamiento del Cinturón Batolítico Peninsular indicando con un recuadro rojo el área de estudio, en el Valle de Ojos Negros. **Coordenadas:** WGS 84.

1.2 Magmatismo Mesozoico en el NW de México y SW de Estados Unidos

Dado las diferentes naturalezas litosféricas del Cinturón Batolítico Peninsular, edad de las secuencias litológicas y estilo de deformación, Gastil (1993) definió dos segmentos de arco separados latitudinalmente por la ancestral falla Agua Blanca (Wetmore et al., 2014). Se ha propuesto que dicha falla yuxtapone al segmento de arco de Santiago Peak en el norte y el segmento Alisitos en el sur (Wetmore et al., 2003). Tal yuxtaposición debió ocurrir a finales del Cretácico Temprano durante la colisión del arco Alisitos contra el margen continental del sur de Norteamérica (Schmidt et al., 2014). El área de estudio se encuentra al norte de la falla Agua Blanca, por lo que las rocas prebatolíticas en la región incluyen desde carbonatos con fauna ordovícica cerca del Rancho San Marcos (Lothringer, 1993), aproximadamente 20 km hacia el valle de Ojos Negros, rocas clásticas turbidíticas de la Formación Bedford Canyon y una sucesión volcánica y sedimentaria de la Formación Santiago Peak del Jurásico Medio y Cretácico Temprano, respectivamente.

1.2.1 Magmatismo Triásico-Cretácico

Según Gastil (1993) la paleogeografía del SW de Estados Unidos durante el Triásico, estuvo dominada por un talud formado desde el Paleozoico que profundizó hacia el SW, mientras que, hacia el este, del ahora Golfo de California, el ambiente fue de plataforma arrecifal. Los ambientes profundos en su mayoría depósitos turbidíticos se localizaron hacia el SW de Estados Unidos y el NW de Baja California.

Se tiene registro de rocas prebatolíticas cerca del Rancho de San Marcos que van desde el Ordovícico, (Lothringer, 1993) hasta sedimentos turbidíticos del Triásico Tardío al Jurásico que han sido descritos en varias formaciones localizadas al norte el SW Estados Unidos, como las formaciones French Valley, Esquisto Julian y Bedford Canyon, las cuales son correlacionables en Baja California con la Formación Vallecitos (Wetmore et al., 2003). Sin embargo, debido a su similitud litológica, ambiente deposicional y grado de metamorfismo se agrupan como Complejo Bedford Canyon.

En cuanto al magmatismo, Valencia-Moreno y Ortega-Rivera (2011) reportan un arco magmático activo Pérmico-Triásico en la región oriental de México previo a la ruptura de Pangea y señalan que la actividad magmática del arco continuó durante el Triásico-Jurásico de manera simultánea a la extensión intracontinental asociada la ruptura de ese supercontinente. En el suroeste de Estados Unidos y noroeste de México, las rocas ígneas asociadas a ese cinturón son escasas, reportando una edad U-Pb en circones

de 225 Ma obtenida en un plutón que aflora en el noroeste de Sonora (Valencia-Moreno y Ortega-Rivera, 2011). Durante el Jurásico se tiene registro de un periodo de actividad magmática con afinidad continental conocido como arco Nazas (Valencia-Moreno y Ortega-Rivera, 2011) el cual se distribuye en el suroeste de EUA y Sonora (Contreras-López, 2020).

Gastil et al. (1975) propusieron que la evolución geológica del Noroeste de México entre el Jurásico Medio al Cretácico Tardío (163-90 Ma) se desarrolló en una zona de subducción al que se asocia un arco de islas inicial que evolucionó hasta acrecionarse tectónicamente con la margen occidental de México. Hace aproximadamente 12 Ma un episodio extensional culminó con la ruptura de la litósfera continental a lo largo del actual Golfo de California y el desarrollo del sistema transforme San Andrés-Golfo de California.

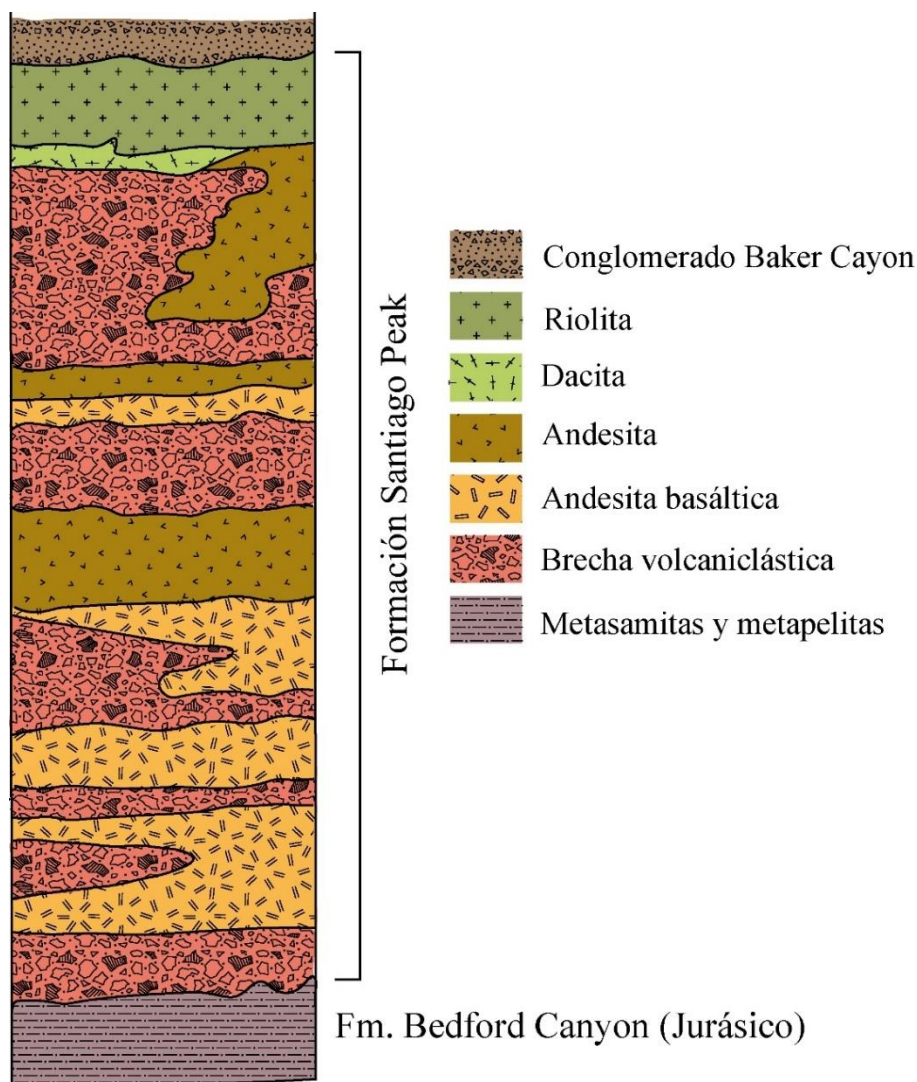


Figura 2. Secuencia volcánica representativa del norte de las montañas de Santana, localidad tipo de la Formación Santiago Peak. Los afloramientos volcánicos más comunes son brechas volcanoclásticas, seguido de lavas, tobas, rocas epiclásticas, diques y pequeñas intrusiones hipoabisales. La composición de las lavas varía de basalto a riolita, siendo el basalto menos común y la andesita la más abundante. Tomado de Herzig y Kimbrough (2014).

El registro de las primeras fases de construcción del arco de islas durante el Jurásico es poco claro pues tanto las rocas plutónicas, como las volcánicas asociadas están cartografiadas como rocas metamórficas sin hacer distinción en sus protolitos. En esta región, las rocas encajonantes están representadas por la Formación Santiago Peak expuesta a lo largo de 250 km, desde Riverside, California (EUA) hasta la ancestral Falla Agua Blanca en San Vicente, Baja California (Figura 2). Herzig y Kimbrough (2014) describen que el arco Santiago Peak es subaéreo y que evolucionó a lo largo del margen SW de Norteamérica en el Cretácico Temprano. Además, sugieren que el basamento del arco tenía afinidad oceánica, sin embargo, los datos isotópicos respaldan una asimilación cortical probablemente de detritos de la Formación Bedford Canyon del Triásico Tardío-Jurásico Medio o de rocas más antiguas.

Dentro del arco Santiago Peak, Todd et al. (2014) analizaron al complejo Ramona y lo describen como una estructura elíptica compuesta por seis suites plutónicas, que afloran en el este de San Diego, California, EUA. Las edades U-Pb de circones indican que los plutones más antiguos son de ca. 115 Ma, mientras que los plutones más jóvenes y externos arrojan edades de ca. 101 Ma. Tal cronología muestra que este complejo se construyó a partir de una serie de pulsos que se extendieron a lo largo de 14 Ma. Los autores interpretaron que el complejo Ramona intrusionó en la zona de sutura formada por la colisión del arco Santiago Peak y el margen continental y que su emplazamiento ocurrió en la zona de transición entre la corteza media y superior. Posiblemente, este complejo comparte una historia similar a la ocurrida en el Valle de Ojos Negros.

1.3 Justificación

Un buen ejemplo de magmatismo batolítico en el sector norte del CBP en el territorio mexicano, se encuentra en el Valle de Ojos Negros, donde afloran plutones pertenecientes al CBP y se exponen ampliamente las rocas encajonantes pertenecientes a la Formación Santiago Peak, cuya localidad tipo está en las montañas Santa Ana, al oriente de San Diego, California (Herzig y Kimbrough, 2014).

El valle ha sido de interés por ser una zona tectónicamente activa (Frez et al., 2000) y, además por ser una región donde cuerpos del Enjambre de Diques San Marcos (Farquharson, 2004) son claramente distinguibles aún con imágenes de satélite. Este enjambre de diques intrusionó principalmente a los plutones graníticos, de los cuales, a pesar de ser penecontemporáneos (Almanza-García, 2023), carecen de estudios petrológicos detallados.

En la distribución de terrenos prebatolíticos de la Figura 2, el área de estudio se localiza en los límites entre el Complejo Bedford Canyon del Triásico Tardío- Jurásico Medio y la Formación Santiago Peak de ca. 128 en la región de San Diego, California (Herzig y Kimbrough, 2014), prácticamente contemporánea con las edades de los cuerpos del Enjambre de Diques San Marcos ca. 124 y 120 Ma (Almanza-García, 2023 y Böhnel et al., 2002) respectivamente y plutones asociados de ca. 126 Ma (Almanza-García, 2023) reportados en la literatura. Se plantea que la sucesión de eventos volcánicos, plutónicos y su deformación, pueden explicarse como una zona de deformación y magmatismo contemporáneo.

A partir de los mapas geológicos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1976a, 1976b, 1977a y 1977b), el mapa elaborado por Gastil et. al (1975), así como de la observación de lineamientos curvilíneos en imágenes satelitales, se distinguen cuatro plutones discretos en los bordes del valle, lo que permite formular las siguientes preguntas: a) ¿Cuál es la sucesión de eventos de emplazamiento de los plutones que circundan el Valle de Ojos Negros?, b) ¿Cuál es la pertenencia de las rocas ígneas a ambientes característicos de arcos de islas o de corteza continental desde un punto de vista geoquímico?, c) ¿Cuáles son las relaciones geométricas a profundidad de las rocas plutónicas respecto a las encajonantes volcánicas y sedimentarias a partir del modelado de datos magnéticos y correlación con los rasgos estructurales en la superficie? Para poder dar respuesta a esas interrogantes se efectuó el análisis petrológico y estructural de los grupos de plutones y diques, así como de las rocas encajonantes.

1.4 Hipótesis

Los plutones Cretácicos del Valle de Ojos Negros representan diferentes pulsos magmáticos que intrusionan al segmento sur del arco Santiago Peak, cuyos depósitos sobreyacen a la secuencia sedimentaria de la Formación Bedford Canyon del Triásico Tardío- Jurásico Medio.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Interpretar la historia y el ambiente de emplazamiento de los plutones que circundan el Valle de Ojos Negros, así como su geometría a profundidad.

1.5.2 Objetivos específicos

- Realizar una cartografía geológica para definir las relaciones de campo entre las unidades intrusivas, y entre las rocas encajonantes prebatolíticas.
- Hacer un análisis petrológico de las rocas ígneas para proponer un ambiente tectónico de formación.
- Efectuar una interpretación del modelado 3D de los datos aeromagnéticos para definir la geometría a profundidad de los cuerpos intrusivos.
- Integrar la historia magmática cretácica del Valle de Ojos Negros.

1.6 Metodología

Para la realización de los objetivos y metas fue necesario desarrollar una metodología que incluyeron la toma de datos estructurales y muestreo de rocas representativas de las unidades litológicas del área de estudio, así como su análisis petrográfico, estructural, geoquímico y aereomagnético. A continuación, se describe cada una de ellas.

1.6.1 Prospección geológica

A partir de los mapas geológicos de Gastil et al. (1975) y de cuatro cartas geológicas del área de estudio (H11B12, H11B13, I11D83, I11D84) tomadas del INEGI (1976a; 1976b; 1977a; 1977b, respectivamente), se reconocieron una serie de plutones que se encuentran en la porción occidental del CBP y cuya litología varía desde gabro hasta granitoides félsicos. Siguiendo el criterio de asociar los lineamientos curvilíneos con estructuras plutónicas, a partir de la imagen satelital (Google Earth) se identificaron cuerpos de aspecto circular asociados con intrusivos. En el NW de la imagen de la Figura 3 resalta un plutón de dimensiones batolíticas (más de 16 km de diámetro) que se extiende hasta el valle de Guadalupe, denominado plutón Guadalupe (1.PG).

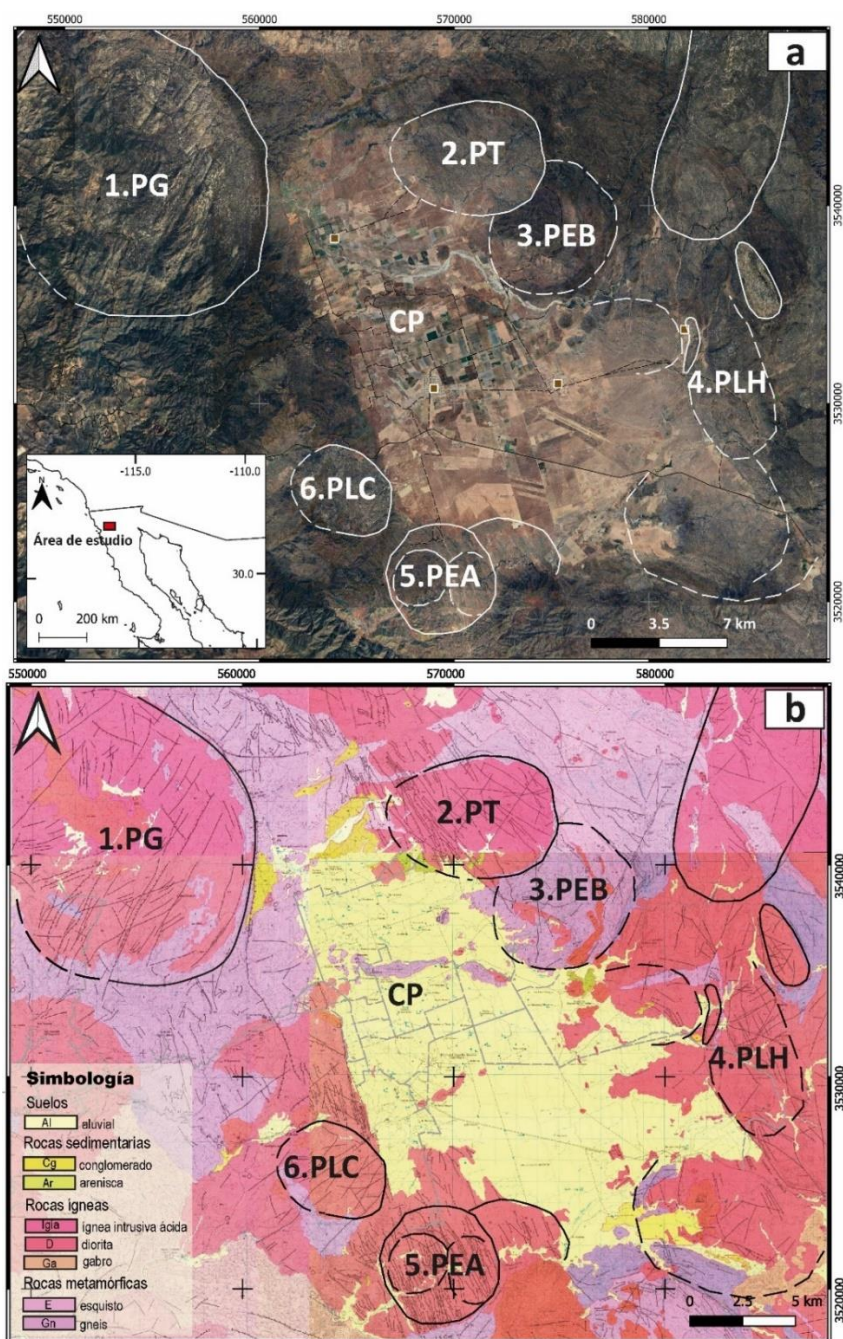


Figura 3. a) Vista satelital del Valle de Ojos Negros. b) Mapa geológico del área de estudio elaborado a partir de las cartas geológicas publicadas por el INEGI, H11B12 (INEGI, 1976a), H11B13 (INEGI, 1976b), I11D83 (INEGI, 1977a), I11D84 (INEGI, 1977b). La distribución de los cuerpos identificados se enumera junto con los nombres propuestos para cada plutón: 1) Plutón Guadalupe (PG), 2) Plutón Timoteo (PT), 3) Plutón El Barbón (PEB), 4) Plutón La Huerta (PLH), 5) Plutón El Alamar (PEA) y 6) Plutón Los Cascabeles (PLC). En el interior del valle se encuentra el cerro Portezuelo (CP) con orientación E-W. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

En el NNE del Valle de Ojos Negros son particularmente notables las estructuras del Enjambre de Diques San Marcos, los cuales cortan con un rumbo persistente NW-SE a cuerpos intrusivos félsicos (Igia, Figura 3b). El intrusivo más notable es un cuerpo de aspecto circular de 6 km de diámetro que contrasta con las

rocas encajonantes más oscuras que en este trabajo se denomina plutón Timoteo (2. PT en Figura 3). Este plutón intrusión en su porción sur a otra estructura semicircular desarrollada en rocas encajonantes, la cual podría asociarse a un plutón subyacente anidado, aquí se denomina plutón El Barbón (3. PEB en Figura 3).

Hacia el oriente del valle, se identificaron varios cuerpos plutónicos félsicos que se agruparon bajo el nombre de plutón La Huerta (4. PLH en Figura 3), el cual está formado por varios *stocks* (plutones más pequeños que los batolitos, generalmente menores de 100 km²; Best, 2003) que también están cortados por el Enjambre de Diques San Marcos. La porción sur del valle está dominada por rocas metamórficas según los mapas publicados y, en la parte SW, destacan dos plutones félsicos que en este trabajo denominamos El Alamar y Los Cascabeles (5. PEA y 6. PLC, en la Figura 3). En el interior del valle, resalta el cerro Portezuelo, (CP, en la Figura 3) cuya orientación E-W contrasta notablemente con respecto a las estructuras regionales orientadas NW-SE. En los mapas geológicos a los que nos hemos referido, la litología de este conjunto de cerros se describe como metamórfica y es importante destacar que en la parte W del cerro principal existen prospectos mineros de talco, según investigaciones del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2001a; 2001b), por lo que es probable que deriven de rocas ultramáficas.

1.6.2 Trabajo de campo

El trabajo de campo se llevó a cabo en seis campañas en septiembre, octubre y diciembre de 2023 y febrero, marzo y junio de 2024. Los sitios trabajados fueron identificados en la prospección de imágenes satelitales y mapas geológicos y visitados según su accesibilidad. Se midieron foliaciones metamórficas y magmáticas y lineaciones en zonas con cizalla con una brújula Brunton, siguiendo el criterio de la mano derecha. Se colectaron un total de 50 muestras (Anexo A), de las cuales son 18 plutónicas, 17 encajonantes y 15 de diques que intrusionan tanto a las rocas plutónicas como sus encajonantes. En cada sitio de muestreo se tomaron 10 mediciones de susceptibilidad magnética con un susceptibilímetro portátil Terraplus KT-10R Plus v2, de las que se obtuvo un promedio. Toda la información se georreferenció con un GPS portátil Garmin eTrex Vista® Cx.

1.6.3 Análisis estructural

El análisis estructural se realizó a partir de datos de foliaciones metamórficas e ígneas, así como lineaciones

en planos de cizalla. Para su interpretación, los datos de cada sitio se graficaron en estereogramas con el software Stereonet versión 10.4.2 (Cardozo y Allmendinger, 2013). Posteriormente se realizó un análisis estadístico de los polos de foliaciones para obtener la orientación de los planos promedio de cada sitio. En las rocas metamórficas dicho plano permite inferir la dirección de esfuerzos durante el metamorfismo, mientras que en las rocas ígneas los planos se asocian con la dirección de flujo de magma.

Se utilizó el programa FaultKin Win versión 8.3 (Allmendinger, 2016) para el análisis cinemático de zonas de cizalla en la región del plutón El Barbón y Los Cascabeles, correspondiente a una porción de los sistemas de fallas activos San Miguel y Ojos Negros de tipo lateral derecho.

1.6.4 Petrografía

Con las muestras de roca se elaboraron láminas delgadas siguiendo los procedimientos del Departamento de Geología del CICESE. Las láminas delgadas fueron analizadas con un microscopio petrográfico OLYMPUS BX60 describiendo las características texturales y su mineralogía detalladamente.

Para mayor exactitud, fue necesario realizar la técnica del conteo mineral. La cual consiste en determinar la proporción (o porcentaje) mineral en una roca, a partir del número de veces que un mineral cae sobre la intersección de una cuadrícula. En este sentido, para las rocas intrusivas se realizó un conteo de 363 puntos sobre una rejilla para obtener su moda. Para facilitar la identificación del feldespato potásico se tiñeron las galletas con cobaltinitrito de sodio, el cual adquiere un color amarillento. Con la composición modal se clasificaron las rocas en el diagrama QAP para rocas ígneas intrusivas (Le Maitre et al., 2002).

1.6.5 Análisis geoquímico

Se prepararon 21 muestras representativas de rocas ígneas para llevar a cabo análisis geoquímicos (Tabla 1) en el laboratorio de preparación de muestras y separación de minerales del Departamento de Geología del CICESE. El trabajo inició con la limpieza de las rocas removiendo las capas superficiales intemperizadas con un martillo geológico. Posteriormente, las muestras fueron trituradas con una prensa hidráulica Montequipo® hasta obtener esquirlas menores a 1 cm. Se obtuvieron dos alícuotas, una se guardó como testigo y la otra fue cuarteada.

Tabla 1. Muestras analizadas por geoquímica de roca total.

Localidad	Coordenadas		Muestra	Relación en campo	Plutón o cuerpo asociado	Clasificación de la roca
	Longitud	Latitud				
Ojos Negros	566656	3534768	2-IX-23	Encajonante	CEP	Metalava
Ojos Negros	572641	3534632	5-IX-23	Encajonante	CEP	Metabasita
Ojos Negros	567658	3534785	1-II-24	Encajonante	CEP	Metalava
Ojos Negros	565847	3535166	3-II-24	Encajonante	CEP	Metabasita
Ojos Negros	573485	3536833	6-X-23	<i>Sill</i>	PEB	Basalto
Ojos Negros	574626	3534747	2-X-23	Plutónica	PEB	Granito de dos micas
Ojos Negros	573984	3537347	8-X-23	Dique	PEB	Basalto de And-Lab
Ojos Negros	573984	3537347	9-X-23	Dique	PEB	Granito
Ojos Negros	574258	3537496	10-X-23	Plutónica	PEB	Granodiorita de dos micas
Ojos Negros	575460	3538024	3-XII-23	Plutónica	PEB	Granito de dos micas
Ojos Negros	575473	3538024	4-XII-23	Plutónica	PEB	Granito de dos micas
Ojos Negros	569459	3539776	9-III-24	Dique	PT	Dacita
Ojos Negros	567658	3534785	2-II-24	Dique	CEP	Granito
Ojos Negros	577393	3526498	1-III-24	Dique	PLH	Granodiorita de Bt
Ojos Negros	585324	3527683	4-III-24	Encajonante	PLH	Granodiorita de Bt
Ojos Negros	578021	3531624	7-III-24	Plutónica	PLH	Granito de dos micas
Ojos Negros	564744	3530335	6-II-24	Encajonante	PLC	Diorita de Hbl
Ojos Negros	564834	3531216	10-II-24	Dique	PLC	Tonalita de Bt
Ojos Negros	563898	3533245	12-II-24	Dique	PLC	Diorita
Ojos Negros	568856	3523160	14-III-24	Dique	PEA	Cuarzodiorita Hbl
Ojos Negros	569047	3523382	15-III-24	Plutónica	PEA	Granodiorita de Bt

Abreviaturas: **And:** Andesita, **Bt:** Biotita, **CEP:** cerro El Portezuelo, **Hbl:** Hornblenda, **Lab:** Labradorita, **PEA:** Plutón El Alamar, **PEB:** Plutón El Barbón, **PLC:** Plutón Los Cascabeles, **PLH:** Plutón La Huerta y **PT:** Plutón Timoteo. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

Un cuarto de la muestra triturada se colocó en un mortero de anillos de tungsteno con el fin de “autocontaminar” el mortero. Consecutivamente, se pulverizaron aproximadamente 100g de muestra del segundo y tercer cuartil. Por último, las muestras fueron envasadas y etiquetadas para su envío al laboratorio. El análisis geoquímico de elementos mayores y traza fueron realizados de manera comercial

en los laboratorios Actlabs en Ontario, Canadá. El tipo de análisis seleccionado fue “4LithoResearch”. Según la técnica reportada por el laboratorio, las muestras se preparan y analizan en un sistema por lotes, se mezclan con un fundente de metaborato de litio tetraborato de litio y se funden en un horno de inducción.

La masa fundida se vierte en una solución de ácido nítrico al 5% y se mezcla hasta disolverla. Los elementos mayores se analizaron mediante Espectrometría de Emisión Óptica con plasma acoplado por inducción (ICP-OES) y los elementos traza, incluyendo el grupo de tierras raras (REE), en un espectrómetro de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS). Los límites de detección reportados por el laboratorio se presentan en la Tabla 2. Los resultados del análisis geoquímico se presentan en el Anexo E, estos se agruparon por sitios y se muestran en diagramas de clasificación geoquímica elaborados con los programas IgPet win, versión 11 (Carr y Gazel, 2016) y GcDkit, versión 6.2.0 (Janoušek et al., 2016)

Tabla 2. Límites de detección de elementos mayores y elementos traza de los análisis “4LithoResearch” reportados por el laboratorio ActLabs de Ontario, Canadá.

Óxidos mayores	Límite de detección (% en peso)	Elemento traza	Límite de detección (ppm)	Elemento traza	Límite de detección (ppm)	Elemento traza	Límite de detección (ppm)
SiO ₂	0.010	Sc	1.000	Rb	1.000	Tb	0.010
Al ₂ O ₃	0.010	Be	1.000	Nb	0.200	Dy	0.010
Fe ₂ O ₃	0.010	V	5.000	Mo	2.000	Ho	0.010
MnO	0.005	Ba	2.000	Ag	0.500	Er	0.010
MgO	0.010	Sr	2.000	In	0.100	Tm	0.005
CaO	0.010	Y	0.500	Sn	1.000	Yb	0.010
Na ₂ O	0.010	Zr	1.000	Sb	0.200	Lu	0.002
K ₂ O	0.100	Cr	20.000	Cs	0.100	Hf	0.100
TiO ₂	0.001	Co	1.000	La	0.050	Ta	0.100
P ₂ O ₅	0.010	Ni	20.000	Ce	0.050	W	0.500
-	-	Cu	10.000	Pr	0.010	Tl	0.050
-	-	Zn	30.000	Nd	0.050	Pb	5.000
-	-	Ga	1.000	Sm	0.010	Bi	0.100
-	-	Ge	0.500	Eu	0.005	U	0.010
		As	5.000	Gd	0.010	Th	0.050

1.6.6 Análisis aeromagnético

Para inferir las estructuras a profundidad según las propiedades magnéticas de las unidades litológicas se realizó un análisis aeromagnético, el cual consistió en el procesamiento, análisis e interpretación de datos aeromagnéticos del mapa de Campo Magnético Total del SGM (SGM, 2002a; 2002b) de un área de aproximadamente 1412.23 km². Los valores de intensidad del campo magnético reportados por el SGM (2002a; 2002b) fueron adquiridos a una altura de vuelo de 300 m en líneas separadas aproximadamente cada 1,000 m (cartas magnéticas H11-B12, H11-B13). Estos se graficaron con el software Oasis aplicando el método de interpolación *kriging* para obtener el mapa de anomalías magnéticas. Para vincular las anomalías magnéticas con las estructuras y cuerpos geológicos, se aplicó el filtro de la reducción al polo al mapa de anomalías magnéticas con ayuda del software Oasis Montaj de Geosoft versión 8.3.3 y se graficó usando el mismo método de interpolación.

El SGM reportó que los datos magnéticos se corrigieron por variación diurna y se les restó el IGRF 1995 (Campo Geomagnético de Referencia Internacional) tomando en cuenta la posición geográfica del área, las fechas de levantamiento y la altura del vuelo. Para el área de estudio el SGM reportó los siguientes datos: Intensidad total para el área 49012 nT, inclinación de 57° 36' y declinación 14° 01'.

Adicionalmente, se generó un modelo tridimensional con el algoritmo de Carrillo-López et al. (2022), quienes señalan que el modelo tridimensional básico está formado por prismas rectangulares homogéneos caracterizados por su densidad y magnetización, basado en la fórmula de Bhattacharyya (1964) para calcular la respuesta magnética de un prisma rectangular con una magnetización inducida constante. Por último, se extrajeron secciones transversales del modelo 3D que cortan los plutones del área de interés, a fin de observar la relación y geometría entre ellos y dar una interpretación apoyada con datos estructurales medidos en la superficie.

Capítulo 2. Cinturón Batolítico Peninsular

El Cinturón Batolítico Peninsular (CBP) comprende una serie de batolitos Cretácicos que se extienden por más de 800 km desde el suroeste de Estados Unidos, hasta la región central de la península de Baja California (33° a 28° latitud N) (Schmidt et al., 2014) (Figura 4).

Este cinturón ha sido ampliamente estudiado y su formación representa un parteaguas en la historia geológica de la península, de manera que se hace referencia a conjuntos litoestratigráficos prebatolíticos, batolíticos y post-batolíticos para describir la evolución geológica de la península. Criterios tanto petrológicos como geofísicos definen al CBP como un cinturón composicionalmente zonado a partir de su eje longitudinal como se muestra en las Figuras 4 y 5 que grosso modo coincide con la línea magnetita-ilmenita trazada por Gastil et al. (1990). Los criterios petrológicos implican información litológica, geoquímica, procesos metamórficos, magmáticos e historias de enfriamiento, los cuales se enriquecen con información geofísica que ayuda a definir la estructura profunda de la corteza (Gastil et al., 1990; Schmidt et al., 2002; Wetmore et al., 2003 y Langenheim et al., 2014).

A continuación, se detallan las características geológicas y geofísicas más importantes del Cinturón Batolítico Peninsular que apoyan esta división.

2.1 Características geológicas del Cinturón Batolítico Peninsular

Los modelos sobre la evolución tectónica del Cinturón Batolítico Peninsular se basan en gran medida en las variaciones petrológicas de oeste a este. Schmidt et al. (2002) plantearon en un primer modelo un sistema de subducción continuo en donde convergen las litósferas de arco del Triásico en el W y continental hacia el E y cuya zona de sutura está intrusionada por plutones del Cretácico tardío. Otro modelo propone la formación de una cuenca *back-arc* que se cierra durante la acreción tectónica al margen de Norteamérica por el colapso de la cuenca. El tercer modelo, propone que la zona oeste se desarrolló como un arco de islas exótico durante el Jurásico-Cretácico Temprano, posteriormente colisionó y se suturó al margen de Norteamérica a finales del Cretácico Temprano.

Los plutones del sector occidental se caracterizan por tener diámetros menores a 10 km, su litología es principalmente máfica y geoquímicamente se consideran primitivos. En la zona oriental los plutones son

de mayor tamaño (hasta 40 km de diámetro), mayoritariamente félsicos, geoquímicamente evolucionados y sus rocas encajonantes metamórficas contienen sillimanita y pueden incluir migmatitas (Hildebrand y Whalen, 2014). Este marco geológico se interpreta como resultado de la acreción de la zona occidental formada en el basamento oceánico contra el margen continental de Norteamérica a finales del Cretácico Temprano (Schmidt et al., 2002).

De norte a sur, el segmento de arco Santiago Peak se desarrolla como un arco de margen continental. Las rocas volcánicas de este arco sobreyacen al complejo Bedford Canyon del Triásico Tardío-Jurásico Medio. Hacia el sur de la Falla Agua Blanca el arco Alisitos se forma sobre una litósfera oceánica que está separada del margen continental norteamericano (Alsleben et al., 2014). Las rocas plutónicas de ambos arcos se emplazaron durante el Cretácico (Figura 4). En este sentido, la afinidad del basamento, oceánico en el oeste y continental en el este influyen en la composición de los plutones lo largo del CBP.

Además de la línea magnetita-ilmenita definida a partir de prospecciones aeromagnéticas y mediciones de susceptibilidad magnética de afloramientos (Gastil et al., 1990), Walawender et al. (1990) observaron que los granitoides del oeste tienden a ser de tipo I, mientras que los del este tienen más afinidades con granitos de tipo S. De acuerdo con lo anterior, Gastil et al. (1990) hicieron la generalización en la que la zona occidental describe a granitoides de alrededor de 100 Ma de la serie de la magnetita, compuesta por rocas metaluminosas (granitoides tipo I). La zona anterior se diferencia de la zona oriental definida como de la serie de la ilmenita, la cual es mayoritariamente peraluminosa y típicamente más joven que 100 Ma.

Con base en la similitud litológica y geoquímica de los plutones tipo S de la región oriental, Walawender et al. (1990) los nombra informalmente como plutones como tipo La Posta (Figura 4b) los cuales fueron emplazados principalmente entre 98 y 92 Ma (Kimbrough et al., 2015). El emplazamiento de estos plutones ocurrió después de la colisión del arco de islas y algunos fueron emplazados en una zona de sutura (Walawender et al., 1990).

En contraste, los plutones de la zona occidental, los cuales son predominantemente de tipo I, se forman entre 130 y 98 Ma (Figura 4b), se caracterizan por la presencia de gabro y por la abundancia de tonalita.

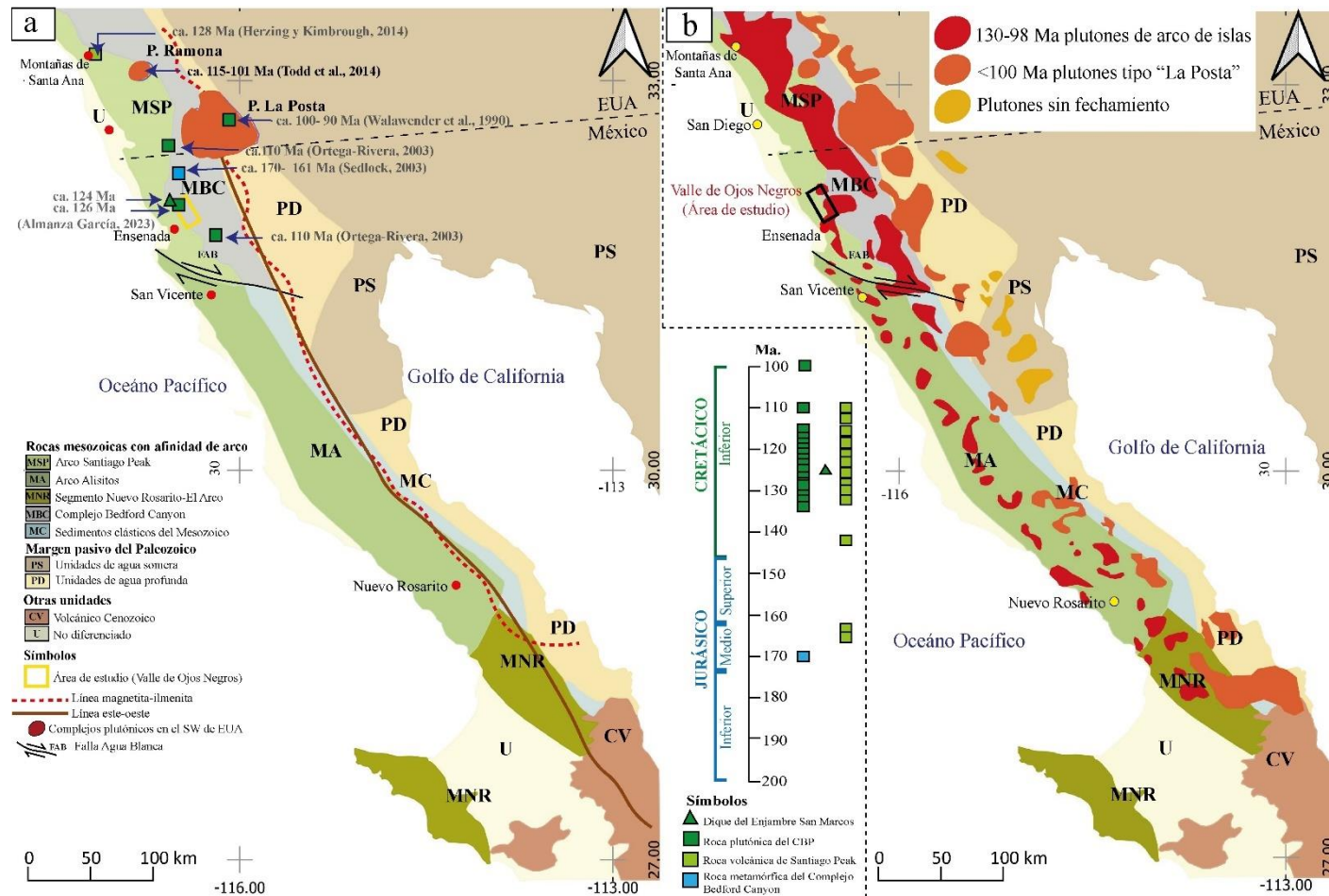


Figura 4. a) Provincias tectonoestratigráficas prebatolíticas delimitadas por sus afinidades litológicas y geocronológicas (Modificado de Contreras-López et al., 2021). La línea continua divide las rocas plutónicas máficas magnéticas del oeste y las rocas plutónicas félsicas del este (Langenheim et al., 2014); la línea discontinua corresponde a la línea magnetita-ilmenita de Gastil et al. (1990). En la porción norte el CBP en el SW de EUA se indican los complejos plutónicos La Posta (P. La Posta; Walawender et al., 1990) y el complejo Ramona (P. Ramona; Todd et al., 2014). El rectángulo amarillo al oriente de Ensenada marca el área de estudio: el Valle de Ojos Negros. Las edades U-Pb en círculo corresponden con: rocas metamórficas prebatolíticas (Sedlock, 2003), plutónicas (Walawender et al., 1990; Ortega-Rivera, 2003; Todd et al., 2014; Almanza-García, 2023), Formación Santiago Peak (Herzig y Kimbrough, 2014) y del Enjambre de Diques San Marcos (Almanza-García, 2023). b) Conjunto de plutones asociados al Cinturón Batolítico Peninsular, en color naranja se muestran los plutones emplazados en una zona de sutura, denominados por Gastil et al. 1990 como plutones tipo La Posta, asociados con la serie ilmenita, mientras que en color rojo se exponen los plutones asociados al arco de islas Alisitos-Santiago Peak desarrollados entre 130-98 Ma (Modificado de Hildebrand y Whalen, 2014). **Coordenadas:** WGS 84.

De acuerdo con Contreras-López et al. (2021) las rocas plutónicas occidentales entre el sur de California, hasta la falla ancestral Agua Blanca, cerca de San Vicente, tienen edades de cristalización U-Pb en circón de 126 a 98 Ma que son concordantes con las edades de las rocas volcánicas de Santiago Peak de 128 a 110 Ma (Figura 4a; Walawender et al., 1990; Ortega-Rivera, 2003; Herzig y Kimbrough, 2014; Todd et al., 2014) Hacia el sur de la Falla Agua Blanca, el CBP en su porción occidental definen al arco insular Alisitos. Desde esa frontera tectónica hacia el sur, las edades de cristalización U-Pb en circón de las rocas volcánicas, volcaniclasticas y plutónicas definen un rango de actividad magmática continua entre 133 y 90 Ma (Contreras-López et al., 2021). En el extremo sur del CBP (Nuevo Rosarito-El Arco-Península de Vizcaíno) la actividad magmática es continua desde el Jurásico hasta el Cretácico entre 166 a 140 Ma (Contreras-López et al., 2021).

2.2 Características geofísicas del Cinturón Batolítico Peninsular

Desde el punto de vista geofísico, el Cinturón Batolítico Peninsular también muestra variaciones notables a lo largo de su eje. A partir de datos aeromagnéticos y gravimétricos que cubren a la península de Baja California, Langenheim et al. (2014) caracterizaron la estructura y espesor de la corteza peninsular. Estos autores interpretan que el marcado contraste entre la región magnética del oeste con respecto al débil magnetismo de la región del este (Figura 5) es causada por rocas ígneas o metaígneas principalmente ricas en magnetita. La región del este es deficiente en magnetita por lo que no son capaces de producir anomalías significativas.

Langenheim et al. (2014) hicieron referencia a la división geofísica en el CBP. La zona occidental se caracteriza por ser magnética, tener valores bajos de flujo de calor ($<60 \text{ mW/m}^2$) y alta velocidad sísmica ($> 6.25 \text{ km/s}$), asociada con una corteza ígnea máfica. Mientras que el segmento oriental es débilmente magnético, posee bajas velocidades sísmicas ($<6.25 \text{ km/s}$) acompañada de alto flujo de calor ($>60 \text{ mW/m}^2$) y sismicidad más activa, relacionada con una corteza metamórfica, con rocas ígneas de composición félsica y su cercanía con el sistema de fallas activas San Andrés-Golfo de California.

Por último, destacan que la parte magnética occidental del batolito se ha comportado como un bloque rígido durante gran parte de su historia, y que adicionalmente, se extiende hasta el sur de la península de Baja California por debajo de la cubierta volcánica cenozoica (Langenheim et al., 2014 y García-Abdeslem, 2014).

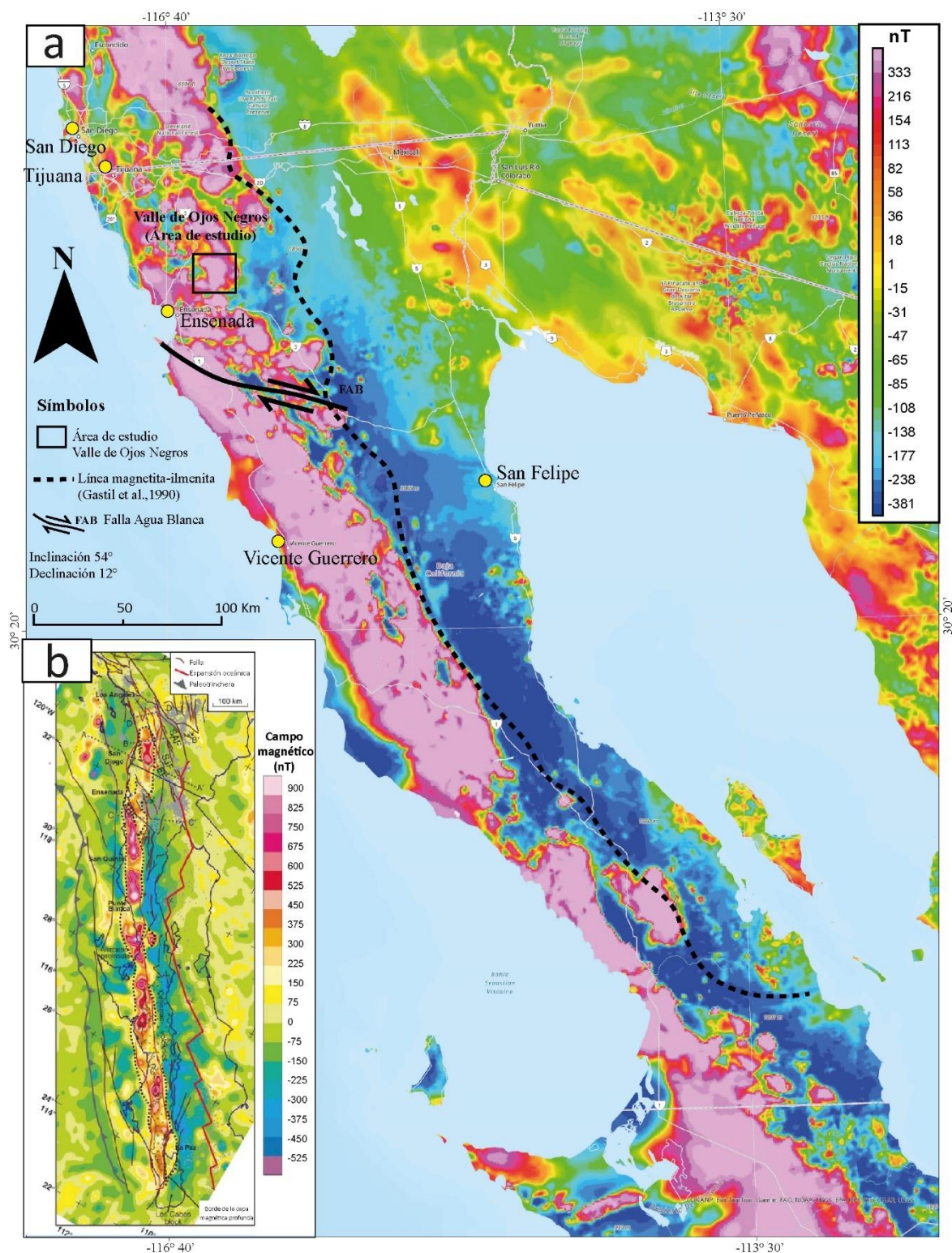


Figura 5. a) Mapa aeromagnético del Cinturón Batolítico Peninsular reducido al polo con el software Oasis Montaj, su inclinación y declinación fueron tomados de Langenheim et al. (2014), siendo 54° y 12° respectivamente, los datos utilizados fueron tomados de la base de datos digitales de anomalías magnéticas de Norteamérica del proyecto (NAMAG), la línea negra discontinua corresponde a la línea magnetita-ilmenita de Gastil et al. (1990). b) Mapa del campo magnético, cuyo borde es la línea punteada negra, mientras que la línea delgada roja indica la ubicación de los contrastes de magnetización dentro de la corteza superior y media. Tomado de Langenheim et al. (2014). **Coordenadas:** WGS 84.

Capítulo 3. Geología del área de estudio

3.1 Cartografía geológica y petrografía

A partir de una imagen satelital de un área de 868 km² ubicada entre los valles Guadalupe y Ojos Negros se interpretaron lineamientos curvilíneos producidos presumiblemente por el emplazamiento de plutones que, por sus dimensiones menores a 100 km² son clasificados como *stocks*, representados en la Figura 3 con líneas continuas donde sus límites están bien definidos y discontinuas donde el margen es inferido.

Se discriminaron cuatro estructuras asociadas con plutones discretos y un conjunto constituido por cuerpos plutónicos de aspecto anidado: los plutones Timoteo y El Barbón ubicados al noreste del área de estudio, al sureste el conjunto La Huerta y al oeste del valle se identificaron a los plutones Los Cascabeles y El Alamar, respectivamente (Figura 6). La parte sur del plutón Timoteo está constituida por rocas metamórficas principalmente de origen sedimentario, en las que se desarrollan estructuras semicirculares que se infiere que se deben a la presencia de un plutón relativamente cercano a la superficie el cual, en este trabajo, se denominó plutón El Barbón.

En la zona de La Huerta, un conjunto de plutones en arreglo anidado tienen diámetros variables desde 4 hasta 7 km. Las relaciones entre ellos guardan una geometría compleja que puede deberse a diferencias en la edad de emplazamiento de las distintas estructuras, así como a su posición en el contexto regional, pues en esta porción del CBP los plutones comparten características de los intrusivos de la zona W (ricos en magnetita), así como de los orientales, que se consideran ricos en ilmenita. En esta región, además de su magnetismo bajo o nulo, los plutones orientales “ricos en ilmenita” pueden definirse mineralógicamente por la presencia de muscovita y biotita. Para fines descriptivos, a este conjunto complejo de plutones se les denominó La Huerta.

Hacia el interior del Valle de Ojos Negros y occidente de éste, las rocas intrusionadas por los *stocks* están formadas por sucesiones metamorizadas de lavas y sedimentos finos. El cuerpo más grande, de más de 30 km², es el plutón Guadalupe, cuyo límite norte es el valle homónimo. Hacia el oriente, prácticamente alcanza la localidad de Real del Castillo Viejo, en donde se observaron derrames de brechas andesíticas metamorizadas.

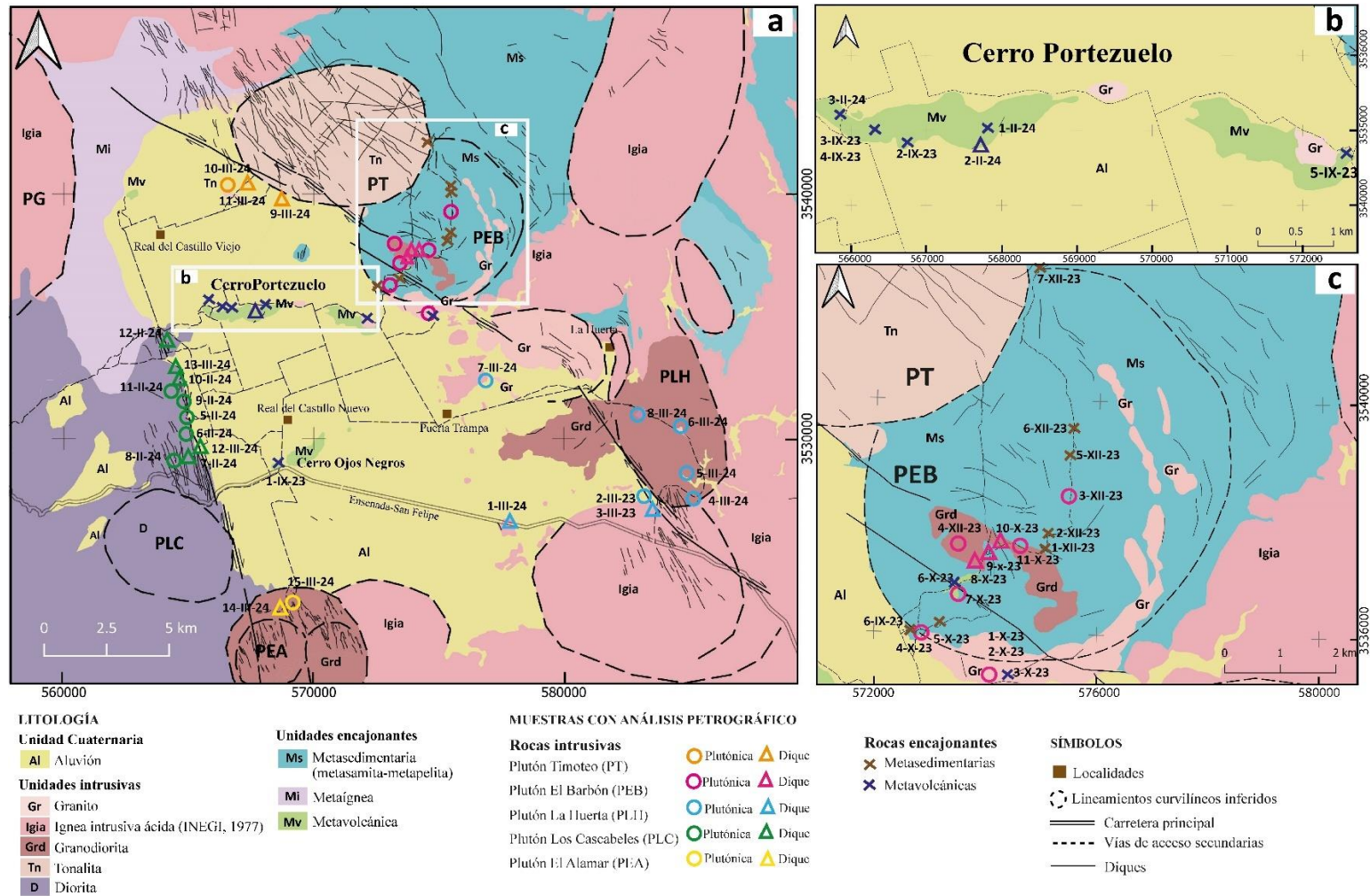


Figura 6. a) Mapa geológico del área de estudio y distribución de muestras analizadas petrográficamente. Los plutones Timoteo, La Huerta, Los Cascabeles y Alamar están delimitados de acuerdo con su composición y rasgos morfológicos (contornos continuos y discontinuos en color negro). b) Rocas encajonantes expuestas en el cerro El Portezuelo relacionadas con la Formación Santiago Peak. c) Rocas encajonantes metasedimentarias asociadas con el Complejo Bedford Canyon, las rocas intrusivas hacen referencia a las rocas plutónicas y diques de diferentes composiciones. Los colores litológicos fueron tomados de Gastil et al. (1975) y la base cartográfica fue tomada de los mapas geológicos de las cartas H11B12, H11B13, I11D83 y I11D84 del INEGI (1976a; 1976b; 1977a; 1977b) y del mapa de reconocimiento de Gastil et al. (1975). Abreviaturas: **PEA:** Plutón El Alamar, **PEB:** Plutón El Barbón, **PG:** Plutón Guadalupe, **PLC:** Plutón Los Cascabeles, **PLH:** Plutón La Huerta, **PT:** Plutón Timoteo. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

Este plutón no es motivo de estudio en este trabajo, pero es importante resaltar que una de sus características morfológicas es que está atravesado por lineamientos rectilíneos notablemente paralelos a las estructuras de cizalla que se observan en el Libramiento Ensenada donde está ampliamente expuesta la Formación Santiago Peak (Ledesma-Aguilar, 2018). Además, es importante notar que en los mapas del INEGI (1976a; 1976b; 1977a; 1977b) y el de Gastil et al. (1975) este cuerpo está aparentemente zonado, contiene gabro y coincide con altos magnéticos. Hacia el sur de este plutón en el borde del Valle de Ojos Negros, se encuentra el plutón Los Cascabeles cuyo diámetro es de 5 km y también se caracteriza por ubicarse en una zona de altos magnéticos. En la esquina SW del Valle de Ojos Negros se reconoce el plutón El Alamar, en el cual se identifican por lo menos, dos estructuras circulares que podrían asociarse con pulsos discretos.

En muchos sectores del interior del Valle de Ojos Negros, principalmente en la margen oriental, se observan diques orientados NW-SE del Enjambre de Diques San Marcos, así como rocas volcánicas de la Formación Santiago Peak en la parte norte y sur, de donde se infiere que el espesor de sedimentos de la cuenca es pequeño. Según Antonio-Carpio (2009), los reportes de pozos agrícolas dan cuenta de rellenos sedimentarios de aproximadamente 120 m de espesor. Los afloramientos más extensos de rocas metavolcánicas se encuentran en el cerro El Portezuelo, el cual resalta notablemente por ser un cuerpo angosto y alargado que, junto con extensiones hacia el W y E (cerro El Barbón) forman un rasgo morfológico de 9 km de longitud. Este alineamiento es particularmente notable pues su orientación W-E es casi perpendicular a la orientación NNW del Valle de Ojos Negros y de sus márgenes estructurales.

En esta sección se hace una descripción de las rocas plutónicas y metamórficas encajonantes, tanto observaciones macroscópicas documentadas en el campo, como petrográficas en láminas delgadas.

3.1.1 Rocas encajonantes en el Valle de Ojos Negros

En este trabajo adoptamos el punto de vista de Sedlock (2003) en el sentido que las rocas prebatolíticas más antiguas corresponden a las sucesiones sedimentarias del Complejo Bedford Canyon, las cuales están sobreyacidas en discordancia por la secuencia volcánica de la Formación Santiago Peak. La descripción más detallada de esta formación, al oeste del Valle de Ojos Negros, corresponde a una sucesión expuesta a lo largo del Libramiento Ensenada descrita por Ledesma-Aguilar (2018). Este autor documentó una sucesión de rocas volcánicas efusivas y explosivas de composición principalmente andesítica y dacítica.

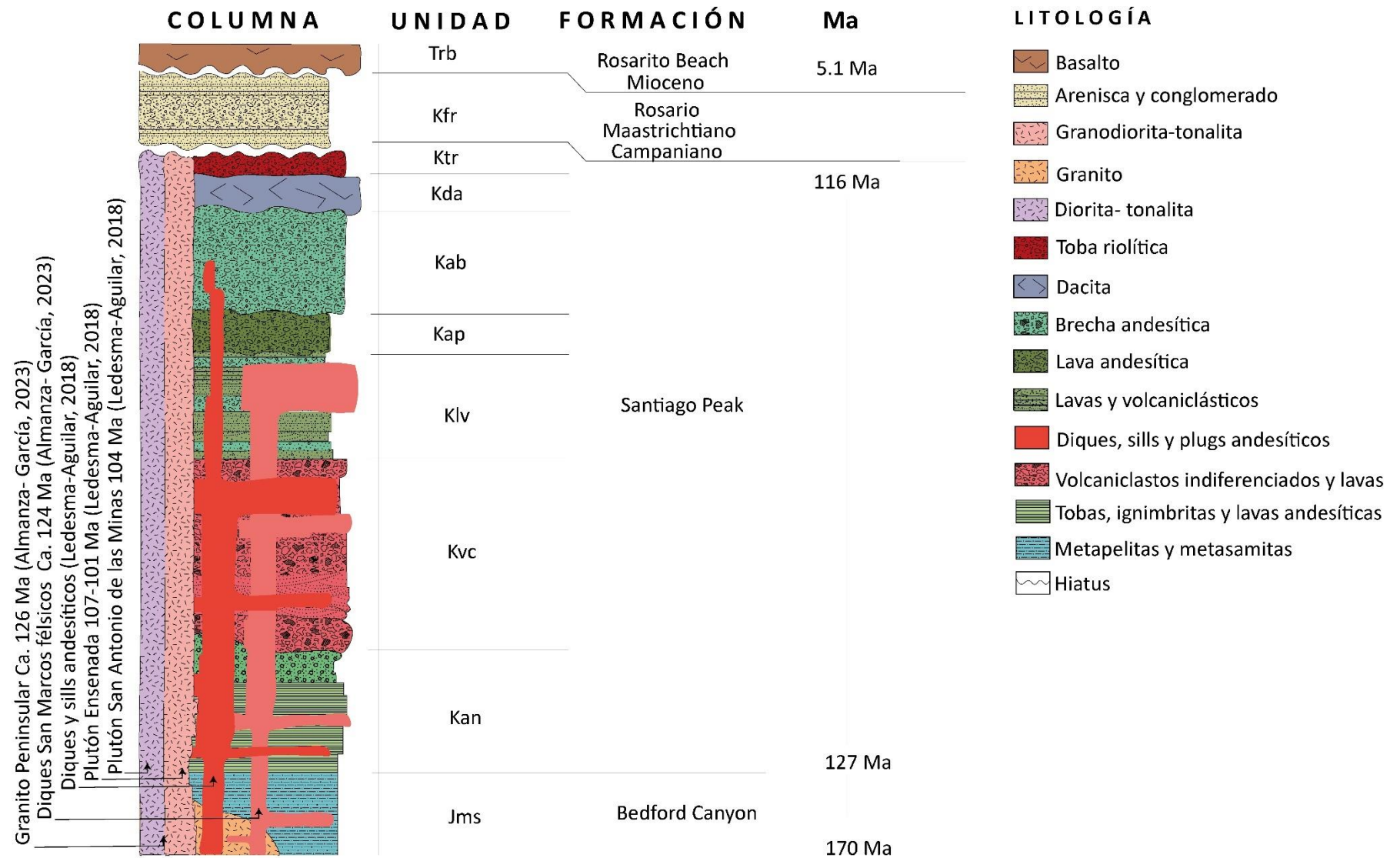


Figura 7. Columna estratigráfica compuesta de Santiago Peak y el Complejo Bedford Canyon que aflora en Ojos Negros. Tanto la base de columna estratigráfica como las edades de los plutones de Ensenada fueron tomados de Ledesma-Aguilar (2018), las edades del plutón granítico y diques que afloran en el cañón Agua Caliente (Jamatay) asociados al Enjambre de Diques de San Marcos, fueron tomadas de Almanza-García (2023).

En la Figura 7 se adoptó la columna estratigráfica de Ledesma-Aguilar (2018) de Ensenada, donde se muestran diques y *sills* andesíticos que pueden compararse con los cuerpos aflorantes en el cerro El Portezuelo y parte de los diques que intrusionan a las rocas metasedimentarias en la zona del plutón El Barbón. La base de la columna estratigráfica de la zona de estudio (Figura 7), se localiza en la porción oriental del Valle de Ojos Negros y parte del cerro El Portezuelo (Figuras 6 y 7). La descripción detallada de cada una de las unidades muestreadas se presenta en el Anexo B y en su síntesis petrográfica.

3.1.1.1 Rocas metasedimentarias

Al noreste del Valle Ojos Negros, rodeado al plutón El Barbón, afloran rocas metasedimentarias (Figura 6) que han sido asociadas al Complejo Bedford Canyon. En su localidad tipo, este complejo está dominado por secuencias *flysch*, alternancia de areniscas líticas y areniscas ricas en feldespato (de litoarenitas a arcosas; Wetmore et al., 2003) de proveniencia cratónica (Gastil, 1993).

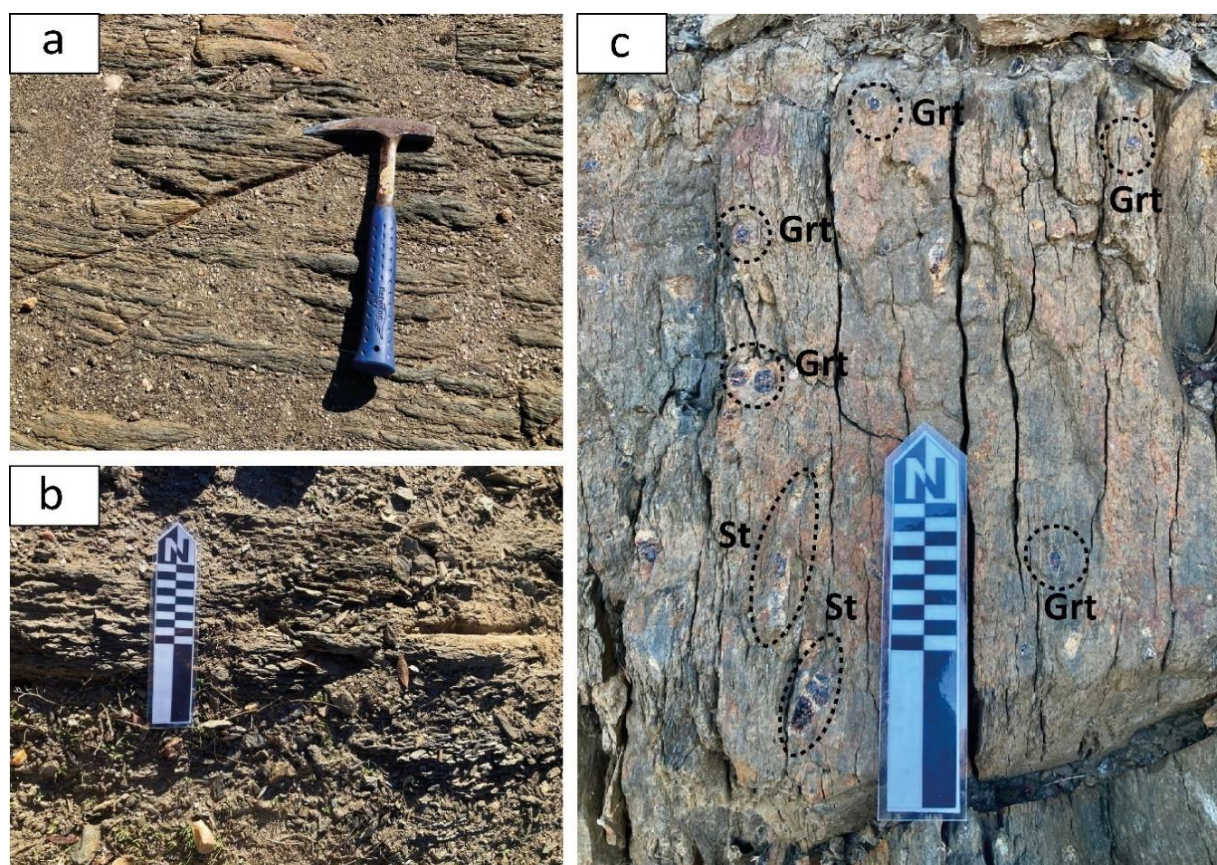


Figura 8. Afloramientos de rocas metasedimentarias encajonantes del plutón El Barbón. a) Afloramiento de metapelitas con foliación definida por biotita y muscovita. b) Afloramiento de metasamitas distinguido por su grano medio y foliación marcada por micas. c) Metapelite-samita de grano fino con visibles minerales de estaurolita y granate marcados con trazos discontinuos. Abreviaturas: **Grt:** Granate, **St:** Estaurolita.

Al igual que el plutón que lo intrusióna, esta sucesión metasedimentaria está cortada por los diques del Enjambre de San Marcos y *sills* afines a la Formación Santiago Peak. Hacia el SSE del plutón Timoteo se define un rasgo morfológico semicircular del plutón El Barbón (Figura 6c). Tanto el rasgo estructural como la abundancia de diques, apófisis y otros cuerpos elongados graníticos (los cuales se describen más adelante), indican la presencia de un plutón por debajo de estas rocas metasedimentarias de dimensiones y composición similar al plutón Timoteo.

Tabla 3. Síntesis petrográfica de las rocas metasedimentarias asociadas al Complejo Bedford Canyon.

Muestra	Coordenadas		Textura	Paragénesis	Facies metamórficas	Nombre de la roca	Protolito
	Latitud	Longitud					
6-IX-23	572712	3535887	Foliación definida por Bt + Ms	Qz+Bt+Ms+Pl+Kfs	Esquistos verdes inferior (zona de biotita) >300°C	Metasamita de Bt+Ms	Arcosa
5-X-23	573117	3536096	Foliación incipiente definida por Bt	Qz+Bt	Esquistos verdes inferior (zona de biotita) >300°C	Metasamita de Bt	Cuarzoarenita-subarcosa
1-XII-23	575036	3537411	Foliación definida por Bt	Qz+Bt+Ep	Esquistos verdes inferior (zona de biotita) >300°C	Metasamita de Bt	Grauvaca cuarzosa
2-XII-23	575084	3537545	Foliación definida por Bt	Qz+Bt+Ep+Ms+Grt+St	Facies de anfibolita inferior (zona de estaurolita) >550 °C	Metapelita-samita de Bt+Ms+Ep+Grt+St	Grauvaca
5-XII-23	575536	3539148	Foliación definida por Bt	Qz+Bt+Ep+Grt	Esquistos verdes superior (zona de granate) >450 °C	Metapelita-samita de Bt+Ep	Grauvaca
6-XII-23	575533	3539305	Foliación definida por Bt	Qz+Bt+Ep	Esquistos verdes superior (zona de granate) >450 °C	Metasamita de Bt	Arenisca de grano fino
7-XII-23	574847	3542210	Foliación definida por Ms	Qz+ Ms+Bt	Esquistos verdes, bajo grado (zona de biotita) >300 °C	Metasamita de Bt+Ms	Arenisca de grano fino

Abreviaturas: **Bt:** Biotita, **Ep:** Epidota, **Grt:** Granate, **Kfs:** Feldespato potásico, **Ms:** Muscovita, **Pl:** Plagioclase, **Qz:** Cuarzo, **Rt:** Rutilo, **St:** Estaurolita. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

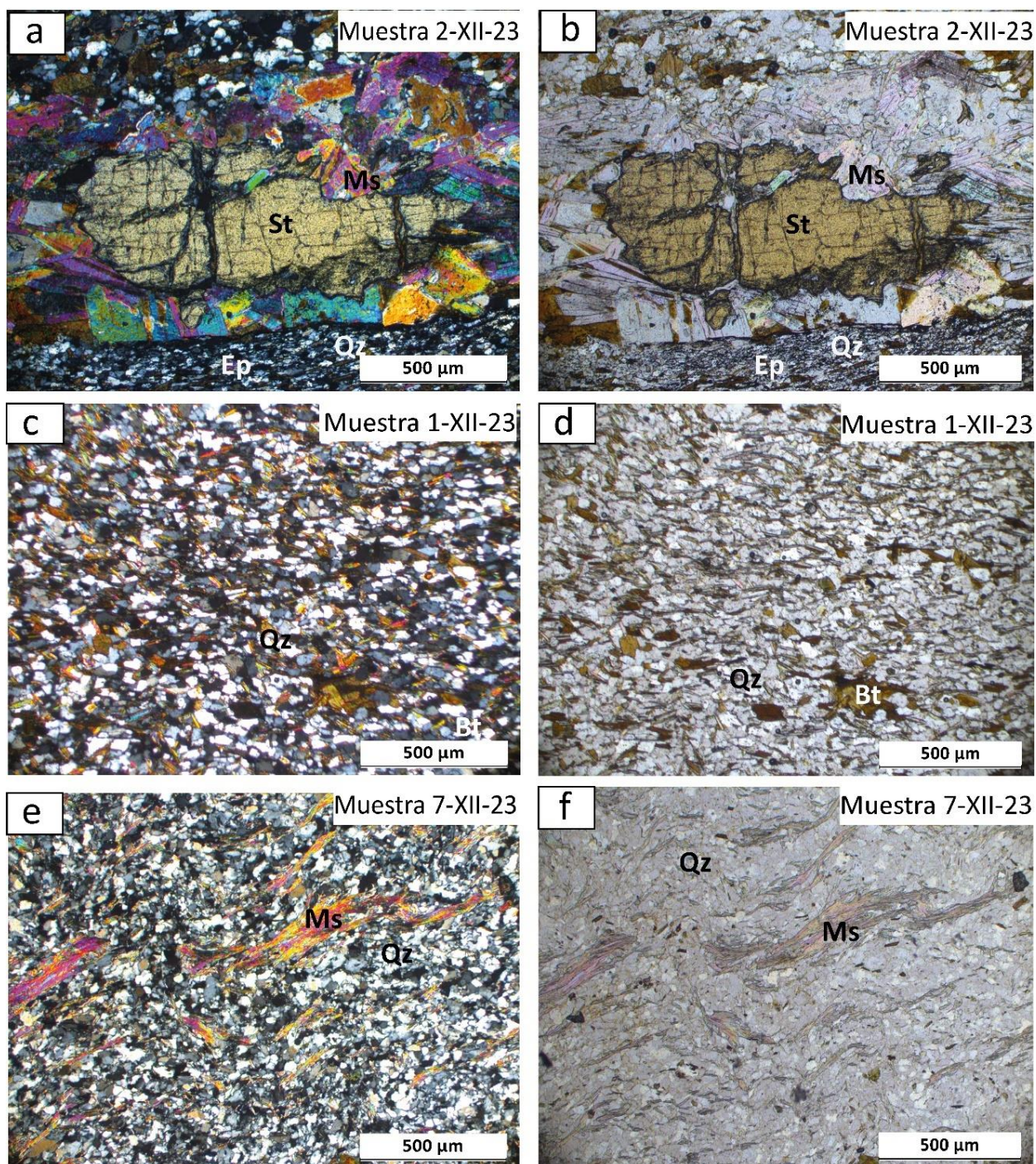


Figura 9. Microfotografías de láminas delgadas de rocas metasedimentarias del plutón El Barbón. a) y b) Muestra 2-XII-23 de esquistos de estaurolita rodeado por cristales de muscovita vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. c) y d) Muestra 1-XII-23 de metasomita con textura granoblástica y bandas de micas (muscovita y biotita) paralelas a la foliación vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente; e) y f) muestra 7-XII-23 de metasomita con textura lepidoblástica con clivaje de crenulación marcado por muscovita vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. Abreviaturas: **Bt:** Biotita, **Ep:** Epidota, **Ms:** Muscovita **Qz:** Cuarzo, **St:** Estaurolita.

En la sección muestreada (Figura 6c) se define una sucesión formada por metapelitas y metasamitas con foliación bien definida por biotita y muscovita. Son dominantes las facies de grano medio con respecto a

las de grano fino en toda la sucesión (Figura 8). El grado metamórfico varía desde esquistos verdes inferior $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zona de biotita) hasta facies de anfibolita inferior (zona de estaurolita, entre 550 y $600\text{ }^{\circ}\text{C}$; Figura 8c) (Tabla 3). Todas las mediciones de susceptibilidad magnética arrojan valores muy bajos, de hasta 0.07×10^{-3} SI.

En lámina delgada, se observa porfidoblastos de estaurolita y de granate (Figura 9a-b). Mayoritariamente desarrollan foliación bien definida S_1 paralela a los cristales de biotita y muscovita (Figura 9c-d; ver muestras 6-IX-23, 1-XII-23, 6-XII-23 en Anexo B). En la muestra 5-X-23 (Anexo B) se observa una foliación débil, mientras que la muestra 7-XII-23 desarrolla clivaje de crenulación S_2 formado por un segundo evento de deformación D_2 a partir de una foliación preexistente (Figuras 9e, f, 10 y Anexo B).

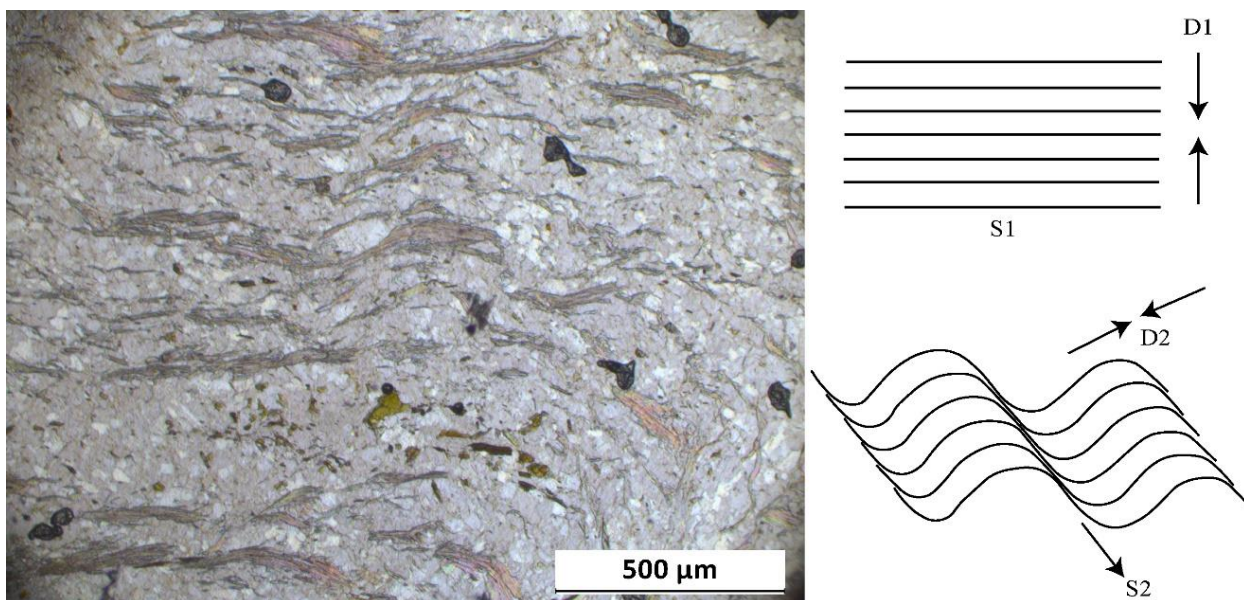


Figura 10. Representación esquemática del desarrollo de clivaje de crenulación en la muestra 7-XII-23 a partir de una foliación preexistente S_1 (D_1) y una segunda fase de deformación D_2 . Figura modificada de Winter (2014).

Algunas muestras exhiben planos de cizalla, donde se alojan cristales de biotita y escasos óxidos de hierro (muestra 5-XII-23 del Anexo B). La muestra 1-XII-23 marca el inicio de las facies de esquistos verdes superior con cristales de granate observados en lámina delgada. El grado metamórfico más alto en la sucesión cartografiada se observa en la muestra 2-XII-23 (Anexo B), la cual contiene granates rotados rodeados por biotita que muestran una deformación sincinemática, donde los blastos giraron a medida que crecían e incorporaron progresivamente la foliación externa (Figura 11).

Esta muestra contiene cristales de estaurolita rodeados por muscovita en una matriz de grano medio a

fino (Figura 11). La asociación mineral $Qz+Bt+Ep+Ms+Grt+St$ define la facies de anfibolita inferior (zona de estaurolita) formada a partir de 550°C y 6 kbar (Best,2003).

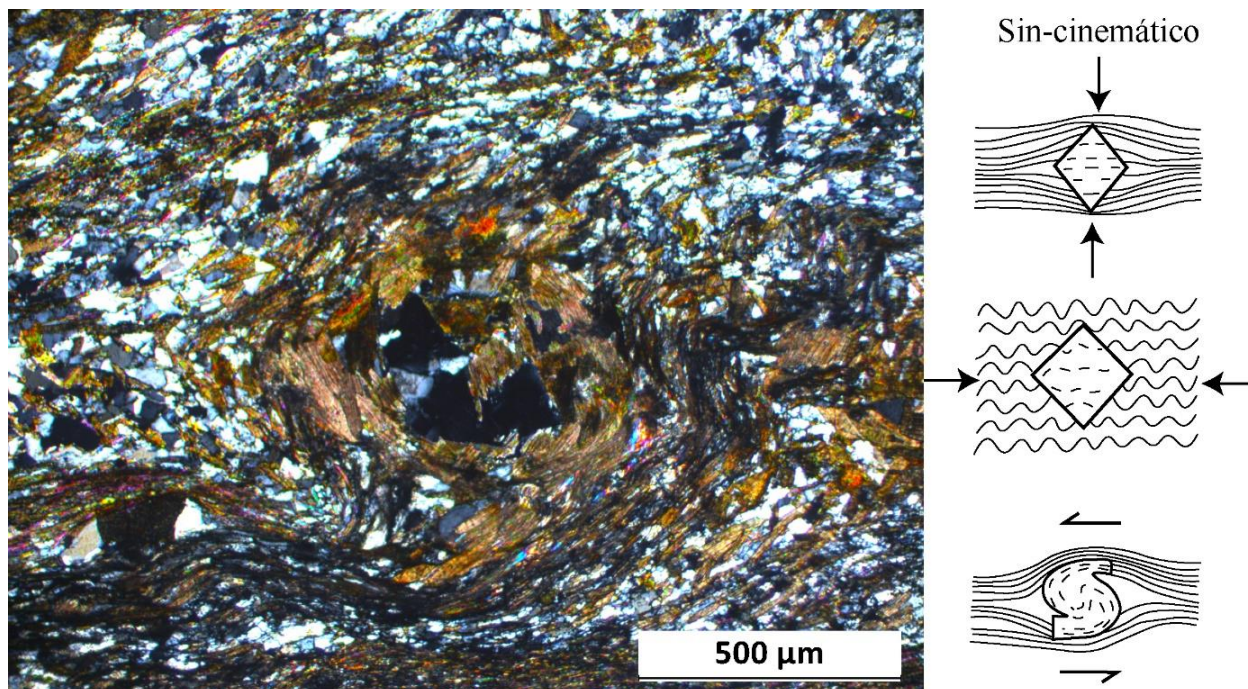


Figura 11. Representación esquemática de los cristales de granate sin-cinemáticos de la muestra 2-XII-23 donde el blasto de Grt giró a medida que crecía, incorporando progresivamente la foliación externa, semejante a una bola de nieve. Modificado de Winter (2014).

3.1.1.2 Rocas metaígneas

Las rocas metaígneas correlacionables con la Formación Santiago Peak se exponen principalmente en afloramientos aislados en la porción central del Valle de Ojos Negros. Los afloramientos más grandes se encuentran en el cerro El Portezuelo. Como parte de la misma Formación también se consideran los *sills* que intrusionan al Complejo Bedford Canyon en la margen oriental del valle y los diques del norte de plutón Los Cascabeles (Figuras 6 y 7).

Al sur de la comunidad Real Del Castillo Nuevo, en el cerro Ojos Negros afloran rocas con aspecto de derrame andesítico porfídico intensamente foliadas. Su textura es protomilonítica con foliación bien desarrollada en cristales finos de cuarzo, plagioclasa y epidota con porfiroclastos de clinopiroxeno (uralita) y hornblenda, principalmente. Su susceptibilidad magnética es baja ($<2 \times 10^{-3}$ SI) y se encuentra visiblemente deformado (Figura 12a y b). En Real del Castillo Viejo, al NW del valle (Figura 6), la andesita se encuentra en derrames brechados deformados y metamorfozados. Localmente, le sobreyace un cuerpo

de tipo exhalativo con aspecto de brecha formada por fragmentos sedimentarios y volcánicos cementados con sílice (Figura 13).

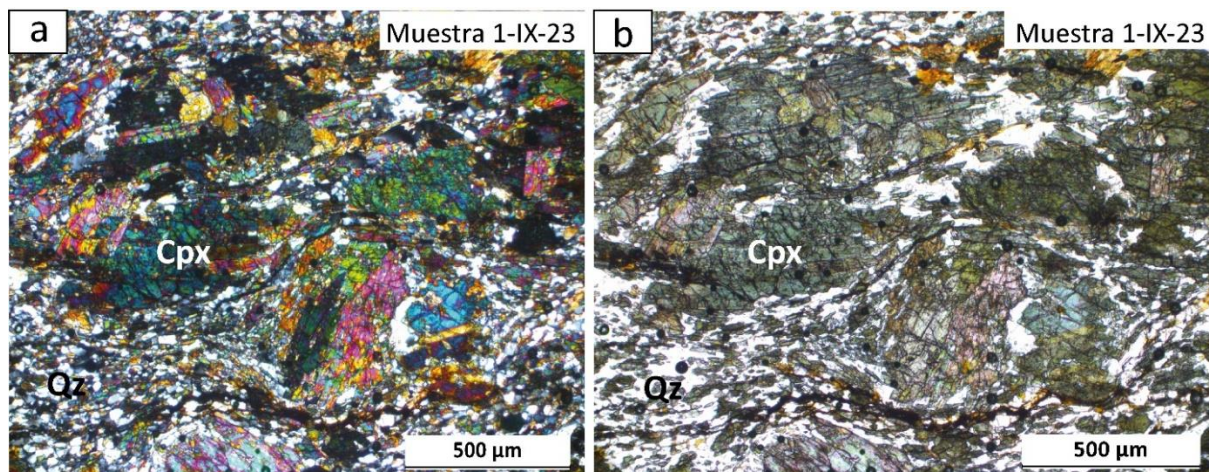


Figura 12. Microfotografías de muestra 1-IX-23 del afloramiento de derrame andesítico, al sur de la comunidad Real del Castillo Nuevo, en el cerro Ojos Negros vistas en luz polarizada a) plaza y b) cruzada. Se observa una textura protomilonítica y foliación bien desarrollada en cristales finos de cuarzo, plagioclasa y epidota, con porfiroclastos de clinopiroxeno y hornblenda. Abreviaturas: **Cpx**: Clinopiroxeno, **Qz**: Cuarzo.

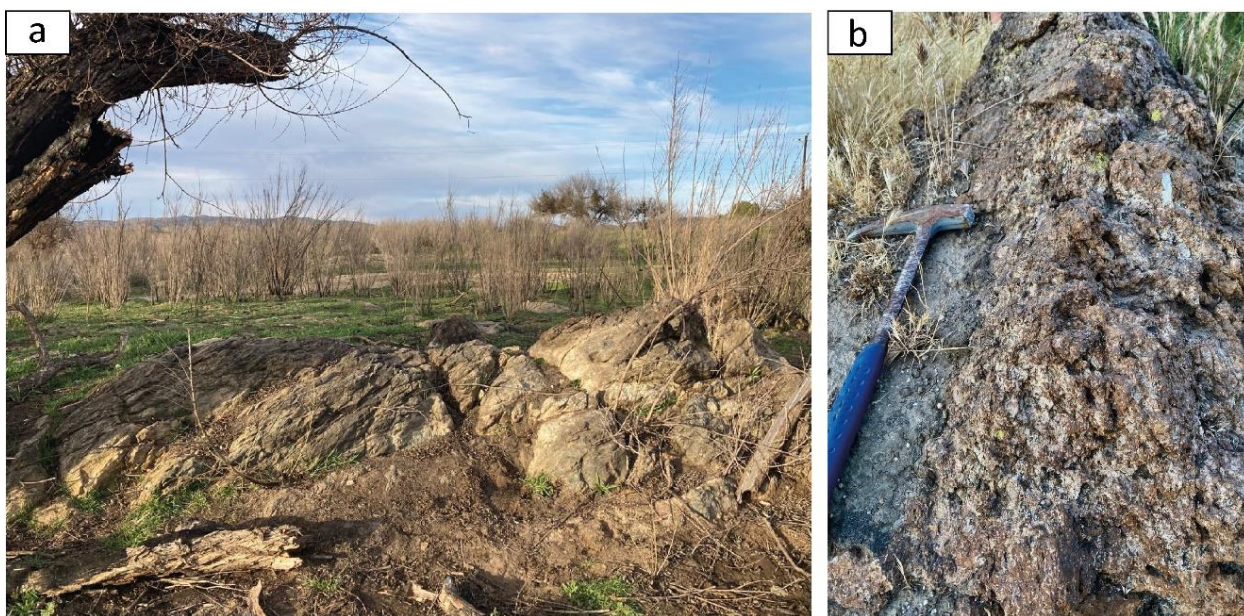


Figura 13. a) Derrames brechados de andesita deformados y metamorfizados al norte de la localidad Real del Castillo Viejo. b) Cuerpo exhalativo formado por fragmentos sedimentarios y volcánicos, el cual sobreyace a los derrames brechados.

El borde sur del plutón El Barbón del oriente del valle, contiene colgantes de lavas máficas (muestra 3-X-23) contenidos en granitos. En el interior de la estructura semicircular que debe reflejar la presencia de un

stock del que toma el nombre el plutón, las meta-areniscas del Complejo Bedford Canyon están intrusionadas por diques paralelos a la estratificación (*sills*). Una muestra de un *sill* andesítico-basáltico exhibe una textura pseudoestratificada definida por arreglos de grano grueso y fino de clinopiroxeno > ortopiroxeno ≥ hornblenda con plagioclasa anhedral intersticial (labradorita) en proporción menor a 1%. La epidota y la clorita son los minerales metamórficos dominantes. (muestra 6-X-23; Figura 14a y b).

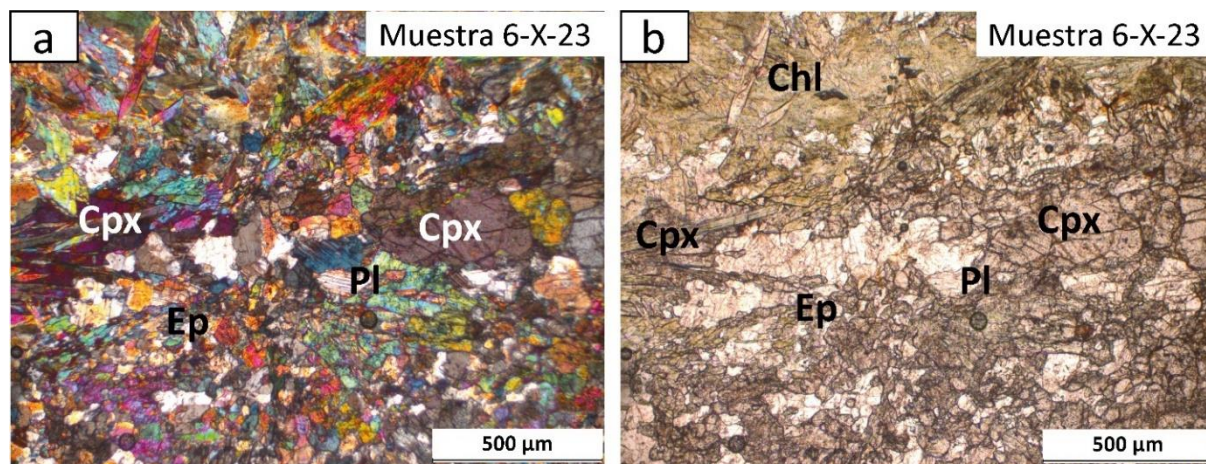


Figura 14. Microfotografías de la muestra 6-X-23 de un afloramiento de *sill* andesítico-basáltico al sur del plutón El Barbón en vista de luz polarizada a) plana y b) cruzada. Se observa una textura bandeada de granos gruesos de Cpx y Opx y granos finos Ep y Pl. Abreviaturas: **Chl**: Clorita, **Cpx**: Clinopiroxeno, **Ep**: Epidota, **Pl**: Plagioclase.

En los casi continuos cerros de El Portezuelo, que en conjunto destacan por su aspecto alargado E-W (Figura 6b), afloran rocas máficas metamorizadas en facies de esquistos verdes con texturas variables. En la parte central la unidad aparentemente lávica (1-II-24) está intensamente cizallada, pero conserva una textura de tipo intergranular de aspecto porfídico, formada por cristales euhedrales y subhedrales de anfíboles y clinopiroxenos con plagioclase anhedral intersticial en mosaicos. El clinopiroxeno está uralitizado y el contenido de magnetita es mayor al 1%, lo que se refleja por sus valores de susceptibilidad magnética promedio de 14×10^{-3} SI.

En el extremo oriental del cerro Portezuelo (al este del plutón El Barbón) las rocas máficas corresponden a una clinopiroxenita cloritizada. En la muestra 5-IX-23 se identifican clinopiroxenos y pseudomorfos de este mineral en una proporción $\leq 1\%$, mientras que óxidos opacos pueden concentrarse hasta en más del 5% en algunas porciones de la lámina delgada. Notablemente, esta zona no muestra deformación.

Hacia el centro y oeste del cerro El Portezuelo (Figura 6), en los sitios de las muestras 2-IX-23 y 3-IX-23, la unidad metamorizada de aspecto lávico exhibe una deformación más intensa que en los sitios más

orientales (Figura 15a). En las fracciones menos deformadas se identifican relictos de andesina (<5%) y hornblendas frescas en una matriz presumiblemente vítrea cristalizada (Figura 15b y c). Los minerales metamórficos dominantes son clorita (clinocloro por Difracción de rayos x, DRX; Gabriel Rendón, comunicación personal, octubre de 2024), tremolita y clinozoisita. Mientras que la mineralogía en los planos de cizalla es principalmente de clorita, óxidos de Fe-Ti y escasos relictos de plagioclasea.

En el extremo occidental del cerro El Portezuelo existe una cata con fines de prospección por talco. En esa zona se expone con un espesor de aproximadamente 30 m un esquisto de clorita (clinocloro), talco y epidota milonitizado. Los cristales de clorita están orientados en dirección de la foliación, por lo que se infiere que la roca, cuyo protolito posiblemente sea de rocas volcánicas o *sills* de clinopiroxenita, como en el extremo oriental del cerro El Portezuelo. La muestra 3-II-24 (ver Anexo B) es de grano muy fino y está fuertemente foliada. Es notable que la susceptibilidad magnética de esta roca sea baja, comparada con la del promedio de peridotitas serpentinizadas, por lo tanto, se infiere que el contenido de olivino en el protolito fue bajo y la roca original haya sido una clinopiroxenita.

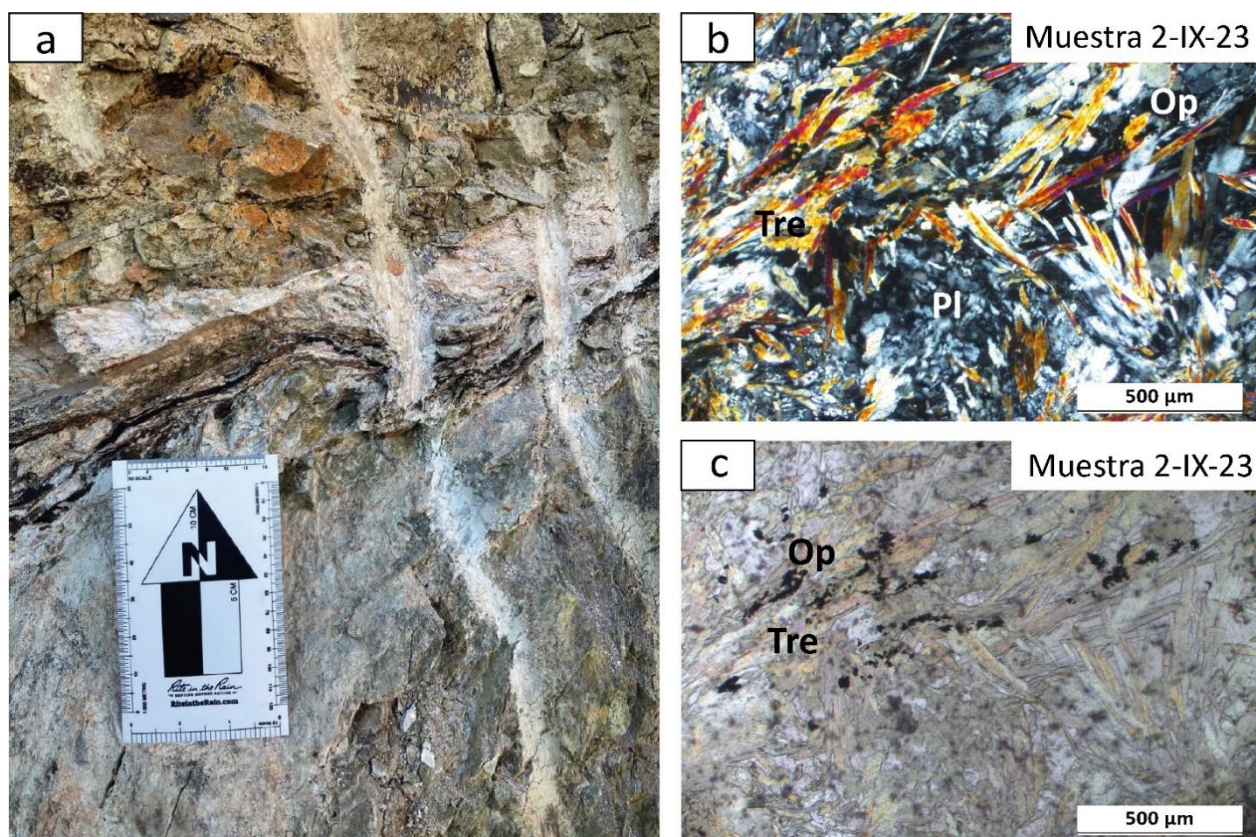


Figura 15. a) Afloramiento de cata de talco deformado, parte central del cerro El Portezuelo. b) y c) Microfotografías de muestra 2-IX-23 vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente, se observa relictos de plagioclasea y hornblendas en una matriz vítrea recrystalizada. Abreviaturas: **Op**: Opacos, **Pl**: Plagioclasea y **Tre**: Tremolita.

3.1.2 Rocas plutónicas de la región del Valle de Ojos Negros

A partir de la interpretación de la imagen satelital (Google Earth) se discriminaron plutones discretos que intrusieron a la Formación Santiago Peak del Cretácico Inferior en el centro y oeste del valle, así como los que intrusieron al Complejo Bedford Canyon en el este. En el oriente, el plutón Timoteo se definió claramente de la imagen satelital, aunque prácticamente no hay acceso a su interior. Su borde SW pudo muestrearse, aparentemente, su emplazamiento guarda una relación cercana con el adyacente plutón El Barbón. Diques félsicos orientados NNW-SSE atraviesan a los dos plutones, de donde se infiere que pueden ser *stocks* anidados, por ello, en el siguiente apartado se presentan juntos. Sin embargo, es importante notar que los diques del Enjambre San Marcos son más abundantes en Timoteo que en El Barbón. En la zona ESE del valle, se identificó un conjunto de plutones de forma irregular en arreglo anidado, dicho conjunto se denominó como el plutón La Huerta (Figura 6), el cual también se encuentra cortado por el Enjambre de Diques San Marcos. En el SSW del valle se encuentra una franja de rocas plutónicas en la que se definen los plutones Los Cascabeles y El Alamar, en los cuales los diques del Enjambre San Marcos también son notables. La clasificación modal de las muestras se presenta en la Figura 16 y en el apartado correspondiente a cada plutón.

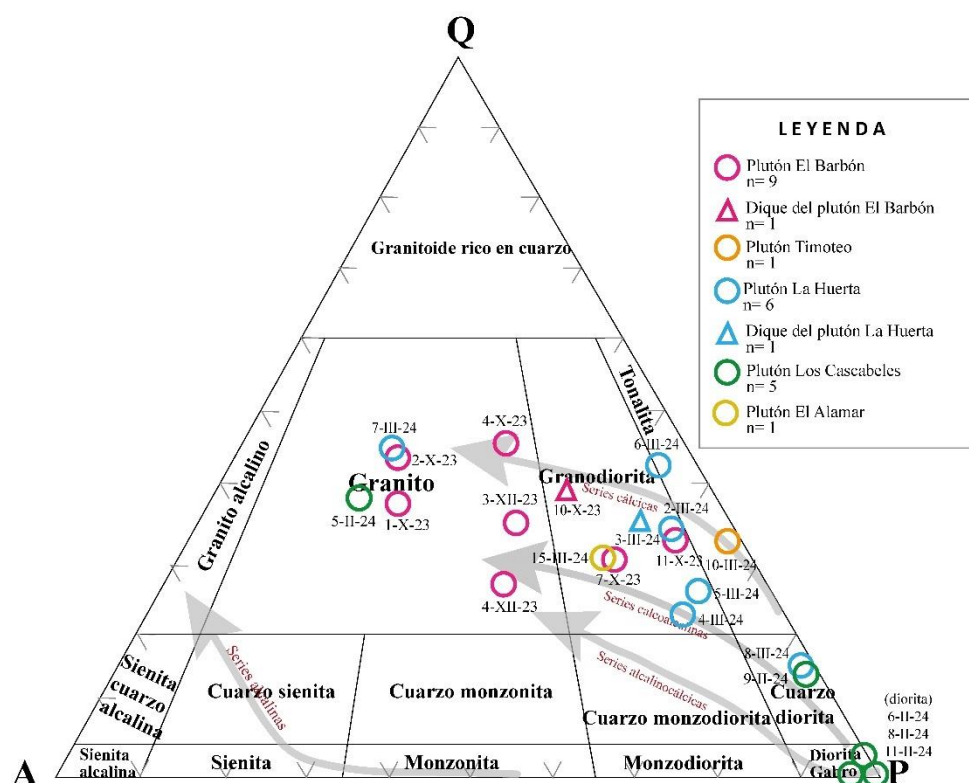


Figura 16. Diagrama de clasificación modal cuarzo-feldespato alcalino- plagioclasa (QAP; Le Maitre et al., 2002) de las rocas intrusivas del Valle de Ojos Negros (con base en el conteo modal de 363 puntos). Series composicionales para rocas plutónicas de acuerdo con Frost y Frost (2008).

3.1.2.1 Plutones El Barbón y Timoteo

El Barbón (PEB en Figura 6c) es un plutón de composición granodiorítica a granítica (Tabla 4) de aproximadamente 6 km de diámetro, que está bien expuesto en su extremo sur y en algunas ventanas de erosión entre las rocas metasedimentarias del Complejo Bedford Canyon (Figura 6c). Es notable el desarrollo de estructuras similares a dorsales curvilíneas que, por su continuidad con las rocas del sur, se infiere que son de composición granítica. Las rocas graníticas tienen una foliación definida por los cristales de biotita y están cortadas por diques máficos asociados al Enjambre San Marcos orientados NW-SE. Destacan en la imagen de Google Earth, por lo menos dos diques que atraviesan a ambos plutones con orientaciones NE-SW y NNW-SSE, este último de 5 km de longitud.

Los afloramientos al sur del plutón El Barbón son de composición granítica con muscovita y biotita y cristales de granate de hasta 1 cm de diámetro (muestras 1-X-23, 2-X-23; Tabla 4). Sus valores de susceptibilidad magnética son muy bajos ($> 0.1 \times 10^{-3}$ SI). Los afloramientos de granodiorita forman cuerpos amplios con una foliación bien definida por bandas de biotita. Es relativamente común observar la mezcla de magmas de esta composición y material máfico (*mingling*; Figura 17a), y abundantes enclaves máficos, con frecuencia elongados en la dirección de la foliación (Figura 17b y c).

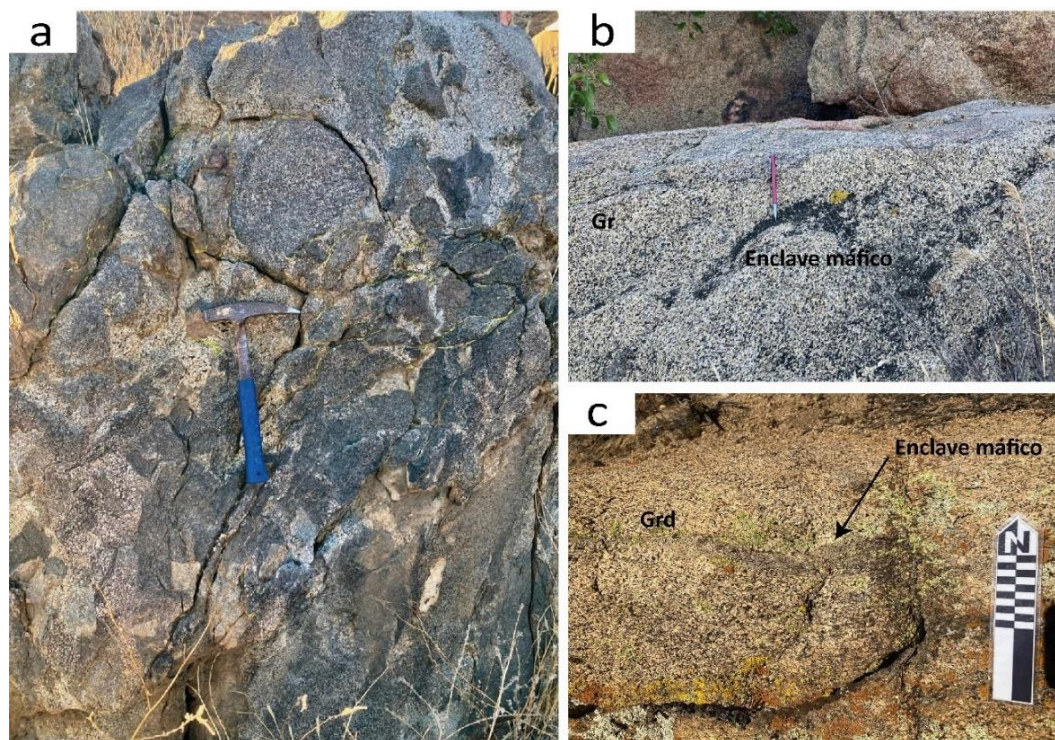


Figura 17. Relaciones de campo del plutón El Barbón. a) Mezcla de magma (*mingling*), donde se distingue la interacción física de al menos dos magmas. Enclaves máficos en b) granito y c) granodiorita. Abreviaturas: **Grd**: Granodiorita, **Gr**: Granito.

Tabla 4. Síntesis petrográfica de las rocas plutónicas y diques del plutón El Barbón.

Muestra	Coordenadas		Clasificación petrográfica	Composición modal						Observaciones
	Latitud	Longitud		Qz	Kfs	Pl	Bt	Ms	Total	
1-X-23	574626	3534747	Granito de dos micas	26.1	26.3	15.4	18.3	13.9	100	Holocristalina, hipidiomórfica de grano medio. Los feldespatos son pertíticos. Es común la argilitización selectiva en los Kfs. Pl: Oli-And; Acc: Grt, Zrn QAP: 38, 39, 23
2-X-23	574626	3534747	Granito de dos micas	40.6	32.0	16.8	5.8	4.8	100	Holocristalina, hipidiomórfica de grano medio, texturas pertíticas en Kfs, plagioclasas subhedrales. Pl: Oli-And; Acc: Zrn, QAP:45, 36, 19
4-X-23	572899	3535921	Granito de dos micas	43.1	19.0	28.3	7.7	1.9	100	Holocristalina hipidiomórfica de grano medio, textura mirmequítica en Kfs, biotita y muscovita y plagioclasas subhedrales con abundantes maclas polisintéticas: Pl: Oli-And, QAP: 47, 22, 31
7-X-23	5734858	3536833	Granodiorita de dos micas	29.3	16.0	49.8	3.7	1.2	100	Holocristalina hipidiomórfica de grano medio, textura mirmequítica en Kfs, plagioclasas subhedrales con maclas polisintéticas y zonación, argilitización selectiva en Kfs. Pl: Oli-And; Acc: Zrn, QAP:31, 17, 52
11-X-23	574905	3537378	Granodiorita de dos micas	32.8	14.6	33.2	15.5	3.9	100	Holocristalina hipidiomórfica de grano medio, argilitización selectiva en Kfs Pl: Oli-And, QAP: 41, 18, 41
3-XII-23	575460	3538024	Granito de dos micas	23.7	16.7	24.9	13.2	21.5	100	Holocristalina hipidiomórfica de grano medio con plagioclasas subhedrales con maclas polisintéticas. Pl: Oli-And, Acc: Grt, Zrn, QAP:36, 26, 38
4-XII-23	575473	3538221	Granito de dos micas	18.8	22.2	28.4	20.4	10.2	100	Holocristalina hipidiomórfica de grano medio, argilitización selectiva en Kfs. Pl: Oli-And, QAP: 27,32, 41
8-X-23	573984	3537347	Dique basáltico de And-Lab	-	-	-	-	-	-	Textura porfídica, fenocristales de Pl de And-Lab en una matriz rica en clinopiroxeno cloritizado con inclusiones de Op.
9-X-23	574058	3537359	Dique andesítico	-	-	-	-	-	-	Textura porfídica con fenocristales de And rotados en una matriz recrystalizada.
10-X-23	574258	3537496	Dique granodiorita de dos micas	24.9	5.9	43.7	19.9	5.6	100	Holocristalina hipidiomórfica de grano medio, argilitización selectiva en Kfs Pl: Oli-And, Acc: Zrn, QAP: 33, 8, 59

Abreviaturas: **Acc:** Minerales accesorio, **And:** Andesina, **Bt:** Biotita, **Kfs:** Feldespato potásico, **Ms:** Muscovita, **Oli:** Oligoclasa, **Op:** Opacos, **Pl:** plagioclasa, **Qz:** Cuarzo, **Zrn:** Circón. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

Petrográficamente, las muestras del plutón El Barbón se agrupan en los campos del granito y la granodiorita del diagrama QAP (Figura 18). El conjunto de muestras del plutón El Barbón, se encuentra entre las series cálcica y calcoalcalina, definidas por plutones del CBP y de Nevada (Frost y Frost, 2008), respectivamente (Figura 18).

Tanto los granitos como las granodioritas tienen textura holocristalina de grano medio, contienen dos micas (biotita y muscovita) y algunos cristales de granate (muestras 1-X-23 y 3-XII-23) (Figura 19a y b). Las plagioclasas en todas las muestras tienen hábito subhedral, maclas polisintéticas y, algunos cristales muestran zonamiento de oligoclasa-andesina. En algunas muestras es común encontrar pertita (muestras 1-X-23 en Anexo B y 2-X-23 en Figura 19c y d), texturas mirmequíticas (4-X-23 Figura 19e y f) en zonas donde la plagioclasa está en contacto con feldespato potásico. Este último puede desarrollar argilitización selectiva.

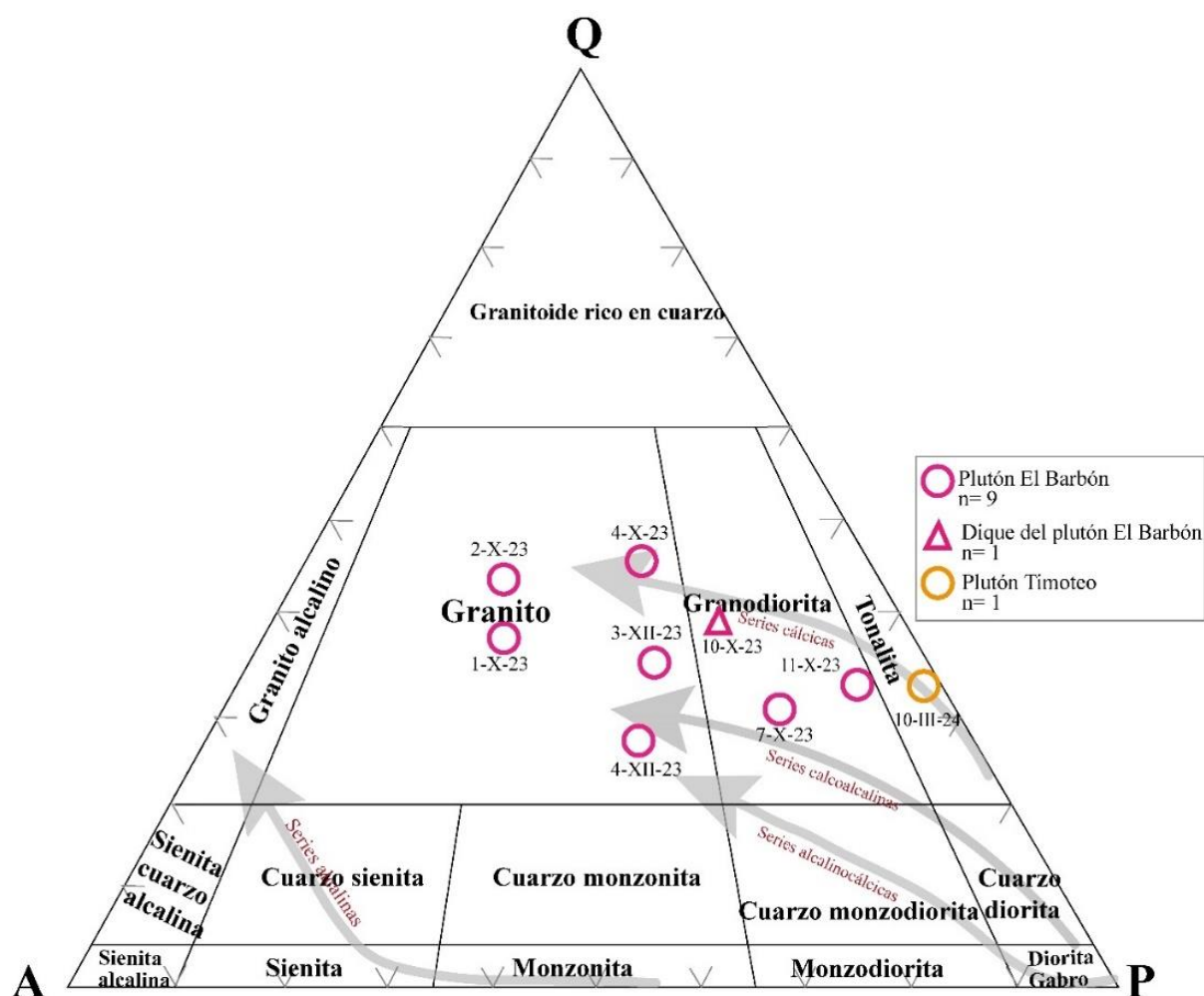


Figura 18. Diagrama de clasificación modal cuarzo-feldespato alcalino-plagioclase (QAP; Le Maitre et al., 2002) de las muestras intrusivas de los plutones Timoteo y El Barbón (con base en el conteo modal de 363 puntos). Series composicionales para rocas plutónicas de acuerdo con Frost y Frost (2008).

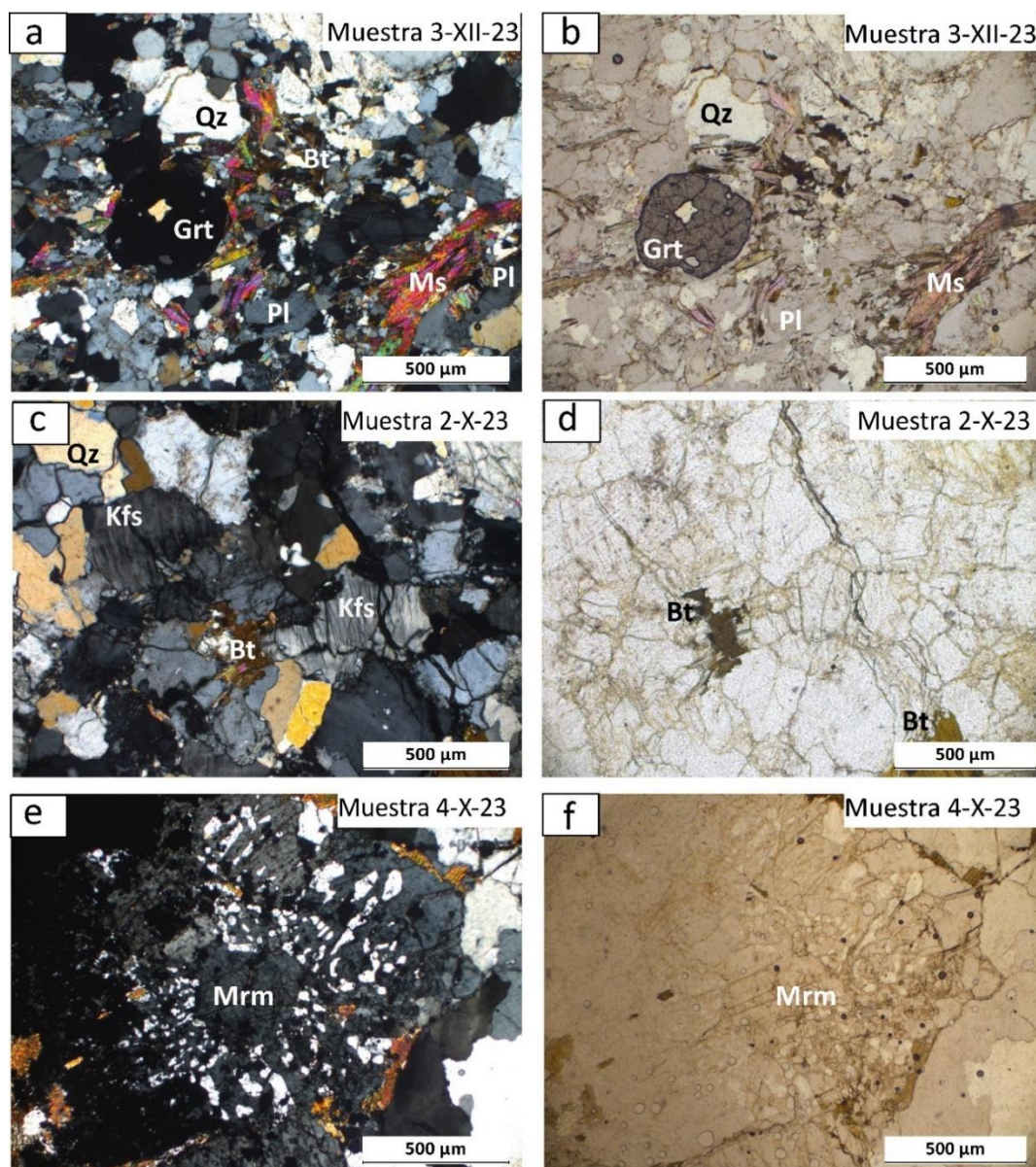


Figura 19. Microfotografías de láminas delgadas del plutón El Barbón. a) y b) Muestra 3-XII-23 granito de dos micas holocristalina hipidiomórfica de grano medio con cristales de granate vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente. c) y d) Muestra 2-X-23 Granito de dos micas, resalta la textura de exsolución en los feldespatos potásicos formada a partir de la separación de un feldespato homogéneo vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. e) y f) Muestra 4-X-23 Granito de dos micas, en la microfotografía se muestra la textura mirmequítica formada en zonas donde la plagioclasa está en contacto con el feldespato potásico vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. Abreviaturas: **Bt:** Biotita, **Grt:** Granate, **Kfs:** Feldespato potásico **Mrm:** Mirmequita **Ms:** Muscovita, **Pl:** Plagioclasa, **Qz:** Cuarzo.

Se muestrearon tres diques, los cuales cortan a los cuerpos granodioríticos del plutón El Barbón, la muestra 8-X-23 pertenece a un dique máfico de tipo Enjambre de San Marcos cuyos fenocristales de plagioclasa definen una textura porfídica. Las plagioclases son de andesina-labradorita y la matriz es rica en clinopiroxeno cloritizado con inclusiones de óxidos opacos (Figura 20a y b). La muestra 9-X-23 es de

composición andesítica con plagioclasa de andesina, la roca muestra cizallamiento, tanto en el afloramiento como en la lámina delgada. La muestra 10-X-23 es la única a la que se le pudo obtener la moda y graficar en el diagrama QAP (Figura 18). Esta muestra de composición granodiorítica presenta dos micas y una textura holocristalina, hipidiomórfica de grano medio. Las muestras la 9-X-23 (Figura 20c y d) y 10-X-23 (Figura 20e y f) se consideran como pertenecientes al sistema magmático de los plutones anidados Barbón-Timoteo.

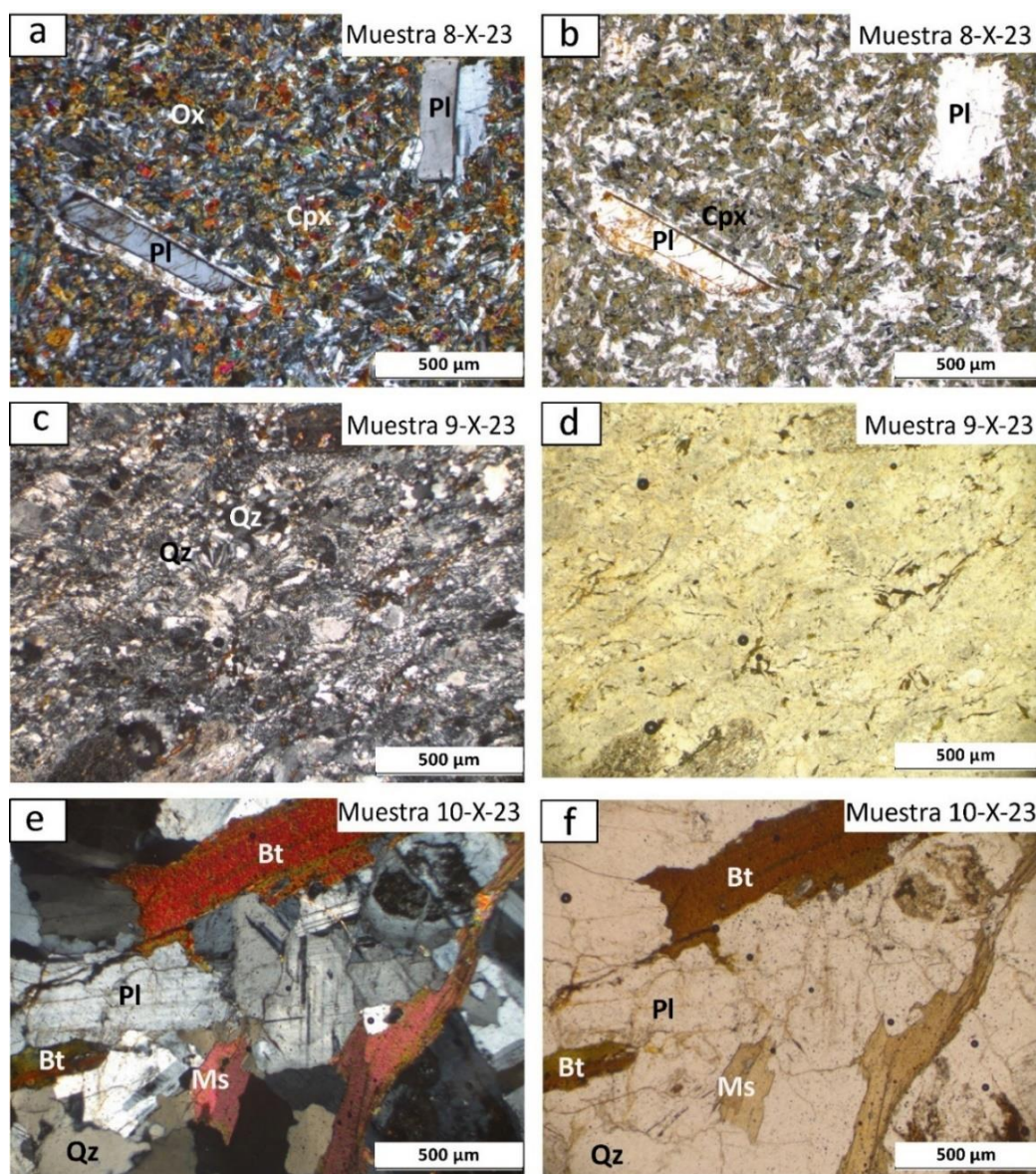


Figura 20. Microfotografías de diques que intrusionan al plutón El Barbón. a) y b) Muestra 8-X-23 dique máfico porfídico con fenocristales de And-Lab en una matriz rica en clinopiroxeno cloritizado vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. c) y d) Muestra 9-X-23 dique andesítico con fenocristales de And en una matriz que muestra cizallamiento y recristalización vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. e) y f) Muestra 10-X-23 dique de granodiorita de dos micas y en algunas zonas desarrolla argilitización selectiva vista en luz polarizada plana y cruzada, respectivamente. Abreviaturas: **Bt:** Biotita, **Cpx:** Clinopiroxeno, **Ms:** Muscovita, **Op:** Opacos, **Pl:** Plagioclasa, **Qz:** Cuarzo.

El plutón Timoteo (PT; Figura 6a y c) aparentemente intrusiona al plutón El Barbón. Tiene una buena definición en Google Earth, su diámetro es de 6 km y está visiblemente cortado por el Enjambre de Diques San Marcos orientados NW-SE. Los tres sitios de muestreo solo permiten conocer la composición de la periferia del plutón Timoteo) que de acuerdo con el diagrama QAP es tonalítica (Figura 18) y coincide con la cartografía de Gastil et al. (1975) y Farquarson (2004). La síntesis petrográfica de este plutón se presenta en la Tabla 5.

Petrográficamente, la muestra plutónica (10-III-24) corresponde a una tonalita de dos micas (biotita y muscovita), la cual está formada por oligoclasa-andesina, biotita y muscovita, con abundante cuarzo intersticial recristalizado (Figura 21a y b).

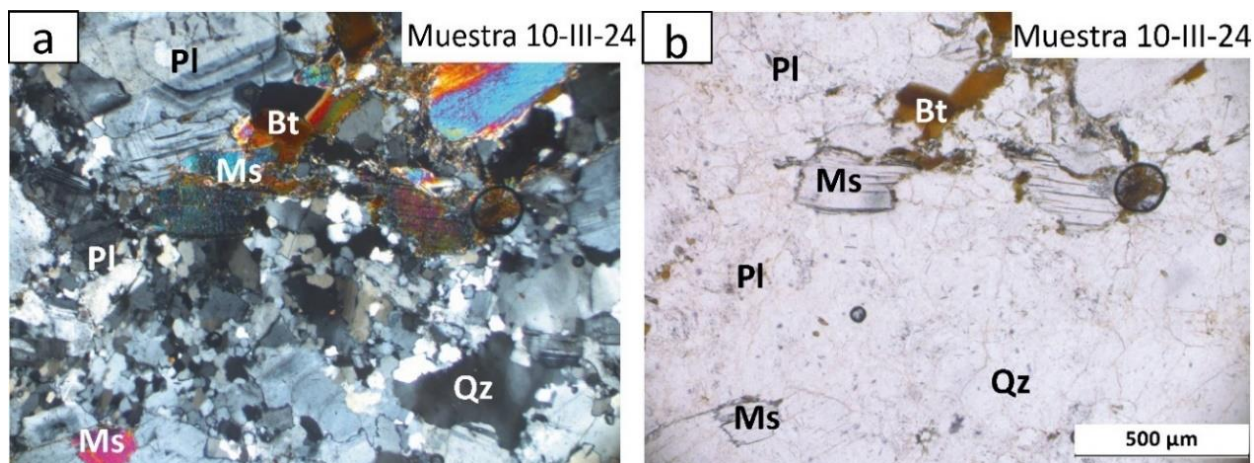


Figura 21. Microfotografía de la muestra 10-III-24 del plutón Timoteo en vista de luz polarizada a) cruzada y b) plana. Se observa una tonalita de dos micas con plagioclasa de composición oligoclasa-andesina, con abundante cuarzo recristalizado intersticial. Abreviaturas: **Bt:** Biotita, **Ms:** Muscovita, **Pl:** Plagioclasa, **Qz:** Cuarzo.

Los diques tipo San Marcos cortan la parte sur de este plutón, no fue posible obtener la composición modal, ya que tienen textura afanítica que en parte puede ser vidrio recristalizado con aspecto perlítico. La muestra 9-III-24 se clasifica como dacita por su contenido de oligoclasa, la matriz es rica en clinozoisita, tremolita y óxidos de Fe-Ti (Figura 22a y b). Cabe resaltar que su susceptibilidad magnética es baja ($<2 \times 10^{-3}$ SI)

La muestra 11-III-24 es un dique aparentemente dacítico, su textura es afanítica en muestra de mano. Al microscopio, es visible su textura porfídica, con contenido de plagioclasa de composición oligoclasa y biotita se observa el desarrollo de texturas de aspecto esqueletal y de plumas (Figura 22c y d). Esta muestra también presenta valores de susceptibilidad muy bajos ($<2 \times 10^{-3}$ SI).

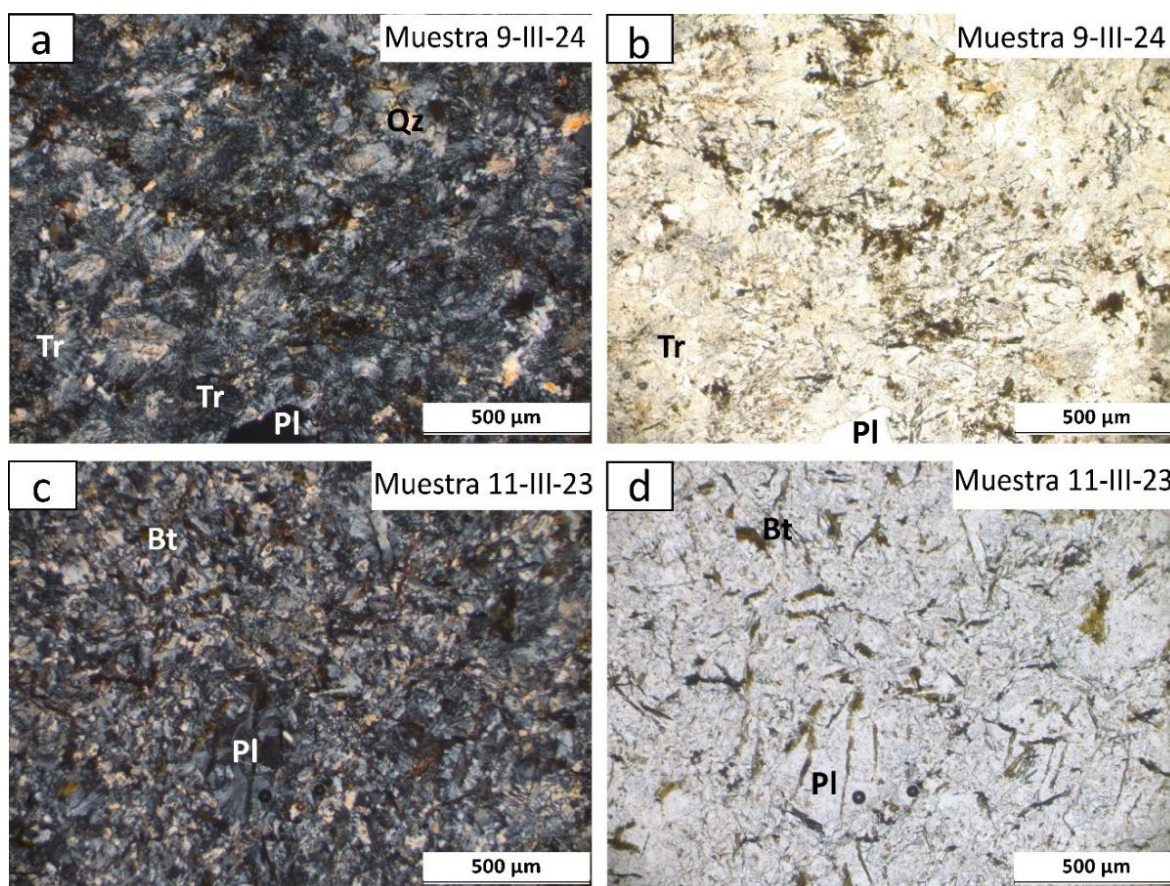


Figura 22. Microfotografías de láminas delgadas de diques que intrusionan al plutón Timoteo asociados al Enjambre de Diques San Marcos en vista de luz polarizada cruzada y plana. a) y b) Muestra 9-III-24 dique dacítico con plagioclasas de composición oligoclasa en una matriz rica en clinozoisita, tremolita. c) y d) Muestra 11-III-23 dique dacítico. Abreviaturas: **Bt**: Biotita, **Pl**: Plagioclasea, **Qz**: Cuarzo, **Tr**: Tremolita.

Tabla 5. Síntesis petrográfica de la roca plutónica y diques del plutón Timoteo.

Muestra	Coordenadas		Clasificación petrográfica	Composición modal					Observaciones
	Latitud	Longitud		Qz	Pl	Bt	Ms	Total	
10-III-24	566617	3539994	Tonalita de dos micas	26.3	47.3	18.2	8.2	100	Holocristalina de grano medio a fino, cristales de plagioclasea subhedrales con maclas polisintéticas y cuarzo intersticial. Pl: Oli-And QAP: 36, 0, 64
9-III-24	569459	3539776	Dique dacítico (Tipo San Marcos)	-	-	-	-	-	Abundante plagioclasea en una matriz rica en clinozoisita y tremolita y opacos. Pl: Oli
11-III-24	567080	3539650	Dique dacítico (Tipo San Marcos)	-	-	-	-	-	Porfídica, la Pl (Oli) puede desarrollar texturas esqueletales y de plumas en una matriz de grano fino con escasa epidota.

Abreviaturas: **And**: Andesina, **Bt**: Biotita, **Ms**: Muscovita, **Oli**: Oligoclasa, **Op**: Opacos, **Pl**: plagioclasea, **Qz**: Cuarzo.
Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11.

3.1.2.2 Plutones La Huerta

En el sureste del Valle de Ojos Negros un conjunto de plutones de aspecto anidado cuyas formas son elípticas, con elongación con tendencia hacia el norte, fueron denominados plutones La Huerta en este trabajo (PLH en la Figura 6). Por la complejidad de su geometría resulta difícil establecer el orden de emplazamiento entre los plutones, cuyas dimensiones son menores de 40 km².

La composición de dos de ellos es principalmente granodiorítica, con ligeras variaciones en feldespato potásico, desde cuarzodiorita hasta tonalita. La densidad de diques presumiblemente asociados al Enjambre San Marcos disminuye hacia el oriente, en el borde del valle. Un conjunto particularmente distinto por su forma concéntrica se desarrolla al W de la población La Huerta. La síntesis petrográfica de las rocas plutónicas y diques se presenta en la Tabla 6 y Figura 23.

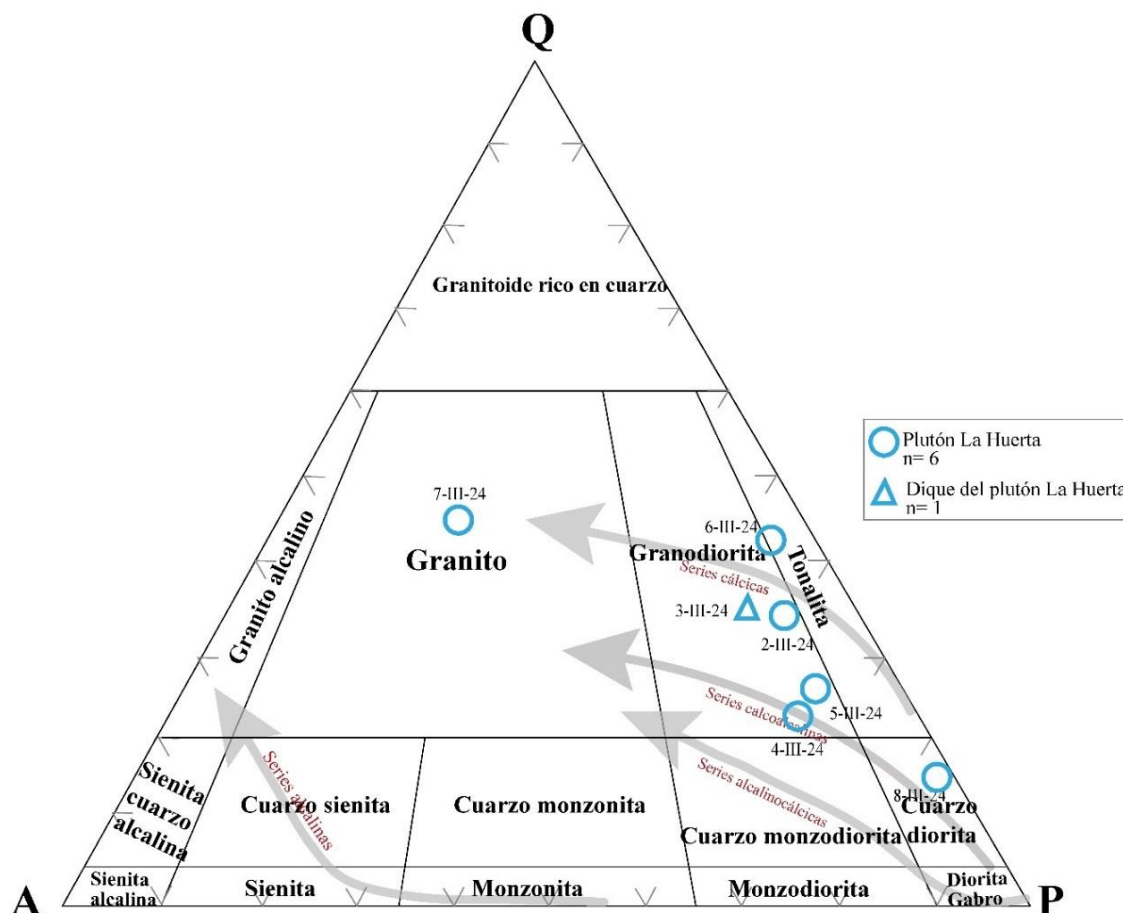


Figura 23. Diagrama de clasificación modal cuarzo-feldespato alcalino-plagioclasa (QAP; Le Maitre et al., 2002) de las muestras intrusivas del plutón La Huerta (con base en el conteo modal de 363 puntos). Series composicionales para rocas plutónicas de acuerdo con Frost y Frost (2008).

Tabla 6. Síntesis petrográfica de la roca plutónica y diques del conjunto La Huerta.

Muestra	Coordenadas		Clasificación petrográfica	Composición modal								Observaciones
	Latitud	Longitud		Qz	Kfs	Pl	Hbl	Bt	Ms	Op	Total	
2-III-24	583996	3527969	Granodiorita de biotita	29.5	6.3	47.5	0.0	13.7	0.0	3.0	100	Holocristalina, hipidiomórfica de grano grueso a medio, las plagioclasas son subhedrales y presentan maclas polisintéticas. Minerales opacos con hábitos euhedrales a subhedrales. Pl: And, QAP:35, 8, 57
4-III-24	585324	3527683	Granodiorita de biotita	18.7	10.9	53.8	0.0	16.6	0.0	<1.0	100	Holocristalina, hipidiomórfica de grano grueso, plagioclasas con hábitos subhedrales y microclina. Pl: Oli-And, QAP:22, 13, 65
5-III-24	585369	3529060	Granodiorita de hornblenda	19.3	5.4	47.6	14.5	11.9	0.0	1.3	100	Holocristalina, hipidiomórfica de grano grueso, pertitas frecuentes, plagioclasas con maclas polisintéticas y zonación, hornblendas subhedrales y minerales opacos dispersos. Pl: Oli-And, QAP: 27, 7., 66
6-III-24	584820	3530153	Tonalita de hornblenda y biotita	30.2	4.0	36.8	17.6	11.4	0.0	0.0	100	Holocristalina hipidiomórfica de grano medio a fino, texturas mirmequíticas y pertíticas, cuarzo intersticial. Pl: Oli-And, QAP:43, 6, 51
7-III-24	578021	3531624	Granito de dos micas	40.1	31.2	15.2	0.0	9.1	4.4	0.0	100	Holocristalina hipidiomórfica de grano medio, Kfs con texturas gráficas. Pl: Oli-And, QAP:46, 36, 18
8-III-24	583087	3531234	Cuarzodiorita de hornblenda	12.1	0.0	61.8	16.7	7.3	0.0	2.1	100	Holocristalina hipidiomórfica de grano grueso, Pl con hábitos subhedrales y maclas polisintéticas, minerales opacos anhedrales. Pl: Oli-And, QAP: 16, 0, 84
1-III-24	577393	3526498	Dique de granodiorita de biotita	-	-	-	-	-	-	-	-	Porfídica con fenocristales de Pl y Qz, algunos fenocristales muestran textura mirmequítica, cristales de biotita son subhedrales y alargados en matriz de grano fino de Pl y Bt.
3-III-24	583996	3527969	Dique de granodiorita de biotita	29.8	9.8	43.8	0.0	15.4	0.0	1.2	100	Holocristalina, hipidiomórfica de grano medio a grande. Inclusiones de minerales opacos en plagioclasa. Pl: Oli-And, QAP: 36, 12, 52

Abreviaturas: **And:** Andesina, **Bt:** Biotita, **Hbl:** Hornblenda, **Kfs:** Feldespato potásico, **Ms:** Muscovita, **Oli:** Oligoclase, **Op:** Opacos, **Pl:** plagioclase, **Qz:** Cuarzo.
Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11.

Las rocas del plutón compuesto La Huerta son mayoritariamente de grano grueso y notablemente foliadas. Al interior del conjunto, las rocas son principalmente de cuarzodiorita de hornblenda-biotita (muestra 8-III-24), la composición de plutón compuesto varía a tonalita-granodiorita hacia el sur (Tabla 6) y a granito hacia el W (7-III-24) en el diagrama QAP (Figura 23). Al igual que en los plutones El Barbón y Timoteo, la concentración de muestras se encuentra en las series cálcica y calcoalcalina de Frost y Frost (2008; Figura 23).

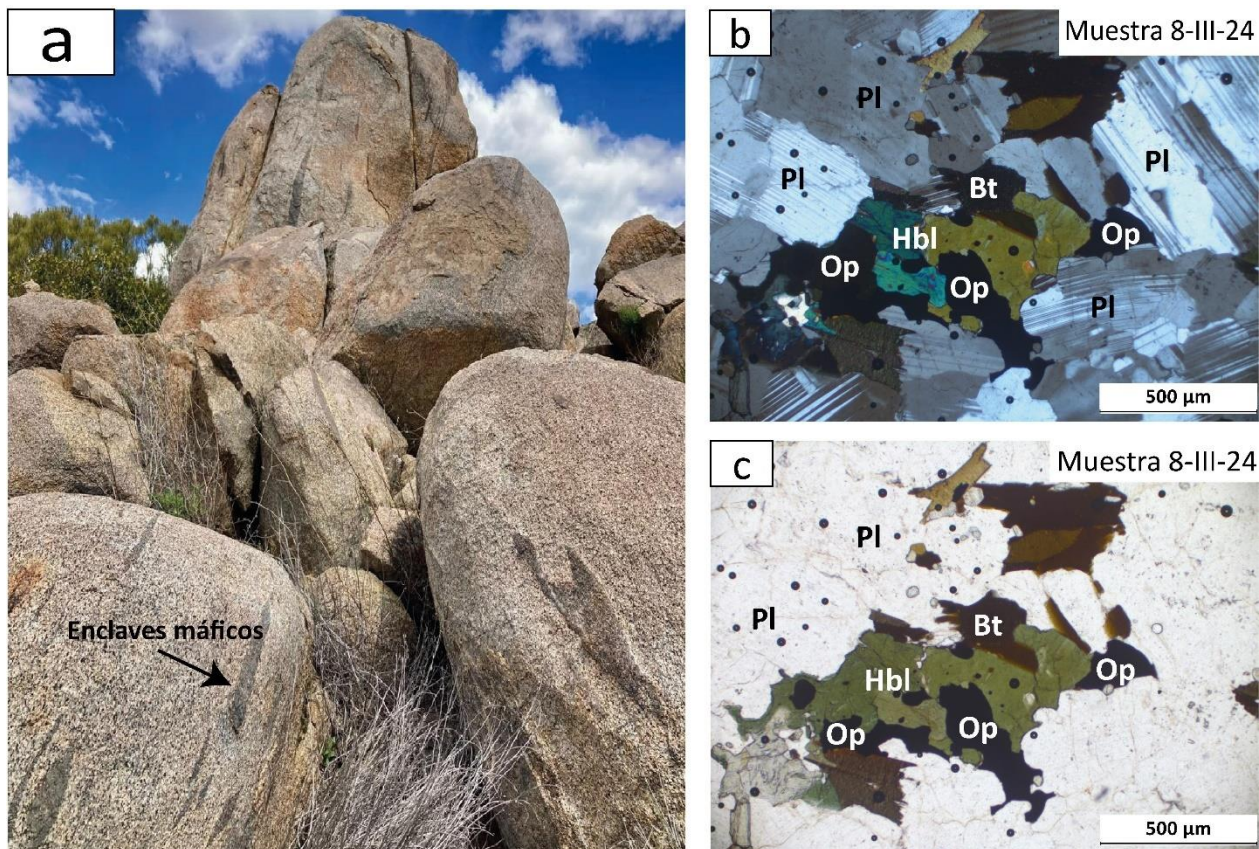


Figura 24. a) Rocas plutónicas cuarzodioríticas de La Huerta en el sitio de toma de la muestra 8-III-24, en el cual afloran cuarzodioritas de hornblenda con enclaves máficos elongados paralelos a la foliación. b y c) Microfotografías de cuarzodiorita de hornblenda y biotita de grano medio con plagioclasas de composición oligoclasa-andesina vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente. Abreviaturas: **Bt**: Biotita, **Hbl**: Hornblenda, **Op**: Opacos, **Pl**: Plagioclasa.

En los afloramientos, la cuarzodiorita de hornblenda-biotita de grano grueso muestra enclaves máficos elongados en la dirección de la foliación (Figura 24a). Tanto la cuarzodiorita como los enclaves máficos tienen valores muy altos de susceptibilidad magnética, hasta de 50×10^{-3} SI. Al microscopio, la muestra 8-III-24 exhibe una textura holocristalina de grano grueso, con plagioclasas subhedrales de oligoclasa-andesina que con frecuencia exhiben maclas polisintéticas (Figura 24b y c).

En la zona de muestreo la granodiorita es la roca intrusiva más abundante (Tabla 6). Son principalmente de grano medio y es común observar enclaves máficos elongados paralelos a la foliación. En algunos afloramientos en el borde sur del plutón, son comunes las segregaciones de magma félsico (Figura 25a) deformados por efecto de flujo viscoso, a lo largo del cual también se desarrollaron vetillas más ricas en sílice y autolitos (Figura 25b) de grano grueso en la roca granodiorítica. En la Figura 25a, las vetillas félsicas también pueden ser casi perpendiculares a la dirección de flujo, interpretándose que se deben al emplazamiento a lo largo de fracturas de contracción por efecto de enfriamiento de la masa granodiorítica. Bajo el microscopio las muestras de granodiorita tienen textura holocristalina de grano medio a grueso, con plagioclasas subhedrales de andesina (muestra 2-III-24; Figura 25c y d) y oligoclasa-andesina desarrollando frecuentemente maclas polisintéticas (Anexo B). La mayoría de las muestras contienen óxidos de Fe-Ti dispersos en la sección, a los que se atribuyen los valores de susceptibilidad magnética alta, entre 5.3 y 18.1×10^{-3} SI.

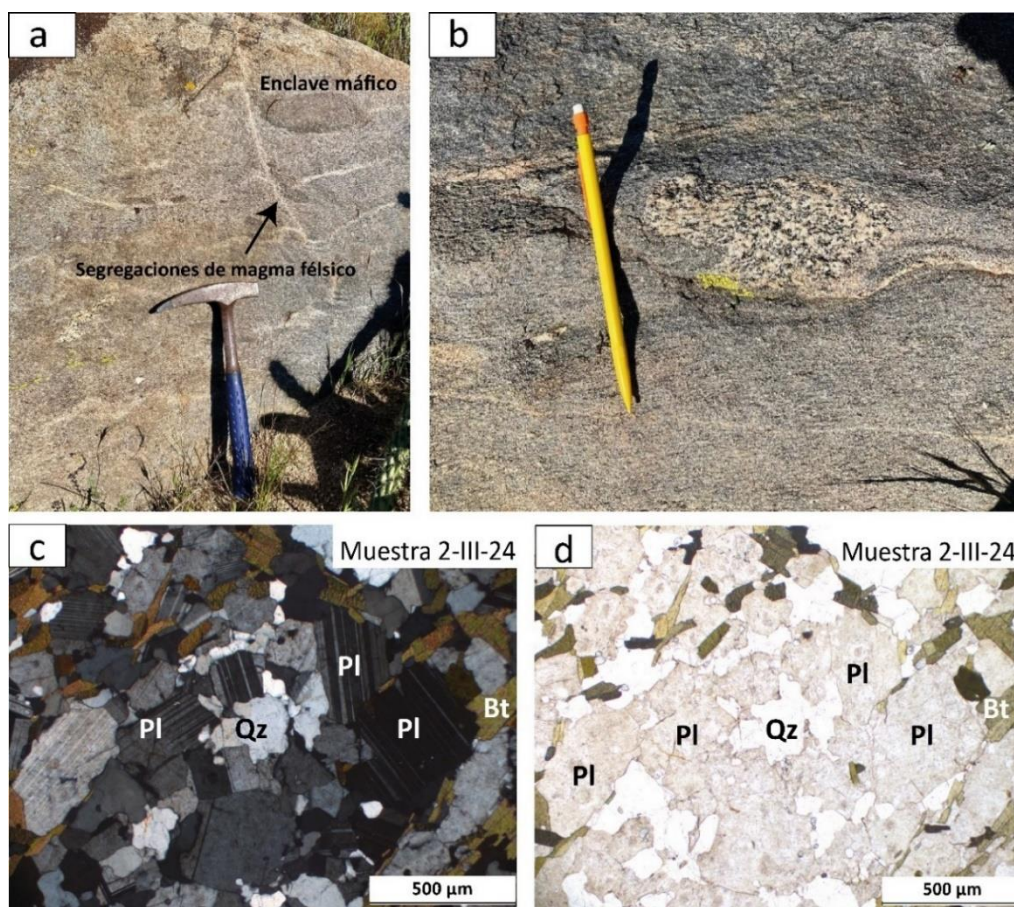


Figura 25. Rocas plutónicas granodioríticas vistas en afloramiento y en secciones delgadas de La Huerta, muestra 2-III-24. a) Segregaciones félsicas deformadas por flujo viscoso en una granodiorita desarrollaron agregados cristalinos y vetillas paralelas a la foliación. En la parte superior se observa un enclave máfico elipsoidal. b) Autolito de grano grueso en granodiorita. c) y d) Microfotografías vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, granodiorita con textura hipidiomórfica de grano medio, andesina y abundante biotita. Abreviaturas: **Bt**: Biotita, **Pl**: Plagioclase, **Qz**: Cuarzo.

Las rocas granodioríticas, al sur del plutón están intrusionadas por diques de su misma fuente (protrusivos). Los óxidos de Fe-Ti pueden estar en pequeños cristales diseminados o, como en la muestra 3-III-24 de granodiorita de biotita, que los cristales de plagioclasa tengan inclusiones de óxidos de Fe-Ti (Figura 26a), a los que se atribuyen los valores altos de susceptibilidad magnética, con un promedio en el sitio de 16.85×10^{-3} SI. Las texturas observadas son holocristalinas de grano medio a grande (Figura 26b y c).

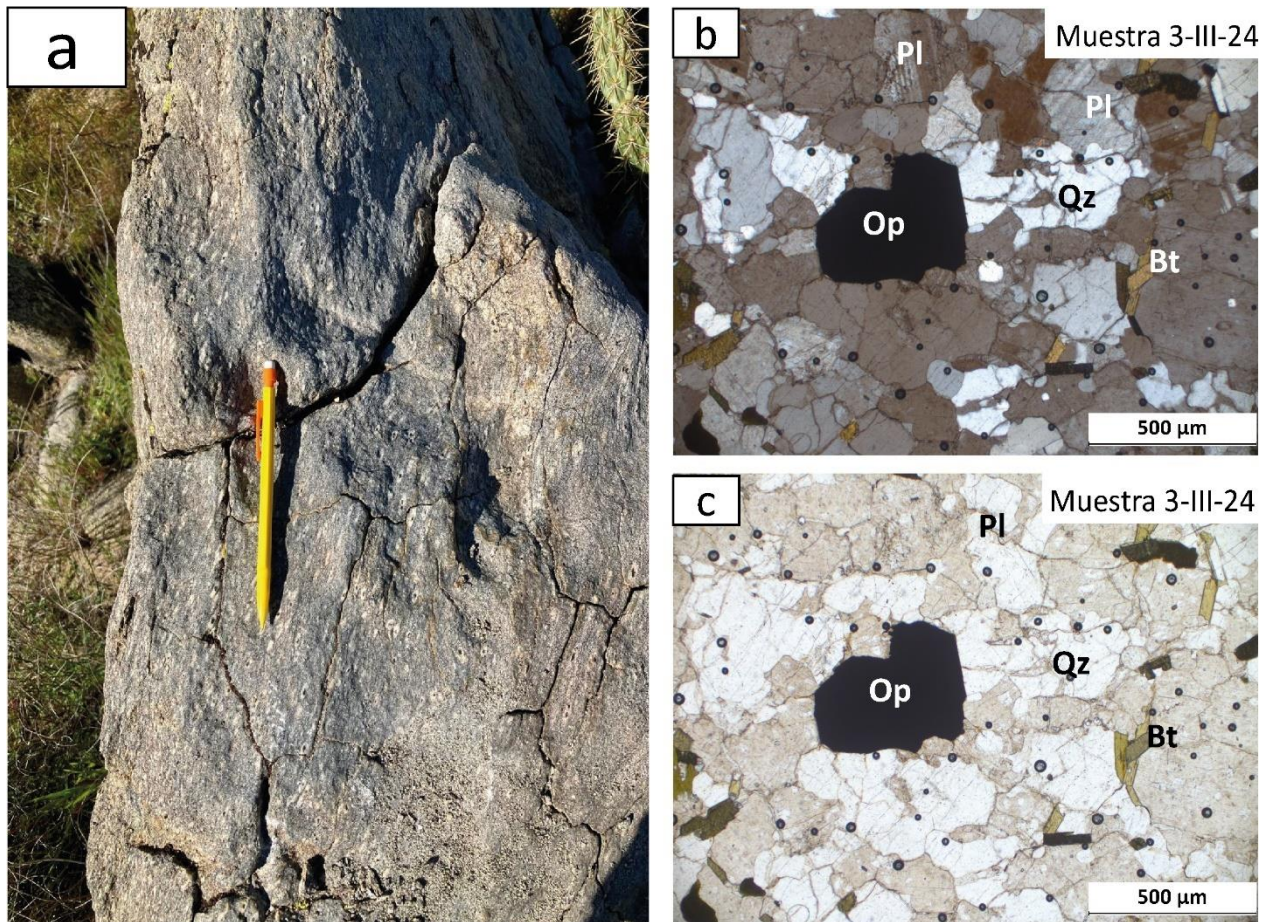


Figura 26. a) Afloramiento de dique granodiorítico en el sitio de toma de la muestra 3-III-24, se observan cristales de plagioclasa que envuelven minerales opacos. b) y c) Microfotografías vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, se observa una textura holocristalina de grano medio a grande y oligoclasa-andesina. Abreviaturas: **Bt:** Biotita, **Op:** Opacos, **Pl:** Plagioclasa, **Qz:** Cuarzo.

Las rocas tonalíticas en el interior el plutón se caracterizan por ser de grano medio y tener una foliación bien definida por los minerales máficos (hornblenda y biotita; Figura 27a). En contraste con la granodiorita, esta unidad arroja valores bajos de susceptibilidad magnética, con un valor promedio de 0.33×10^{-3} SI. Petrográficamente, la muestra 6-III-24 es holocristalina de grano medio a grueso con texturas mirmequíticas y pertíticas en los feldespatos potásicos (Figura 27 b y c).

Hacia el oeste de la localidad La Huerta (Figura 6a) se encuentra un *stock* que en las imágenes Google Earth tiene aspecto concéntrico y ocuparía la porción central del conjunto de plutones La Huerta. En las imágenes satelitales son visibles diques anulares aparentemente máficos que podrían definir los bordes del intrusivo. Dichos diques, por su coloración, podrían también pertenecer al Enjambre de Diques San Marcos.

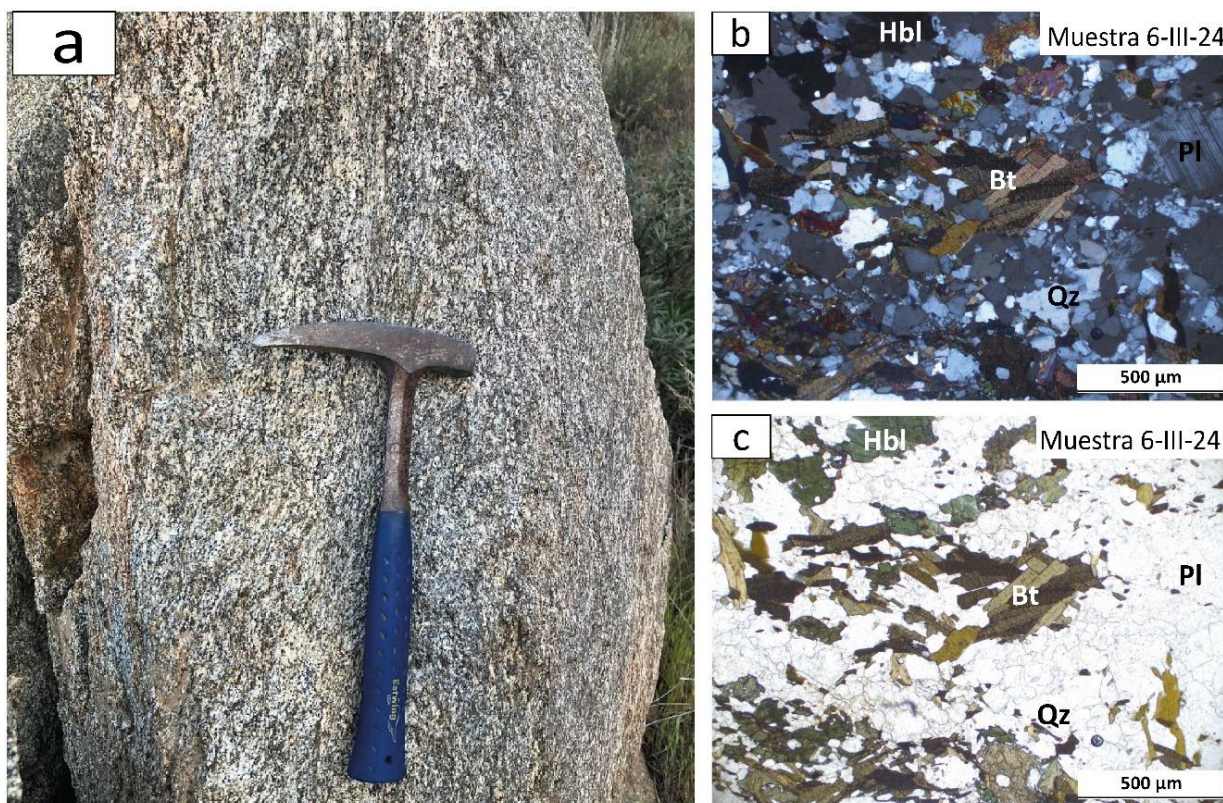


Figura 27. a) Afloramiento de tonalita del interior del plutón La Huerta, sitio de toma de la muestra 6-III-24. Tonalita de hornblenda- biotita de grano grueso. b) y c) Microfotografías de láminas delgadas de tonalita de hornblenda y biotita vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, se observa una foliación bien desarrollada por los minerales máficos y félsicos. Abreviaturas: **Bt:** Biotita, **Hbl:** Hornblenda, **Pl:** Plagioclase, **Qz:** Cuarzo.

Cerca del núcleo del intrusivo, un afloramiento de granito de dos micas contiene abundante biotita en agregados cumulíticos subredondeados (Figura 28a; muestra 7-III-24) el cual arroja valores muy bajos de susceptibilidad magnética, con un promedio 0.11×10^{-3} SI. Bajo el microscopio la textura es holocristalina de grano medio con biotita y muscovita, donde resaltan las texturas gráficas en los feldespatos potásicos (Figura 28b y c). Por último, se muestreó un dique al suroeste del plutón compuesto La Huerta (muestra 1-III-24), el cual tienen una composición de granodiorita de biotita con textura porfídica en muestra de mano y valores de susceptibilidad bajos (con un promedio de 0.109×10^{-3} SI; Figura 29a). Petrográficamente contiene fenocristales de plagioclase (andesina), biotita y cuarzo, algunos de ellos muestran textura mirmequítica, los cristales de biotita tienen un hábito subhedral y alargado y algunas plagioclases muestran zonamiento, su matriz es de grano fino compuesta por plagioclase y biotita (Figura 29b y c).

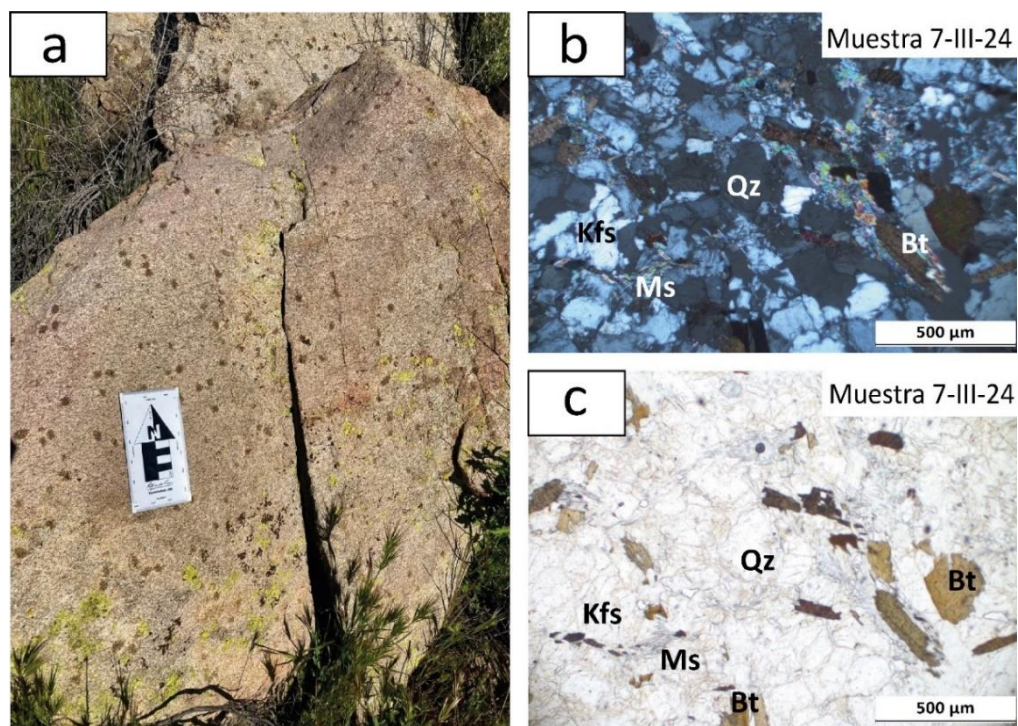


Figura 28. a) Granito de dos micas en la parte central del plutón La Huerta, muestra 7-III-24 vista en afloramiento, donde resaltan cúmulos máficos subredondeados formados principalmente por biotita. b) y c) Microfotografías de lámina delgada de granito de dos micas (biotita y muscovita) de grano medio vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, Abreviaturas: **Bt:** Biotita, **Kfs:** Feldespato potásico, **Ms:** Muscovita.

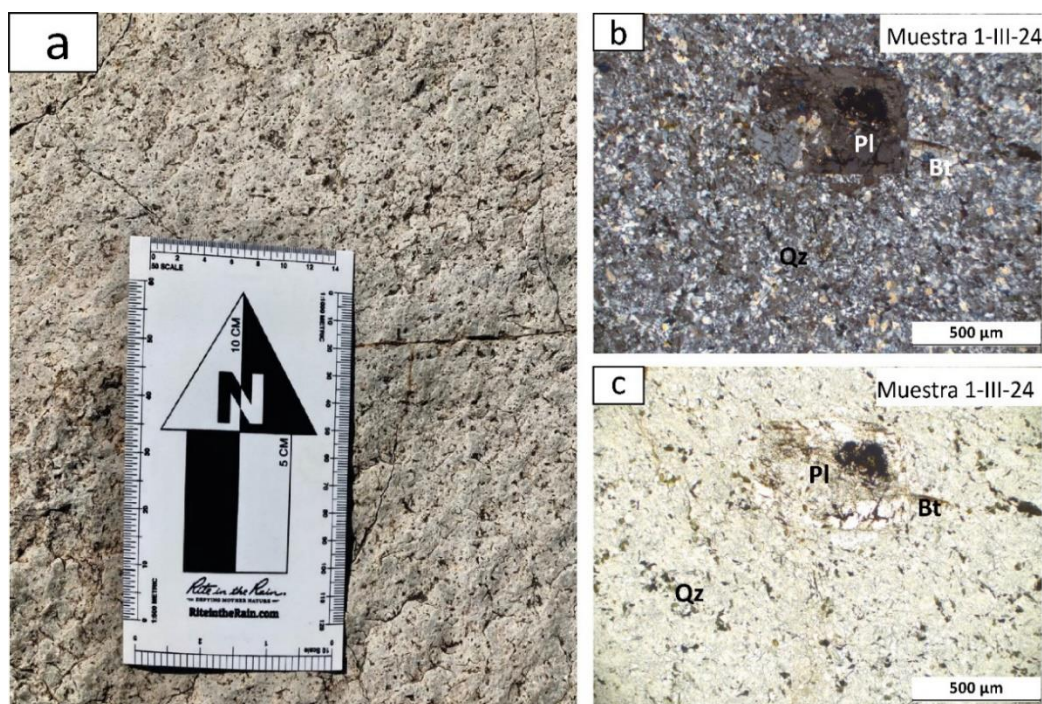


Figura 29. a) Dique granodiorítico con textura porfídica en el sitio de toma de la muestra 1-III-24, al oeste del plutón La Huerta. b) y c) Secciones delgadas vistas en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, se observan fenocristales de plagioclasa, biotita y cuarzo, su matriz es de grano fino compuesta por minerales de plagioclasa y biotita. Abreviaturas: **Bt:** Biotita, **Pl:** Plagioclasa, **Qz:** Cuarzo.

3.1.2.3 Plutón Los Cascabeles

En el suroeste del Valle de Ojos Negros aflora un plutón de aproximadamente 6 km de diámetro aquí denominado Los Cascabeles. De éste, se muestreo la parte norte, a la altura del poblado de Real del Castillo Nuevo, en donde aflora discontinuamente intrusionando a metandesitas de la Formación Santiago Peak (Figura 6).

Además, las rocas metamórficas están intrusionadas por un enjambre de diques con orientación preferencial NNW-SSE y que posiblemente sean parte del Enjambre de Diques San Marcos y que son evidentes en las imágenes de Google Earth. Esta porción norte del plutón Los Cascabeles es más joven que dicho enjambre y su composición es predominantemente diorítica, según se muestra en la gráfica QAP (Le Maitre et al., 2002) de la Figura 30 y en la síntesis petrográfica de la Tabla 7.

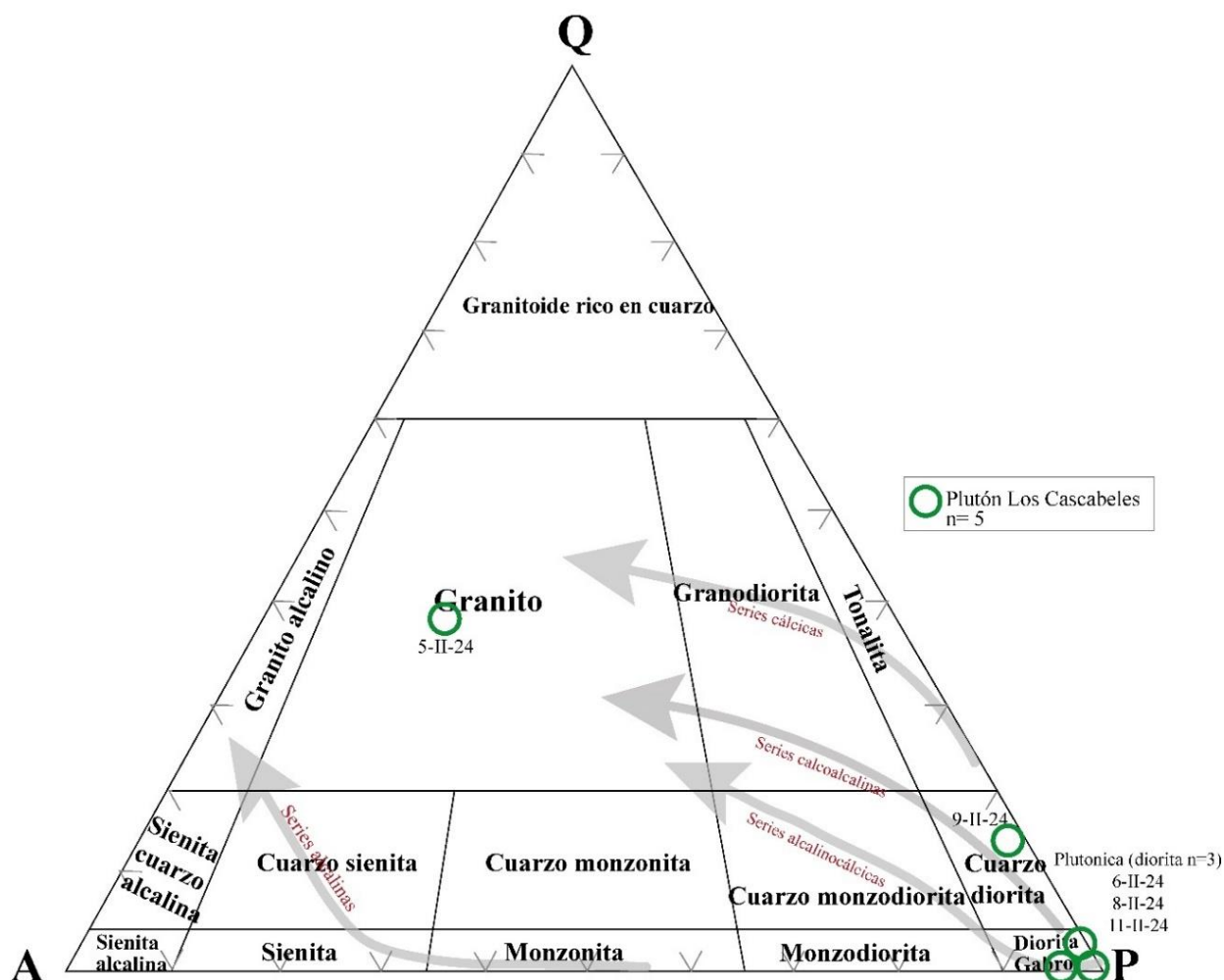


Figura 30. Diagrama de clasificación modal cuarzo-feldespato alcalino- plagioclasa (QAP; Le Maitre et al., 2002) de las muestras intrusivas del plutón Los Cascabeles (con base en el conteo modal de 363 puntos). Series composicionales para rocas plutónicas de acuerdo con Frost y Frost (2008).

Tabla 7. Síntesis petrográfica de las rocas plutónicas y diques del plutón Los Cascabeles.

Muestra	Coordenadas		Clasificación petrográfica	Composición modal								Observaciones
	Latitud	Longitud		Qz	Kfs	Pl	Hbl	Cpx	Bt	Op	Total	
5-II-24	564830	3530462	Granito de biotita	35.2	40.4	16.9	0.0	0.0	7.5	0.0	100	Holocristalina subhedral a anhedral de grano medio, destacan las texturas pertíticas en feldespatos potásicos, las plagioclasas tienen hábitos subhedrales y frecuentemente muestran maclas polisintéticas. Pl: Oli-And, QAP: 38, 44, 18
6-II-24	564744	3530335	Diorita de hornblenda	0.0	0.0	54.4	32.6	3.0	0.0	10.0	100	Holocristalina, anhedral, de grano medio, hornblendas tremolitizadas con hábito fibroso, algunos clinopiroxenos epidotizados y abundantes minerales opacos. Pl: And, QAP: 0,0,100
8-II-24	564478	3529109	Diorita de hornblenda	0.0	0.0	53.9	43.3	2.2	0.0	0.60	100	Holocristalina, los cristales tienen hábitos euhedrales a subhedrales de grano medio, presenta hornblenda verde con hábito euhedral. Pl: And, QAP: 0,0,100
9-II-24	564834	3531216	Cuarzodiorita de hornblenda	10.0	0.0	57.0	28.3	3.7	0.0	1.0	100	Holocristalina, hipidiomórfica de grano medio, cuarzo intersticial y opacos en hornblendas. Pl: And, QAP: 15,0,85
11-II-24	564834	3531216	Diorita de hornblenda	0.0	0.0	50.5	49.1	0.0	0.0	0.4	100	Holocristalina, anhedral de grano medio, la Hbl tiene hábitos euhedrales y subhedrales, las plagioclasas muestran maclas polisintéticas y zonamiento. Pl: And-Lab, QAP: 0,0,100
7-II-24	564478	3529109	Dique de diorita	-	-	-	-	-	-	-	-	Holocristalina, anhedral de grano medio a fino, plagioclasas con maclas polisintéticas y zonación, saussuritización selectiva, es común que Hbl y Cpx estén tremolitizadas, los minerales opacos son secundarios y anhedrales. Pl: And-Lab
10-II-24	564834	3531216	Dique de tonalita de biotita	-	-	-	-	-	-	-	-	Hipocristalina, porfídica la sección muestra plagioclasas que se extiende a la matriz de aspecto vítreo recrystalizado, es abundante la biotita parcialmente alterada. Pl: Oli-And
12-II-24	563898	3533245	Dique de diorita	-	-	-	-	-	-	-	-	Porfídica, muestra saussuritización intensa (clinozoisita epidota) de plagioclase en matriz y en fenocristales, es común observar epidota en vetillas y clorita en bordes de plagioclasas, se exhiben trazas de biotitas y Hbl epidotizada. Pl: And
12-III-24	564712	3530205	Dique de diorita de hornblenda	-	-	-	-	-	-	-	-	Textura hipidiomórfica con fenocristales subhedrales. Plagioclasas con maclas polisintéticas, los anfíboles están parcialmente tremolitizados, y son comunes los minerales opacos. Pl: And
13-III-24	564830	3531258	Dique de andesita	-	-	-	-	-	-	-	-	Porfídica, con fenocristales y matriz compuestos por Pl y hornblenda. Los fenocristales de And presentan maclas polisintéticas. Son comunes la epidota, clinozoisita y cuarzos secundarios. Pl: And

Abreviaturas: **And:** Andesina, **Bt:** Biotita, **Cpx:** Clinopiroxeno, **Hbl:** Hornblenda, **Kfs:** Feldespato potásico, **Lab:** Labradorita, **Ms:** Muscovita, **Oli:** Oligoclase, **Op:** Opacos, **Pl:** Plagioclase, **Qz:** Cuarzo. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

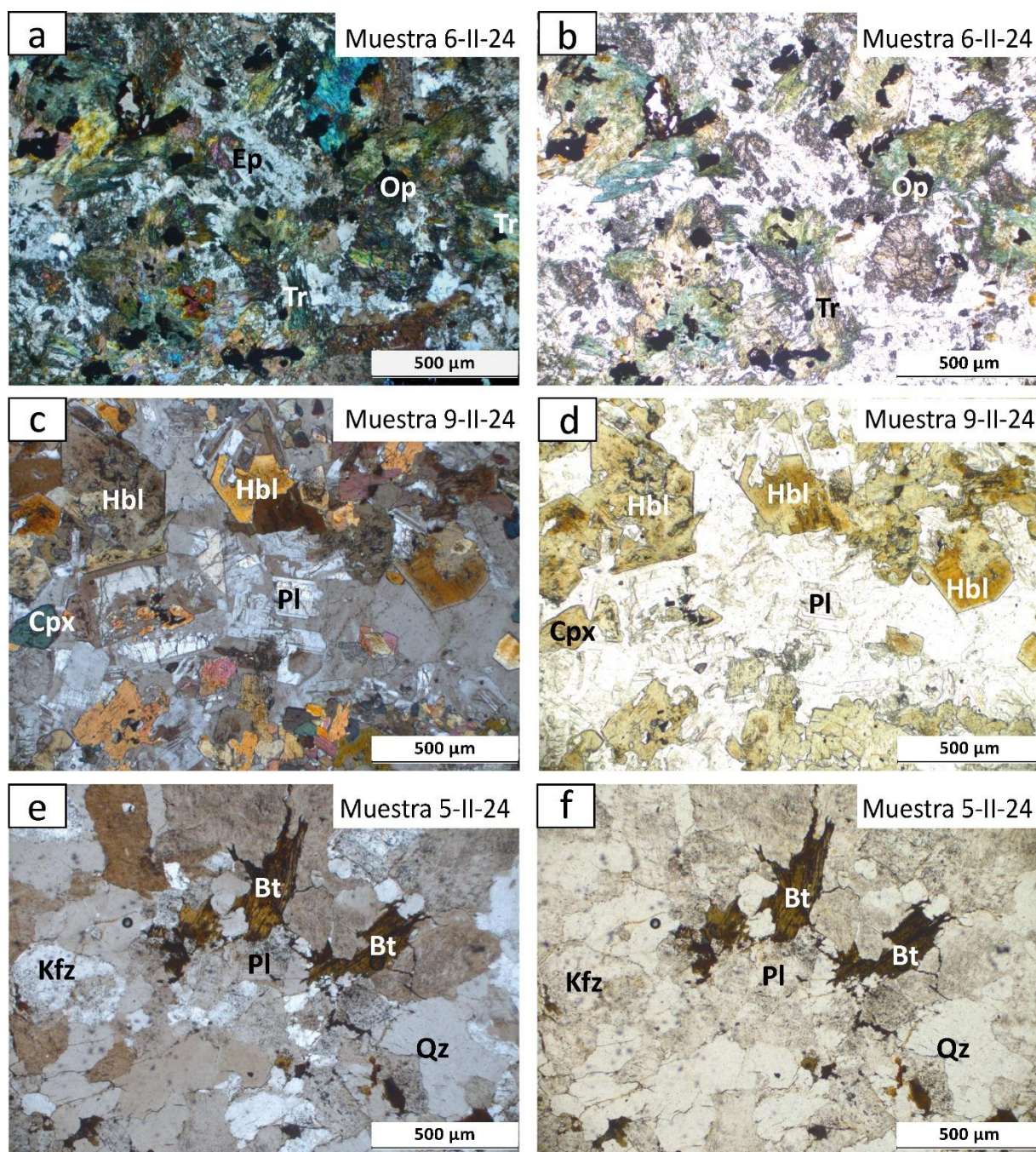


Figura 31. Microfotografías de láminas delgadas del plutón Los Cascabeles. a) y b) Muestra 6-II-24 de diorita de hornblenda vista en luz polarizada plana y cruzada, se observan hornblendas tremolitizadas, con un hábito fibroso. c) y d) Cuarzodiorita de hornblenda de grano medio de la muestra 9-II-24 vista en luz polarizada plana y cruzada, las plagioclasas subhedrales son de composición andesina. e) y f) Granito de biotita vista en luz polarizada plana y cruzada, se observa una textura holocristalina de grano medio y algunas veces pertitas. Las biotitas muestran un hábito subhedral a xenomórfico. Abreviaturas: **Bt**: Biotita, **Cpx**: Clinopiroxeno, **Hbl**: Hornblenda, **Kfs**: Feldespato Potásico, **Pl**: Plagioclasea, **Qz**: Cuarzo, **Tr**: Tremolita.

Las dioritas son de grano medio a grueso y en la mayoría de los sitios de medición los valores de susceptibilidad magnética son altos, con valores promedio de hasta de 11.161×10^{-3} SI. Al microscopio los

cristales muestran hábitos subhedrales a anhedrales. Localmente, las hornblendas y los clinopiroxenos están tremolitizados y muestran un hábito fibroso; los óxidos de Fe-Ti son abundantes (muestra 6-II-24; Figura 31a y b). Los diques que se distribuyen a lo largo de la zona de muestreo, son de diferentes composiciones, se analizaron cinco de ellos (Anexo B), siendo los diques dioríticos los más dominantes (Tabla 7).

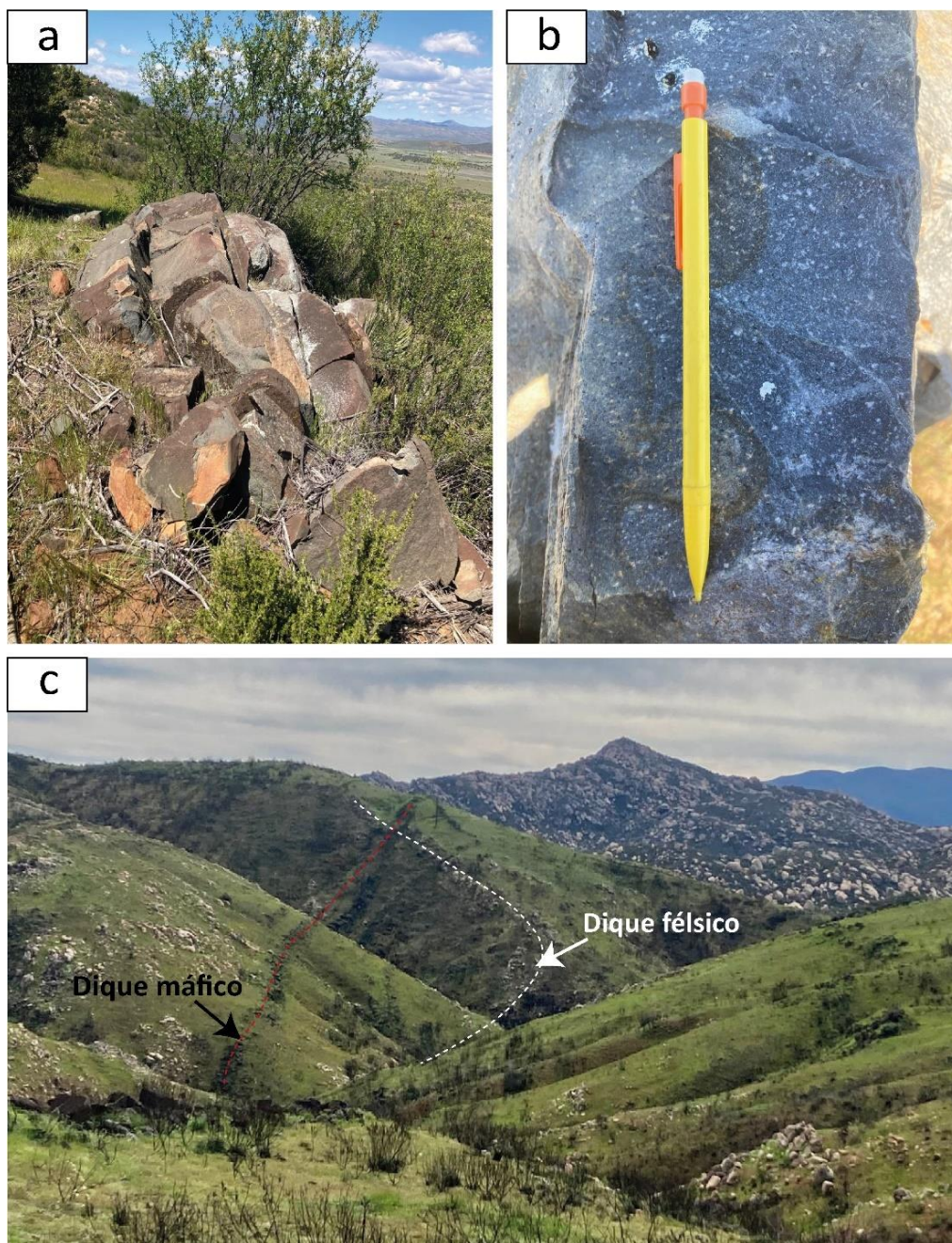


Figura 32. a) Dique diorítico con textura porfídica y fenocristales de plagioclasa del plutón Los Cascabeles, cortando rocas principalmente dioríticas (sitio de muestra 12-II-24). b) Dique de andesita de la muestra 13-III-24 con textura porfídica, en donde los fenocristales de plagioclasa marcan la foliación. c) Diques de diferentes composiciones aparentemente contemporáneos, señalados con líneas discontinuas, el dique máfico, corresponde a la muestra diorítica 7-II-24.

La muestra 12-II-24 contiene una textura porfídica (Figura 32a) y bajo el microscopio presenta saussuritización intensa de plagioclasas en la matriz y en fenocristales, es común observar epidotas en vetillas y clorita en los bordes de las plagioclasas, que son de composición andesina y trazas de biotitas (Figura 33 a y b). Al sur de la zona de muestreo se observa dos diques de diferentes composiciones aparentemente contemporáneos (Figura 32c), donde el dique máfico corresponde a la muestra diorítica 7-II-24, la cual está formada por cristales con hábito anhedral, plagioclasas saussuritizadas de composición labradorita-andesina y óxidos de Fe-Ti secundarios (Figura 33c y d).

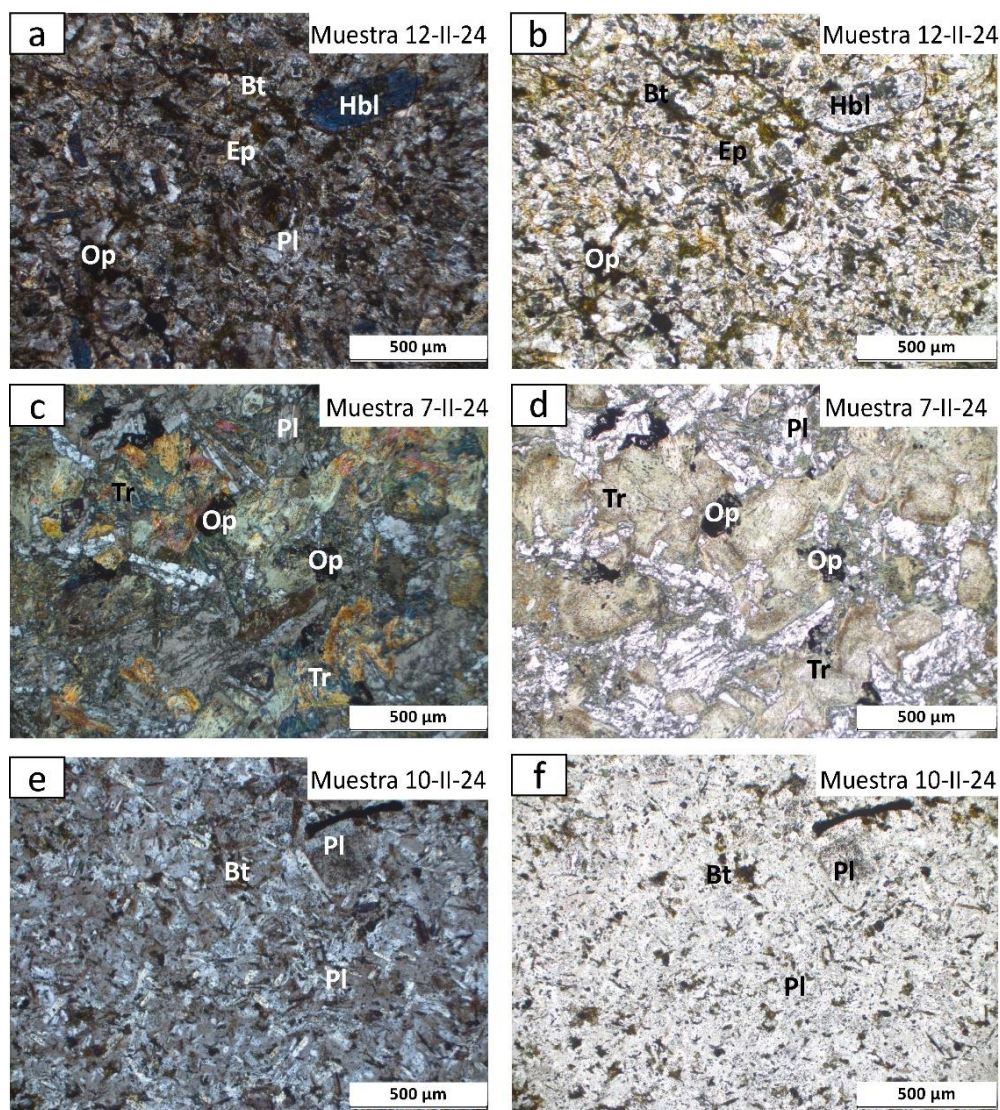


Figura 33. Microfotografías de láminas delgadas de diques que intrusionan al plutón Los Cascabeles. a) y b) Muestra 12-II-24 vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, presenta textura porfídica, además de fenocristales de hornblenda epidotizados y plagioclasas de composición andesina. c) y d) La muestra 7-II-24 (dique diorítico) vista en luz polarizada plana y cruzada, presenta cristales de clinopiroxenos y hornblenda tremolitizados con textura fibrosa y abundantes óxidos de Fe secundarios. e) y f) Muestra 10-II-24 (dique tonalítico) visto en luz polarizada plana y cruzada, compuesto por cristales de plagioclase de composición oligoclase-andesina y una matriz de aspecto vítreo recrystalizado. Abreviaturas: **Bt**: Biotita, **Ep**: Epidota, **Hbl**: Hornblenda, **Op**: Opacos, **Pl**: Plagioclase, **Qz**: Cuarzo, **Tr**: Tremolita.

Se observó un dique andesítico al sur de la zona de muestreo (muestra 13-III-24), en muestra de mano es visible su textura porfídica, en donde los fenocristales de plagioclasas definen la orientación de foliación (Figura 32b) y microscópicamente los fenocristales de plagioclasa andesina presentan maclas polisintéticas, siendo comunes los cristales de hornblenda, epidota y cuarzo secundario. Por último, se muestreó un afloramiento de dique tonalítico de la muestra 10-II-24, bajo el microscopio presenta una textura porfídica, en donde las plagioclasas de composición oligoclasa-andesina componen una matriz de aspecto vítreo recrystalizado, con abundantes las biotitas parcialmente alteradas a epidota (muestra 33e y f).

Se muestreó un afloramiento de rocas plutónicas cuarzodioríticas, al oeste de la comunidad Real del Castillo Nuevo (muestra 9-II-24). Bajo el microscopio tiene una mineralogía compuesta por hornblendas, plagioclasas de composición andesina, clinopiroxenos y abundante cuarzo intersticial.

Por último, se estudió un afloramiento plutónico de granito de biotita (muestra 5-II-24) con tamaño de grano medio y valores de susceptibilidad muy bajos (0.075×10^{-3} SI). Petrográficamente, los cristales tienen hábitos de subhedrales a anhedrales de grano medio, destacan pertitas y las plagioclasas de composición oligoclasa-andesina muestran maclas polisintéticas.

3.1.2.4 Plutón El Alamar

Al suroeste del Valle de Ojos Negros se reconoció un plutón de más de 5km de diámetro, denominado El Alamar, en imágenes de Google Earth se identificaron por lo menos dos estructuras circulares dentro de él, que podrían estar asociados con pulsos discretos. Además, se reconoció un enjambre de diques de composición aparentemente máfica con dirección NE-SW. La síntesis petrográfica se presenta en la Tabla 8. Un sitio de muestreo en la periferia del plutón permitió conocer su composición granodiorítica, según el diagrama QAP (Figura 34; muestra 15-III-24). Bajo el microscopio, esta muestra presenta hábitos mayoritariamente subhedrales y una mineralogía compuesta por plagioclasas de composición oligoclasa-andesina, cristales de microclina y abundantes biotitas (Figura 35a y b).

Se documentó una muestra de dique (muestra 14-III-24), el cual tiene variaciones texturales en los bordes con cristales pequeños (textura afanítica; Figura 36a) y en el centro con cristales grandes (textura fanerítica; Figura 36b). Dicha variación es asociada con el gradiente de temperatura (ΔT), mientras que el cuerpo se enfría, disminuye progresivamente su ΔT y los cristales aumentan de tamaño, mientras que los bordes se comportan como una barrera térmica, teniendo un ΔT grande y cristales pequeños.

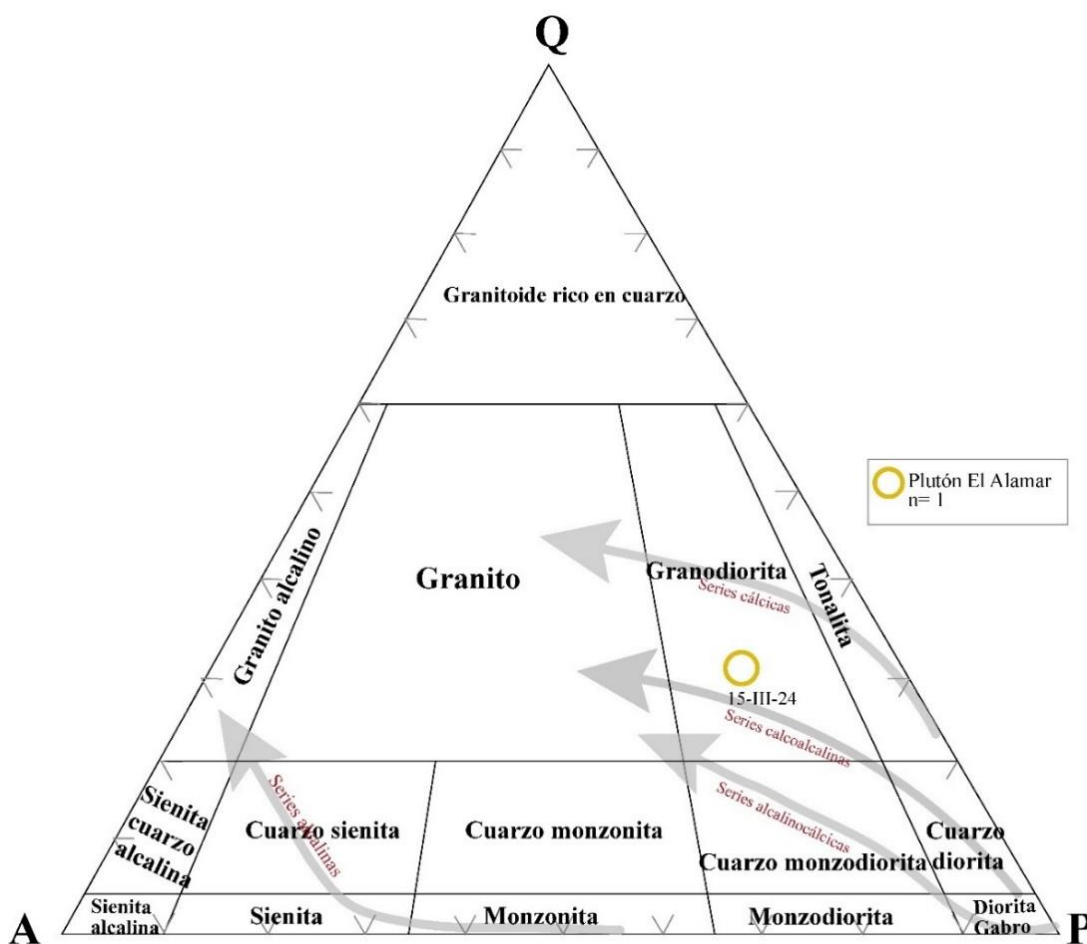


Figura 34. Diagrama de clasificación modal cuarzo-feldespato alcalino- plagioclasa (QAP; Le Maitre et al., 2002) de las muestras intrusivas del plutón El Alamar (con base en el conteo modal de 363 puntos). Series composicionales para rocas plutónicas de acuerdo con Frost y Frost (2008).

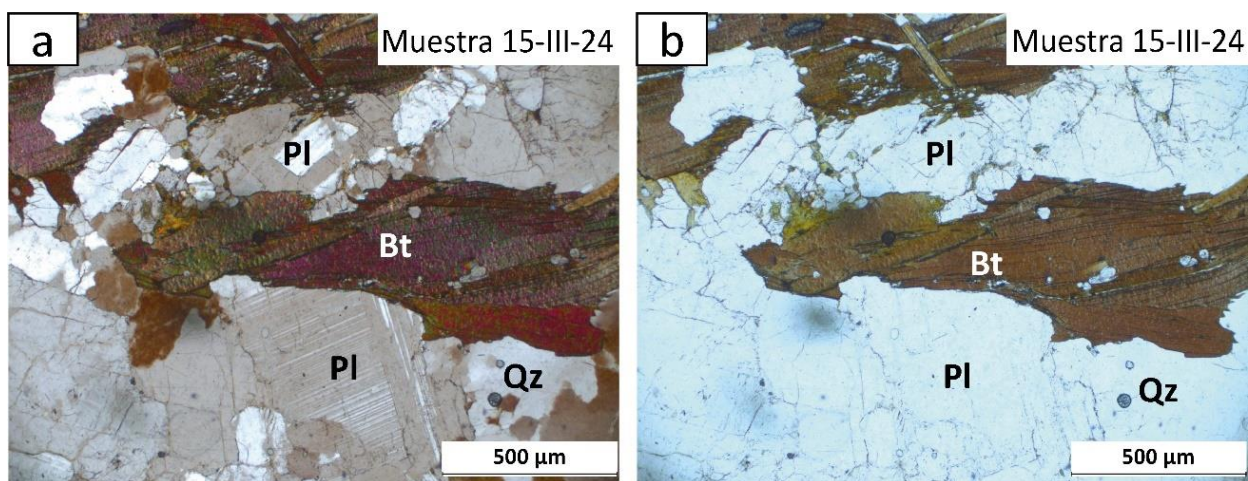


Figura 35. a) y b) Microfotografía de una granodiorita de biotita vista en luz polarizada plana y cruzada (muestra 15-III-24) de grano grueso con textura subhedral del plutón El Alamar. Abreviaturas: **Bt**: Biotita, **Pl**: Plagioclase, **Qz**: Cuarzo.

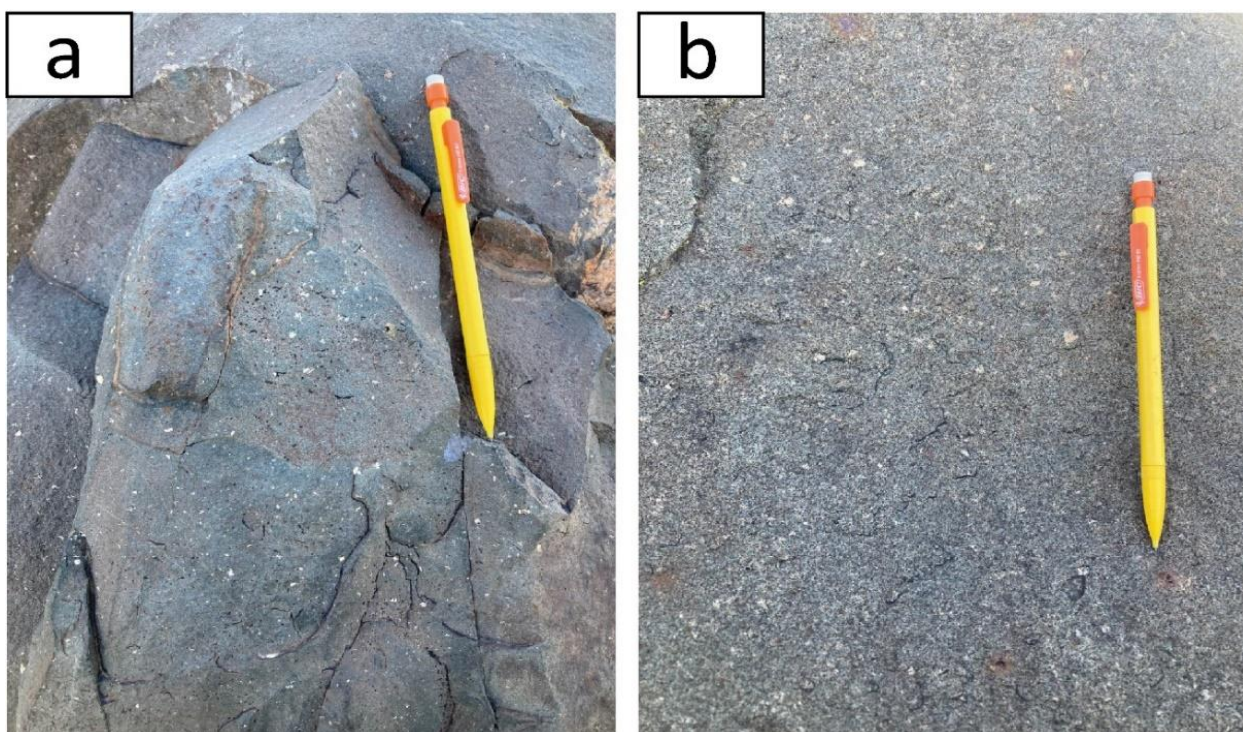


Figura 36. Afloramientos del dique cuarzodiorítico que intrusióna al plutón El Alamar con variaciones texturales en el centro y en sus bordes, a) Periferia del dique, con textura porfídica y fenocristales de plagioclasa. b) Centro del dique, que presenta textura fanerítica.

Petrográficamente, la muestra 14-III-24 es clasificada como una cuarzodiorita, los minerales de hornblenda se encuentran tremolitizados y muestran una textura fibrosa, se observan además minerales de epidota, clinozoisita y son frecuentes óxidos de Fe-Ti con hábito xenomórfico (Figura 37a y b).

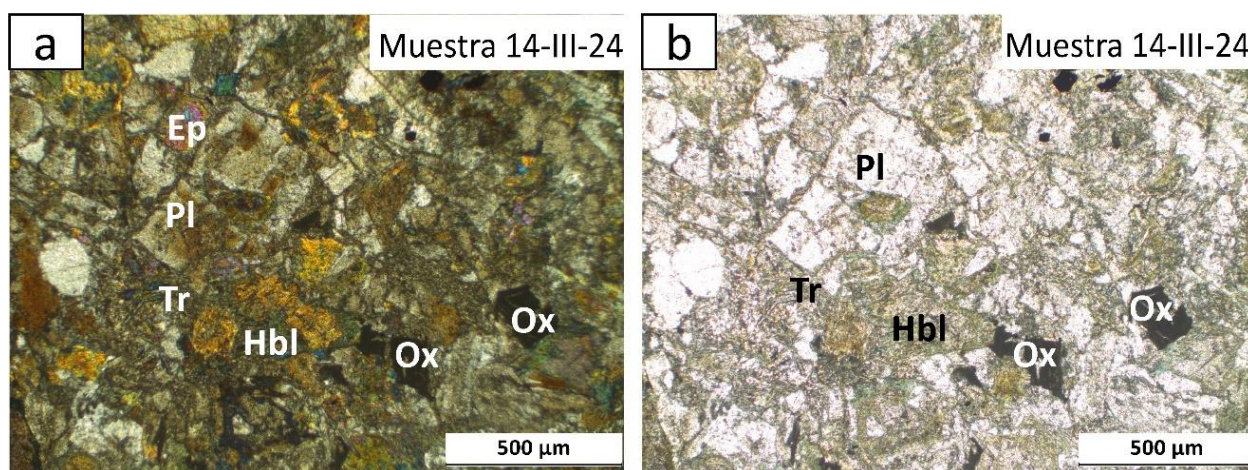


Figura 37. a) Microfotografías de lámina delgada del dique del plutón El Alamar vista en luz polarizada plana y cruzada respectivamente, correspondiente a una cuarzodiorita de hornblenda (muestra 14-III-24) parcialmente tremolitizadas con una textura fibrosa y óxidos de Fe dispersos con hábito subhedral. Abreviaturas: **Ep**: Epidota, **Hbl**: Hornblenda, **Ox**: Óxidos de Fe, **Pl**: Plagioclasa, **Tr**: Tremolita.

Tabla 8. Síntesis petrográfica de las rocas plutónicas y diques del plutón El Alamar.

Muestra	Coordenadas		Clasificación petrográfica	Composición modal					Observaciones
	Latitud	Longitud		Qz	Kfs	Pl	Bt	Total	
15-III-24	569047	3523382	Granodiorita de biotita	29.4	16.2	49.8	4.6	100	Holocristalina, hipidiomórfica de grano grueso. Kfs= microclina, las plagioclasas tienen hábito subhedral. Pl: Oli-And, QAP:31,17,52
14-III-24	568856	3523160	Dique de cuarzodiorita de hornblenda	-	-	-	-	-	Holocristalina, con hornblendas tremolitizadas fibrosas, clinozoisita y epidota. Contiene óxidos de Fe en hábitos euhedrales y subhedrales.

Abreviaturas: **And:** Andesina, **Bt:** Biotita, **Kfs:** Feldespato potásico, **Oli:** Oligoclasa, **Pl:** Plagioclasa, **Qz:** Cuarzo.
Coordenadas: WGS 84/ UTM zona 11.

3.2 Geología estructural

Por medio de imágenes de Google Earth, se interpretaron cuerpos plutónicos a partir de lineamientos curvilíneos. Se observa que algunos plutones son cuerpos individuales (p.ej. plutón Los Cascabeles y plutón El Alamar), pero es común que formen cuerpos de aspecto anidado, como en el caso de los plutones Timoteo y El Barbón y el conjunto de plutones La Huerta. Estos rasgos curvilíneos, intrusionan y afectan a las rocas encajonantes del Complejo Bedford Canyon y la Formación Santiago Peak, por lo que se incluyen como parte del Cinturón Batolítico Peninsular (Figura 38). Regionalmente, los rasgos morfológicos más importantes son los rectilíneos asociados con el Enjambre de Diques San Marcos y que según Farquharson (2004) se extienden aproximadamente 100 km desde el sur de San Diego, hasta el norte de la falla Agua Blanca en Baja California.

El área de estudio se encuentra delimitada por los sistemas de fallas activas San Miguel- Vallecitos, Tres Hermanos y Ojos Negros, de las cuales se tiene registro histórico con actividad sísmica $0.2 \leq M \leq 4.0$ (Frez et al., 2000). Estos autores, a partir de mediciones de paleosismicidad en el sistema San Miguel sugieren desplazamientos de aproximadamente 0.05 a 0.55 mm/año. En esta sección se documentan los rasgos estructurales de las secuencias de basamento en el Complejo Bedford Canyon y en la Formación Santiago Peak, así como los rasgos asociados con el emplazamiento de los plutones. Para lograr los objetivos mencionados se describieron los lineamientos interpretados a partir de imágenes de Google Earth y el software Qgis, se analizaron las foliaciones magmáticas y metamórficas y se efectuó un análisis cinemático de cizallas para discriminar su asociación con eventos tectónicos antiguos de los activos.

3.2.1 Análisis de foliaciones y lineaciones

Las rocas que han sido deformadas normalmente desarrollan fábricas planares y lineales. El término general para la fábrica de deformación planar en las rocas es la foliación (Davis et al., 2012) que, según Twiss y Moores (2007), se distribuye a través del volumen de rocas. En rocas ígneas intrusivas la foliación suele desarrollarse durante el flujo del material magmático, el cual se produce por el movimiento del fundido viscoso entre cristales rígidos en suspensión (Best, 2003) y uno de sus principales marcadores según Patterson et al. (1989), es la orientación preferencial de los minerales primarios (comúnmente prismáticos) sin evidencia de deformación plástica o recrystalización. En contraste, en las rocas metamórficas las foliaciones se desarrollan generalmente paralelas al plano de adelgazamiento o al eje máximo de deformación, mientras que las lineaciones pueden tener diferentes relaciones geométricas con el patrón de deformación dependiendo de su naturaleza y origen (Twiss y Moores, 1992). Es frecuente que la lineación sea paralela a la dirección de extensión o al eje máximo de deformación. En esta sección se describen los resultados de los análisis de las foliaciones y de lineaciones, los cuales fueron agrupados con base en dominios estructurales.

3.2.1.1 Foliationes en las rocas encajonantes

En el mapa estructural de la Figura 38 se muestran las variaciones en la tendencia de la foliación de las rocas metasedimentarias del Complejo Bedford Canyon y las rocas metaígneas de la Formación Santiago Peak. Las foliaciones en las rocas metasedimentarias se indican en azul y los de las rocas metaígneas en verde. Las rocas metasedimentarias que se encuentran como techos del plutón El Barbón son metasamitas y metapelitas metamorfizadas en facies desde esquistos verdes hasta anfibolita inferior con orientaciones de foliación variables (Figura 38b). Las foliaciones al sur del plutón El Barbón (PEB, Figura 38c [1 y 2]) se orientan NW-SE y coinciden con el borde del plutón.

Hacia el interior del plutón, las foliaciones están basculadas con buzamiento opuesto a la posición del cuerpo granodiorítico (Grd en la Figura 38b [3]), hacia el NE. En la misma zona se observa un cuerpo ígneo máfico rico en clinopiroxeno paralelo a la estratificación y cuya foliación es similar a la de las metasamitas (Figura 38c [4]). Las foliaciones hacia el norte de los sitios 3, en el plutón El Barbón buzan hacia el SE y es probable que su orientación esté influenciada por efecto del emplazamiento de los plutones El Barbón y Timoteo (Figura 38b).

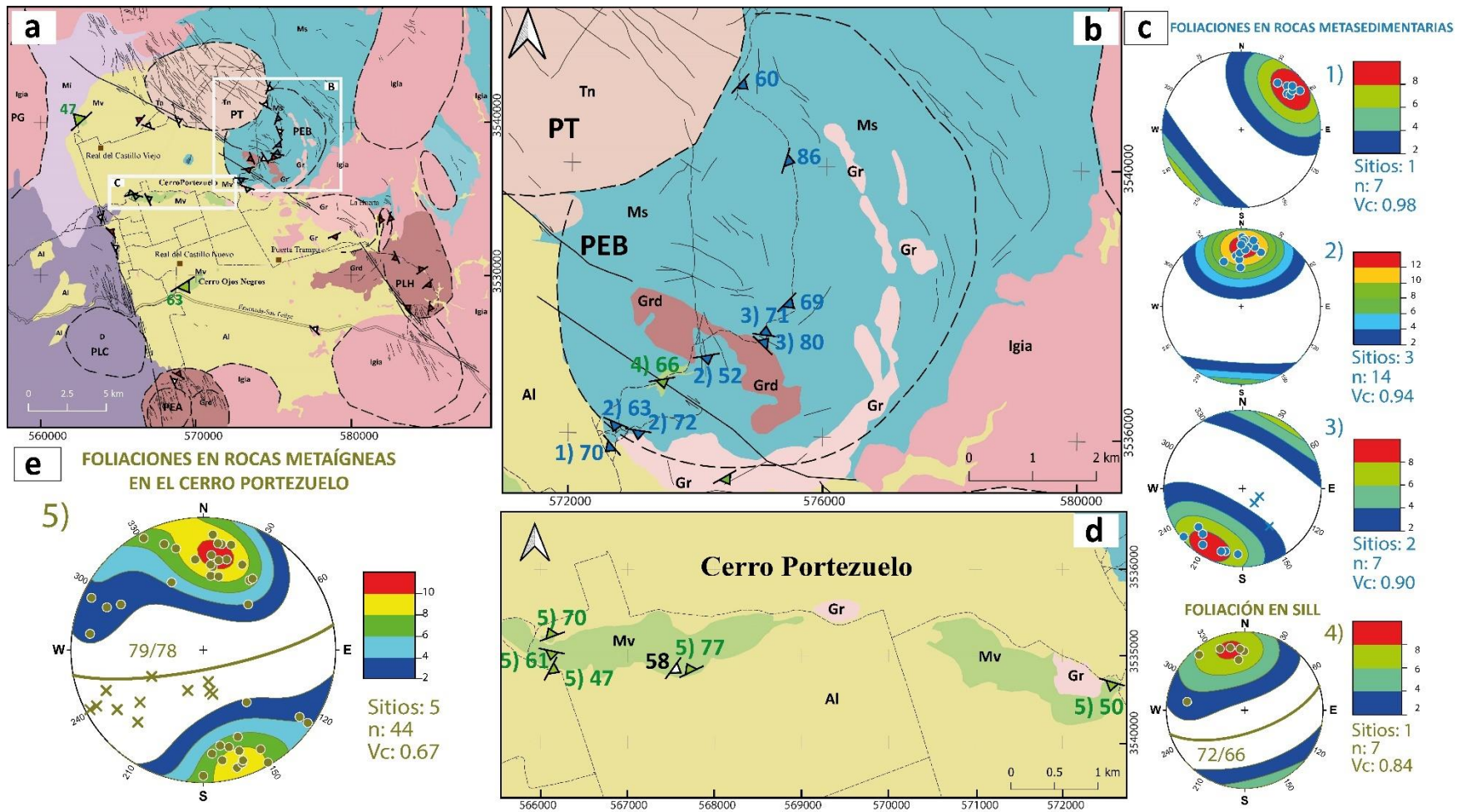


Figura 38. a) Mapa geológico que muestra las foliaciones de las rocas encajonantes del área de estudio. b) Acercamiento al plutón El Barbón con las foliaciones en rocas metasedimentarias (en color azul) asociadas al Complejo Bedford Canyon. c) Estereogramas de densidad de polos de planos de foliación que se presentan con los contornos de Kamb (%) y lineaciones de rocas metasedimentarias, además se presenta el estereograma para la foliación en un sill que se encuentra en el área del Babón, este cuerpo es asociado a la Formación Santiago Peak. d) Acercamiento al cerro El Portezuelo, que muestra las foliaciones en rocas metaígneas asociado con la Formación Santiago Peak y e) estereogramas de densidad de polos de planos de foliación que presentan los contornos de Kamb (%) y lineaciones de rocas metaígneas de la Formación Santiago Peak del cerro El Portezuelo (cruces). Abreviaturas: n: Número de datos, PEA: Plutón El Alamar, PEB: Plutón El Barbón, PG: Plutón Guadalupe, PLC: Plutón Los Cascabeles, PLH: Plutón La Huerta, PT: Plutón Timoteo y Vc: Valor de correlación. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

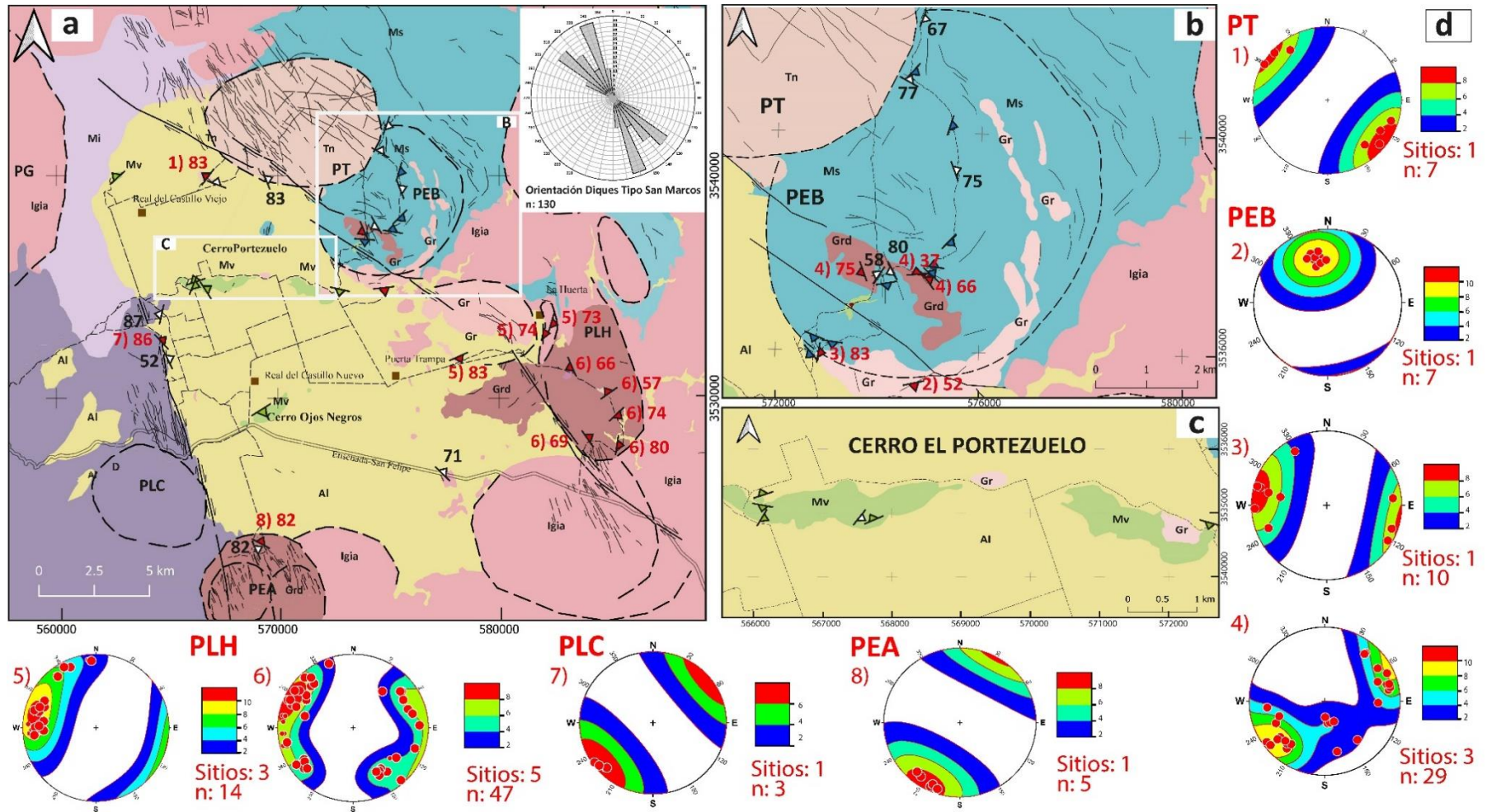


Figura 39. a) Mapa geológico con las foliaciones de las rocas plutónicas. b) Acercamiento al plutón El Barbón, donde se muestran las foliaciones magmáticas en color rojo c) Acercamiento al cerro El Portezuelo y d) Estereogramas que muestran la densidad de polos de planos de foliación en contornos de densidad Kamb para cada plutón analizado. Abreviaturas: n: Número de datos, PEA: Plutón El Alamar, PEB: Plutón El Barbón, PG: Plutón Guadalupe, PLC: Plutón Los Cascabeles, PLH: Plutón La Huerta, PT: Plutón Timoteo. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

Las rocas metaígneas máficas a ultramáficas (clinopiroxenitas) que afloran mayoritariamente en el cerro El Portezuelo están intensamente foliadas y localmente, en el extremo oeste, milonitizadas. Otros afloramientos de rocas máficas metamorizadas con aspecto lávico se observan aislados, hacia el norte del cerro El Portezuelo, cerca de la localidad Real del Castillo Viejo (Figura 38a). La foliación en ese lugar se orienta NE-SW con buzamiento de 47° hacia el NW y, en la entrada a la población de Real del Castillo Nuevo se orienta NE-SW con buzamiento de 63° hacia el SE (Figura 38a). Las foliaciones de los extremos norte y sur del valle podrían definir una estructura de tipo anticlinal donde la zona interna estaría formada por las rocas con metamorfismo más alto del cerro El Portezuelo, el cual se orientaría casi paralelo al plano axial del anticlinal. En el estereograma de la Figura 38e se graficaron las lineaciones de algunos sitios, los cuales indican movimiento lateral e inverso en los planos de foliación.

3.2.1.2 Foliación magmática en los plutones

En la Figura 39 se graficaron en estereogramas las foliaciones magmáticas de los *stocks* que bordean al Valle de Ojos Negros. La mayoría de los diques que intrusionan, tanto a los plutones como a las rocas encajonantes pertenecen al Enjambre de Diques San Marcos que, en esta sección no pudieron discriminarse de otros más jóvenes, como los que se muestran en la Figura 32 donde el dique máfico es del Enjambre de Diques Sa Marcos y el félsico probablemente se asocia al plutón vecino, más joven, que se encuentra hacia el sur. El Enjambre de Diques San Marcos es particularmente notable en el plutón Timoteo.

Dado que no se tuvo acceso al interior del plutón, se identificaron en imágenes de Google Earth los diques máficos contenidos en esa región los cuales, como se muestra en el diagrama de pétalos, tienen una orientación dominante hacia el NW. Del plutón Timoteo solo se tuvo acceso a un sitio, donde la foliación se orienta preferentemente hacia el NE, mientras que la foliación en un dique del mismo sitio se orienta hacia el NW, casi perpendicularmente y similar al Enjambre de Diques San Marcos (Figura 39a y d [1]).

En el plutón El Barbón las foliaciones del borde sur del plutón se orientan perpendiculares entre sí (Figura 39d [2y3]). De acuerdo con la Figura 39d, las foliaciones del inciso 2, E-W es paralela al borde del intrusivo, mientras que las del inciso 3 son NNE en arreglo radial con respecto a la forma del plutón. En el interior del plutón, aproximadamente en el centro de éste, aflora un cuerpo de granodiorita cuya forma se orienta hacia el NW. Las foliaciones medidas en tres sitios, sugieren que los dos sitios tienen foliaciones

más o menos paralelas al cuerpo y su buzamiento es mayor de 65° , mientras que el tercer sitio, perpendicular a los dos primeros y de bajo ángulo sugiere una rotación en un flujo viscoso (Figura 39d [4]).

El conjunto de putones La Huerta cuya composición varía de cuarzodiorita a granito muestra una elongación hacia el NNW (Figura 39a). Para el análisis de las foliaciones se separó el cuerpo granítico del lado oeste, en el cual las foliaciones definen una orientación hacia el NE que seguiría aproximadamente el borde del stock, cerca del poblado La Huerta. El cuerpo principalmente granodiorítico muestra conjuntos de foliaciones subverticales que se orientan NNW y NNE, de forma subparalela al conjunto de *stocks* que se orienta principalmente hacia el NE.

En la parte occidental del valle, el plutón Los Cascabeles es principalmente diorítico e isotrópico en donde no se identificó una tendencia consistente de foliaciones. Al igual que en el plutón Timoteo, los cuerpos del Enjambre de Diques San Marcos son abundantes. En un sitio donde se observa más claramente la foliación, la tendencia obtenida en el diagrama PLC de la Figura 39d [7] es NW-SE, al igual que en el plutón El Alamar localizado hacia el sur (Figura 39d [8]).

3.2.2 Análisis de cizallas

En el área de estudio se analizaron tres zonas con desarrollo de cizallas de naturaleza distinta. La más antigua corresponde a la deformación de las rocas metaígneas de la Formación Santiago Peak en el cerro El Portezuelo, donde, en el extremo oeste se observa el desarrollo de milonita. Las otras dos muestran deformación asociada presumiblemente a fallamiento activo. En la zona El Barbón se encuentra la traza del sistema de fallas San Miguel y en la zona de Los Cascabeles se midió una porción del sistema de fallas Ojos Negros. Los resultados de los análisis cinemáticos de todos los sitios se presentan en la Figura 40 y el mapa estructural con las direcciones de compresión de El Portezuelo en la Figura 41.

Los derrames con textura protomilonítica del sur del poblado de Real del Castillo Nuevo desarrollan planos de cizalla orientados persistentemente hacia el NE con buzamiento al SE (Figura 41a). Las lineaciones en los planos de cizalla definen una dirección hacia el NE que se asocian con deformación por transpresión con eje P (presión) en $186^\circ/14^\circ$. En el cerro El Portezuelo se midieron cizallas en cuatro sitios de la parte central y occidental del cerro. El sitio más oriental es el 30 (Figuras 40a [2] y 41c), en donde los planos orientados NE-SW desarrollan lineaciones con buzamientos de bajo ángulo debidos a desplazamiento de rumbo que resultó de esfuerzos de compresión casi N-S ($P=342^\circ/16^\circ$).

En los sitios 2 y 31, también en la parte central (Figuras 40a [3 y 4] y 41d [1]) se define una zona con deformación asociada con fallamiento inverso (Figura 41c), cuyo vector P se encuentra en $227^{\circ}/12^{\circ}$, mientras que en el sitio 31 las lineaciones subhorizontales contenidas en planos orientados hacia el NE definen fallamiento transcurrente cuyo eje P se encuentra en $200^{\circ}/4^{\circ}$, similar al del sitio vecino.

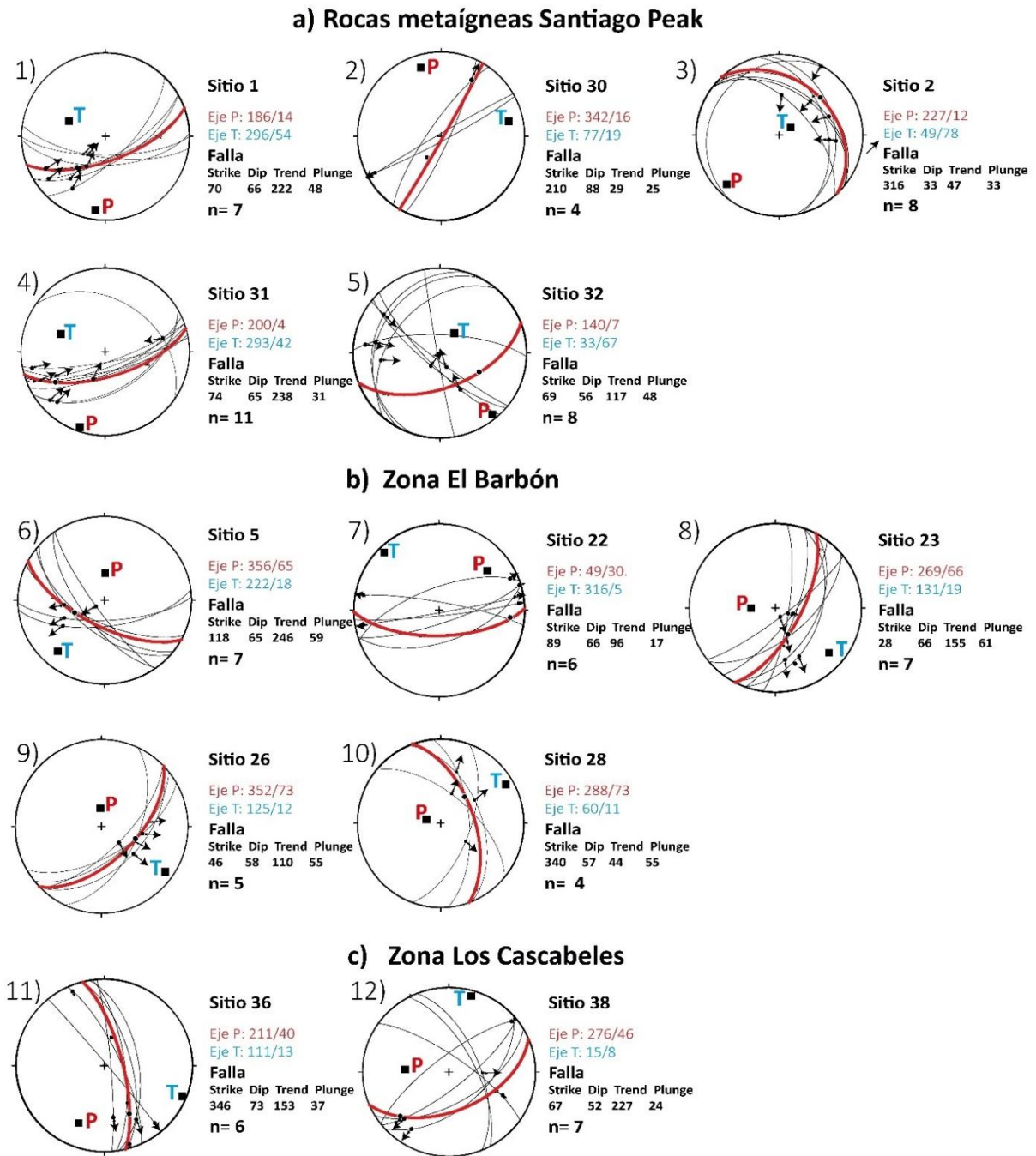


Figura 40. Análisis cinemáticos de sitios en tres zonas del Valle de Ojos Negros. a) Las estructuras de deformación de las rocas metaígneas se asocian con deformación compresiva, la cual es particularmente evidente en el cerro El Portezuelo. b) Soluciones de análisis cinemático para la zona del Barbón medidas en las rocas encajonantes, asociado con el sistema de fallas San Miguel, c) Solución cinemática medidas en las rocas plutónicas de Los Cascabeles, asociada con el sistema fallas Ojos Negros. Donde P es el eje de presión y T el eje de tensión.

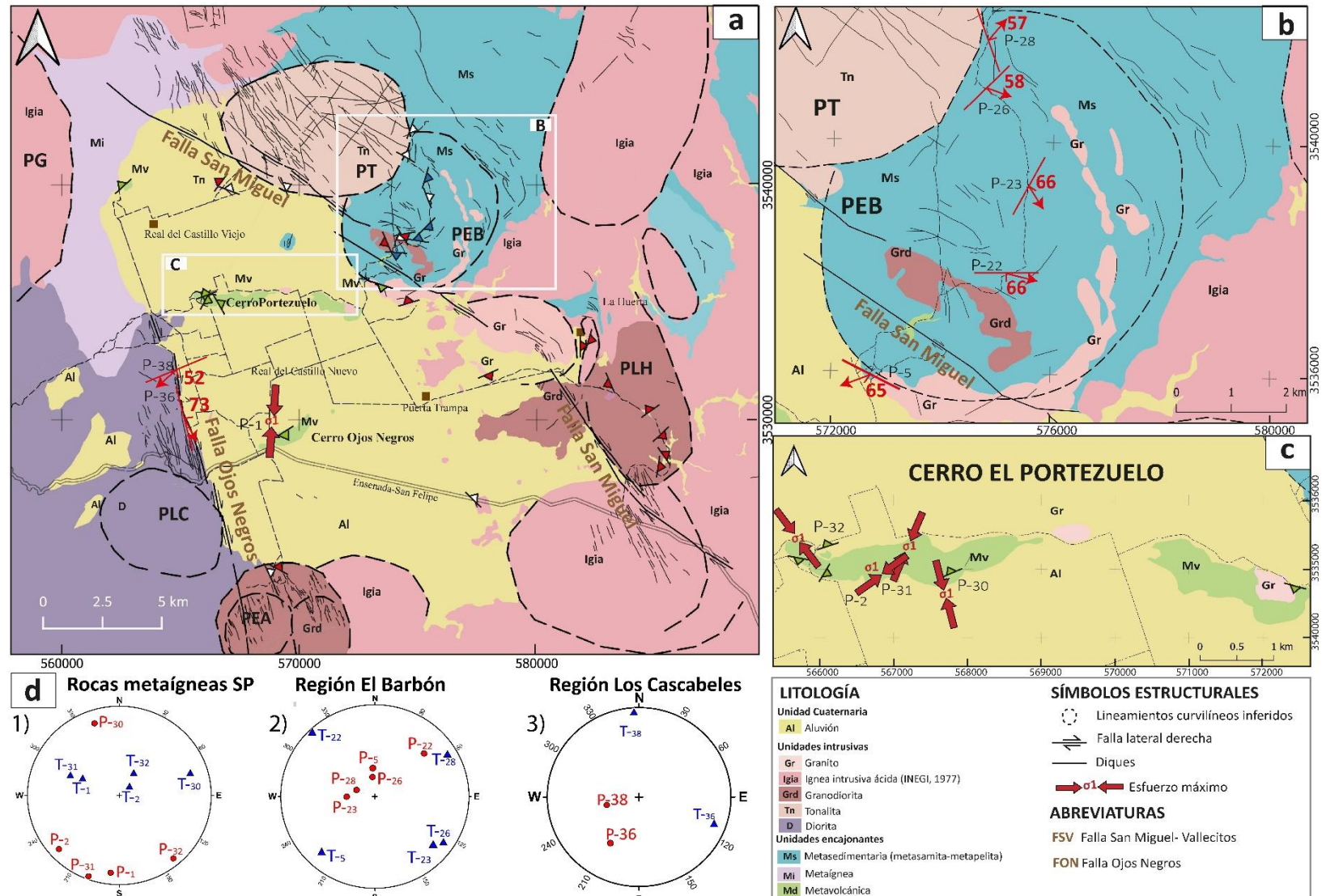


Figura 41. a) Mapa geológico indicando los sistemas de falla San Miguel y Ojos Negros. b) Acercamiento del plutón El Barbón, donde se muestra la dirección de la estría en cada sitio, c) Acercamiento al cerro El Portezuelo, donde se observa los indicadores de esfuerzo máximo (σ_1) de cada sitio. d) Estereogramas para cada zona analizada: cerro El Portezuelo, Plutón El Barbón y Plutón Los Cascabeles, en donde se marca los ejes de presión (P) y tensión (T) respectivamente. Abreviaturas: **PEA:** Plutón El Alamar, **PEB:** Plutón El Barbón, **PG:** Plutón Guadalupe, **PLC:** Plutón Los Cascabeles, **PLH:** Plutón La Huerta y **PT:** Plutón Timoteo. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

El sitio 32 en el extremo occidental del cerro (Figura 40a [5]) tiene una deformación compleja. Las rocas metaígneas están milonitizadas, se observa formación de talco y en los planos de cizalla las lineaciones muestran fallas inversas orientadas NW-SE y de rumbo orientadas NE-SW, las cuales describen una deformación transpresiva cuyo eje P se encuentra en $140^{\circ}/7^{\circ}$. En la Figura 41c-d se muestran los ejes de compresión P obtenidos en las rocas metaígneas que, en conjunto, indican esfuerzos compresivos concordantes entre NNW-SSE y NNE-SSW.

El Valle Ojos Negros está delimitando hacia el este y oeste por las fallas activas San Miguel y Ojos Negros, respectivamente. Al oeste en la región del plutón El Barbón, se midieron planos de cizalla en cinco sitios, los cuales se consideran bajo la influencia del sistema de fallas San Miguel. El sitio P-5 del borde SW del plutón los planos de cizalla son subparalelos a la traza del sistema de falla. La solución cinemática define un plano principal con rumbo de $118^{\circ}/65^{\circ}$ con movimiento hacia $246^{\circ}/59^{\circ}$, que indica una falla normal con componente derecha (Figura 40b[6]). En el cuerpo granodiorítico, del sitio P-22 se obtuvo una solución de seis planos de cizalla que corresponde a una falla de rumbo orientada $89^{\circ}/66^{\circ}$ perpendicular a la foliación magmática promedio del plutón en ese sitio (Figura 40b[7]). Casi en el centro de la estructura plutónica, en el sitio P-23 siete planos de cizalla arrojan una solución para una falla de rumbo derecha orientada $28^{\circ}/66^{\circ}$ con dirección de movimiento hacia $155^{\circ}/61^{\circ}$ (Figura 40b[8]), que es casi igual a la obtenida en el sitio P26, cuyos valores de plano y dirección son $46^{\circ}/58^{\circ}$ - $110^{\circ}/55^{\circ}$. El punto más cercano al plutón Timoteo, P28 corresponde a una falla de rumbo paralela al sistema San Miguel, cuya solución cinemática es $340^{\circ}/57^{\circ}$ y $44^{\circ}/55^{\circ}$ (Figura 40b[10]). De la región del plutón Los Cascabeles (Figura 40c) se midieron cizallas en dos sitios que pertenecen al sistema de fallas Ojos Negros. En el sitio P-36 los planos de cizallas están muy bien expuestos en una cantera, de donde se midieron seis planos de fallas, donde se obtuvo una solución para una falla orientada $346^{\circ}/73^{\circ}$ con movimiento hacia $153^{\circ}/37^{\circ}$ (Figura 40c[11]). En el sitio P-38 la solución de siete planos de cizalla es $67^{\circ}/52^{\circ}$ y $227^{\circ}/24^{\circ}$ (Figura 40c[12]).

3.3 Geoquímica de rocas ígneas

En esta sección se presentan los resultados del análisis geoquímico de roca total de 21 muestras, de las cuales, cinco se consideran pertenecientes a la Formación Santiago Peak y por ello, son parte de la secuencia que encajona a los plutones del Cinturón Batolítico Peninsular (sensu stricto). Se analizaron 16 muestras de rocas plutónicas de este cinturón, como se indica en el mapa de la Figura 42.

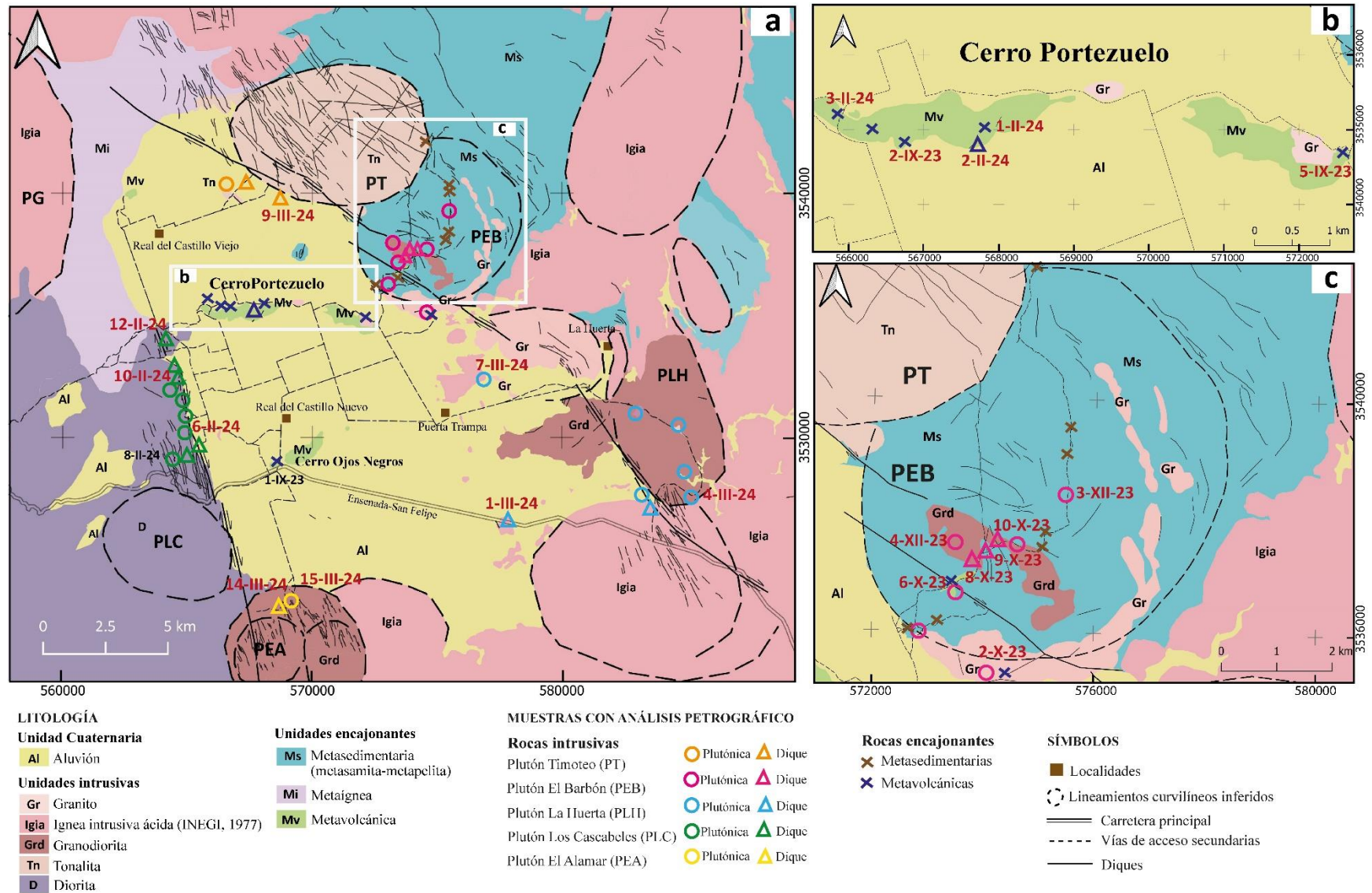


Figura 42. a) Mapa geológico del área de estudio indicando la distribución de muestras analizadas, resalta en color rojo las seleccionadas para el análisis geoquímico. b) Acercamiento a la zona del cerro El Portezuelo. c) Acercamiento a la zona del plutón El Barbón. Abreviaturas: **PT:** Plutón Timoteo, **PEB:** Plutón El Barbón, **PLH:** Plutón La Huerta, **PLC:** Plutón Los Cascabeles, **PEA:** Plutón El Alamar. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

El objetivo de este apartado es clasificar químicamente a los dos conjuntos de muestras, buscar relaciones genéticas entre ellas y definir su ambiente tectónico de formación. Los datos geoquímicos y el cálculo de la norma CIPW se presenta en el Anexo E.

3.3.1 Geoquímica de elementos mayores

Para determinar cuantitativamente el nivel de meteorización de las rocas metaígneas y plutónicas, se emplearon los índices MFW propuestos por Otha y Arai (2007), los cuales se grafican en el diagrama ternario de la Figura 43, donde M representa una fuente máfica fresca, F una fuente félsica fresca y W rocas meteorizadas. Las rocas que grafican en la curva de tendencia de rocas ígneas representan muestras frescas o poco meteorizadas (Otha y Arai, 2007).

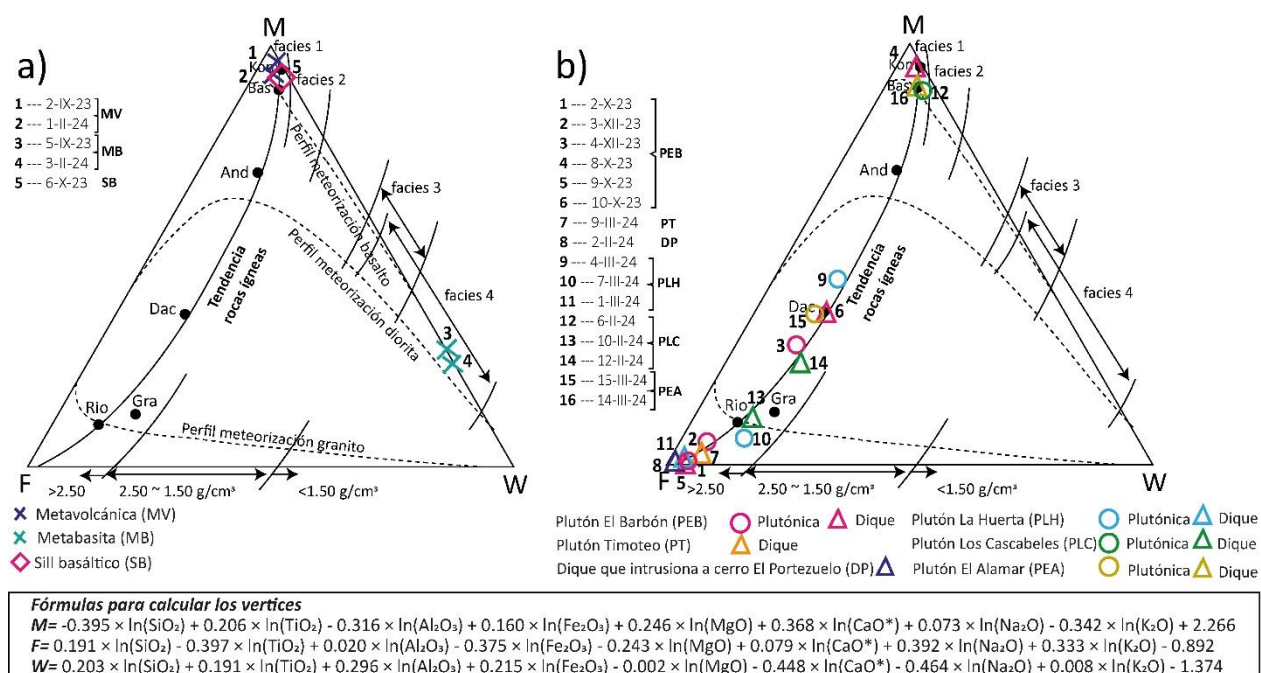


Figura 43. Diagramas de índice de Intemperismo químico MFW de Otha y Arai (2007), donde M, F y W representan las fuentes máficas, félsicas y materiales intemperizados, respectivamente. a) En el perfil de meteorización del basalto se ubican las rocas metaígneas, donde se definen las facies: fresco, moderadamente meteorizado, intensamente meteorizadas y suelo (facies 1 a 4, respectivamente). b) Las rocas plutónicas del Valle de Ojos Negros grafican en la tendencia de rocas ígneas. En el lado F-W se indican los valores de densidad decrecientes estimados según el grado de Intemperismo. Los números dentro de los símbolos de las muestras indican su respectiva leyenda, la cual se encuentra a su derecha. Las abreviaturas corresponden con rocas ígneas representativas: Kom: komatiita, Bas: Basalto, And: Andesita calco-alcalina, Dac: Dacita calco-alcalina, Gra: Granito, Rio: Riolita calco-calcalina.

Se analizaron cinco muestras metaígneas asociadas con la Formación Santiago Peak, que se muestran en

la Figura 43a; cuatro de ellas se ubican en el cerro El Portezuelo (2-IX-23, 5-IX-23, 1-II-24, 3-II-24) y la quinta (6-X-23) corresponde a un *sill* pseudoestratificado que intrusióna al Complejo Bedford Canyon, en la zona del plutón El Barbón (Figura 42).

Es importante resaltar que, aunque Ohta y Arai (2007) no recomiendan el uso en rocas metamórficas en facies de esquistos verdes, sobre todo porque la clorita tiene un alto valor de W, en este trabajo se emplea para mostrar las diferencias entre rocas máficas de la misma unidad litológica. De acuerdo con sus estructuras y fábricas, dichas rocas se identificaron como metalavas (2-IX-23 y 1-II-24), mientras que el *sill*, visto petrográficamente, muestra pseudoestratificación (6-X-23), la cual es un rasgo común en diques de composición basáltica, como los documentados por Frost y Snoke (1989). No obstante, el carácter metamórfico de las muestras lo sitúan cerca del vértice M, en el campo de la facies 1 de intemperismo mientras que las muestras 5-IX-23 y 3-II-24 ubicadas en los extremos E y W del cerro El Portezuelo respectivamente, se sitúan cerca del vértice W del diagrama (Figura 43a) debido a su alto contenido de minerales del grupo de la clorita, en concordancia con las observaciones de Ohta y Arai (2007).

La Figura 43b muestra los índices MFW graficados para rocas ígneas de los plutones Timoteo, El Barbón, el conjunto La Huerta, Los Cascabeles y El Alamar, de las cuales siete muestras son plutónicas y nueve son diques de diferentes composiciones. Las muestras grafican en la línea de tendencia de rocas ígneas, sugiriendo que todas son frescas o están poco intemperizadas (Ohta y Arai, 2007) y que son óptimas para su estudio geoquímico.

Las muestras del plutón El Barbón (2-X-23, 3-XII-23 y 4-XII-23) se asocian con fuentes félsicas, donde las rocas graníticas 2-X-23 y 3-XII-23 se ubican cerca del vértice F, mientras que el granito de la muestra 4-XII-23 se ubica cerca de la composición de la dacita. Dos de los tres diques que intrusiónan a este plutón se ubican en los vértices extremos F y M y el tercero se encuentra en la parte media (dacita). El dique que intrusióna al plutón Timoteo (9-III-24) también grafica cerca del vértice félsico. Las rocas del conjunto plutónico La Huerta, tanto las plutónicas (7-III-24 y 4-III-24) como el dique que lo intrusióna (muestra 1-III-24) se encuentran a lo largo de la tendencia de rocas ígneas, predominantemente hacia el vértice félsico (ver Fig. 43b). Del plutón Los Cascabeles, la muestra 6-II-24 se encuentra cerca del vértice máfico, mientras que los diques tienen una tendencia más félsica (muestras 10-II-24 y 12-II-24). Por último, la muestra del plutón El Alamar (15-III-24) se asocia con un carácter félsico, mientras que el dique que lo intrusióna (muestra 14-III-24) se sitúa cerca del vértice máfico.

De acuerdo con los diagramas de clasificación geoquímica TAS (álcalis total vs. sílice) de Middlemost (1994), tanto las rocas metavolcánicas como las plutónicas grafican en el campo de rocas subalcalinas (Figura 44).

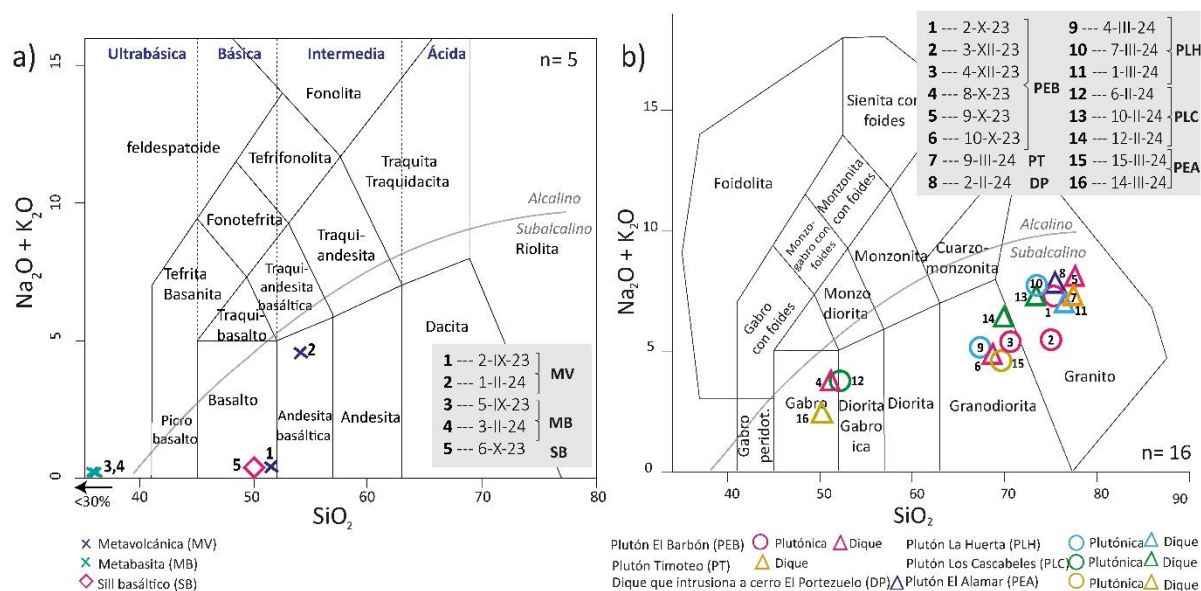


Figura 44. Clasificación geoquímica de las rocas del Valle de Ojos Negros. a) Diagrama de álcalis totales vs. sílice (TAS; clasificación química y nomenclatura de Le Maitre et al., 2002, según Le Bas et al., 1986) para rocas metaígneas asociadas con la Formación Santiago Peak, b) Diagrama TAS (Middlemost, 1994) para rocas plutónicas y diques del valle de Ojos Negros. La subdivisión entre las series alcalina y subalcalina es la propuesta por Irvine y Baragar (1971; tomado de Rollinson y Pease, 2021). Las flechas en las muestras 5-IX-23 y 3-II-24 indican que el contenido de SiO_2 es menor al 30%. El listado numérico indica la clave de cada muestra.

Del cerro El Portezuelo se analizaron cuatro muestras de las cuales 2-IX-23 y 1-II-24 son de derrames cuyas composiciones geoquímicas son basalto y andesita basáltica, respectivamente, mientras que 5-IX-23 y 3-II-24, cuyo contenido de sílice es menor de 30% se clasifican como metabasitas, cuyos protolitos más probables son basaltos de olivino (picritas), por su alto contenido de magnesio cercano a 30% (Figura 44a). En el mismo tipo de roca se ubica el dique-estrato de la muestra 6-X-23 que intrusión a metasedimentos en la zona del plutón El Barbón y que al microscopio muestra un arreglo pseudoestratificado. Es importante hacer notar que el contenido de SiO_2 , Al_2O_3 , FeO_T , MgO y H_2O^+ de las metabasitas (5-IX-23 y 3-II-24) son notablemente similares a las de clinocloro de Mg-Al (Deer et al., 1992).

Las rocas plutónicas y los diques del Valle de Ojos Negros se clasificaron de acuerdo con el diagrama TAS para rocas plutónicas de Middlemost (1994) en la Figura 44b. Se observaron que tres muestras del plutón El Barbón grafican en los campos de granodiorita (4-XII-23) y granito (2-X-23 y 3-XII-23), al igual que los

diques que lo intrusionan, con excepción de la muestra 8-X-23 cuya composición es basáltica. El dique granítico que intrusiona a las rocas metaígneas del cerro El Portezuelo (muestra 2-II-24) puede formar parte del borde W de este plutón. El dique que se encuentra en la parte SW del plutón Timoteo (9-III-24) también es granítico.

Los análisis geoquímicos de tres muestras del plutón compuesto La Huerta corresponden a un granito (7-III-24) que se ubica en la parte central del conjunto, una granodiorita en la fracción magnética del borde SE (4-III-24) y a un dique granítico en la zona del valle (1-III-24), al SW del conjunto (Figura 44b). Del plutón Los Cascabeles, la muestra analizada (6-II-24) grafica en el campo del gabro, mientras que los diques que lo intrusionan son félsicos de composición granodiorítica (12-II-24) y granítica (10-II-24). Finalmente, una muestra del plutón El Alamar grafica en el campo de la granodiorita (15-III-24), mientras que el dique que lo intrusiona se clasifica como gabrónico (14-III-24; Figura 44b).

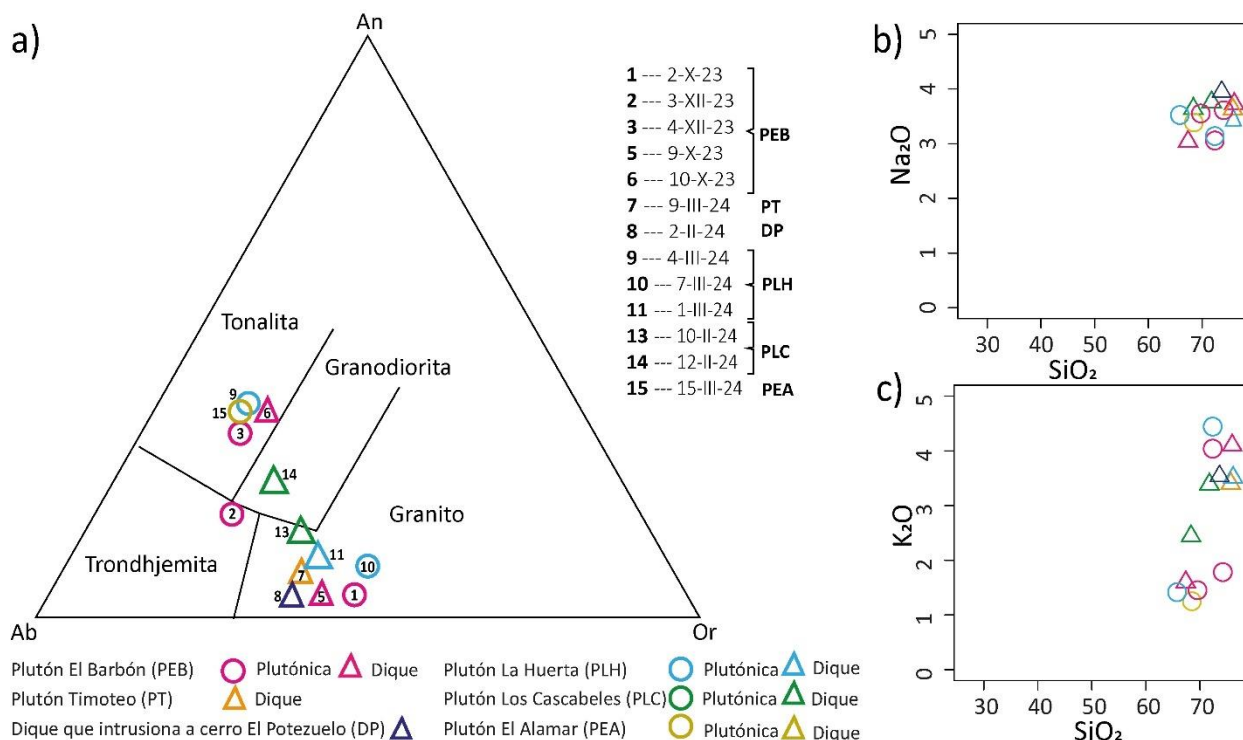


Figura 45. a) Diagrama de clasificación An-Ab-Or (Barker, 1979) para rocas graníticas de acuerdo con su composición normativa CIPW para las rocas plutónicas del Valle de Ojos Negros. b) Diagrama biviariado de Na₂O vs. Sílice. c) Diagrama biviariado de K₂O vs. sílice. El listado numérico indica la clave de cada muestra.

En el diagrama de clasificación de minerales normativos An-Ab-Or de Barker (1979; Figura 45a), se observa un notable enriquecimiento en ortoclasa con respecto a la albita, la cual es más o menos constante desde

la tonalita hasta el granito. Esta evolución en el contenido de álcalis se observa claramente en los diagramas de variación de Na_2O y K_2O de la Figura 45b y c, donde el Na_2O prácticamente se mantiene entre 3 y 4%, mientras que el K_2O varía aproximadamente entre 1 y 4.5%.

Las muestras del plutón El Barbón son las que presentan la mayor diversidad, granito-trondhjemitonalita, mientras que los diques del mismo plutón grafican en los campos del granito y la tonalita. En el mismo diagrama de la Figura 45a, los diques que intrusionan al plutón Timoteo y al cerro El Portezuelo, grafican en el campo del granito (muestras 2-II-24 y 9-III-24 respectivamente).

Del plutón compuesto La Huerta dos muestras del cuerpo plutónico grafican en los campos del granito y la tonalita (4-III-24 y 7-III-24) mientras que un dique que lo intrusiona (1-III-24) se ubica en el campo del granito. Los diques que intrusionan al plutón diorítico de Los Cascabeles (muestras 12-II-24 y 10-II-24) grafican en el campo de granodiorita y granito, respectivamente. Por último, el plutón El Alamar es granodiorítico y grafica como tonalita (15-III-24) en el diagrama de Barker (1979).

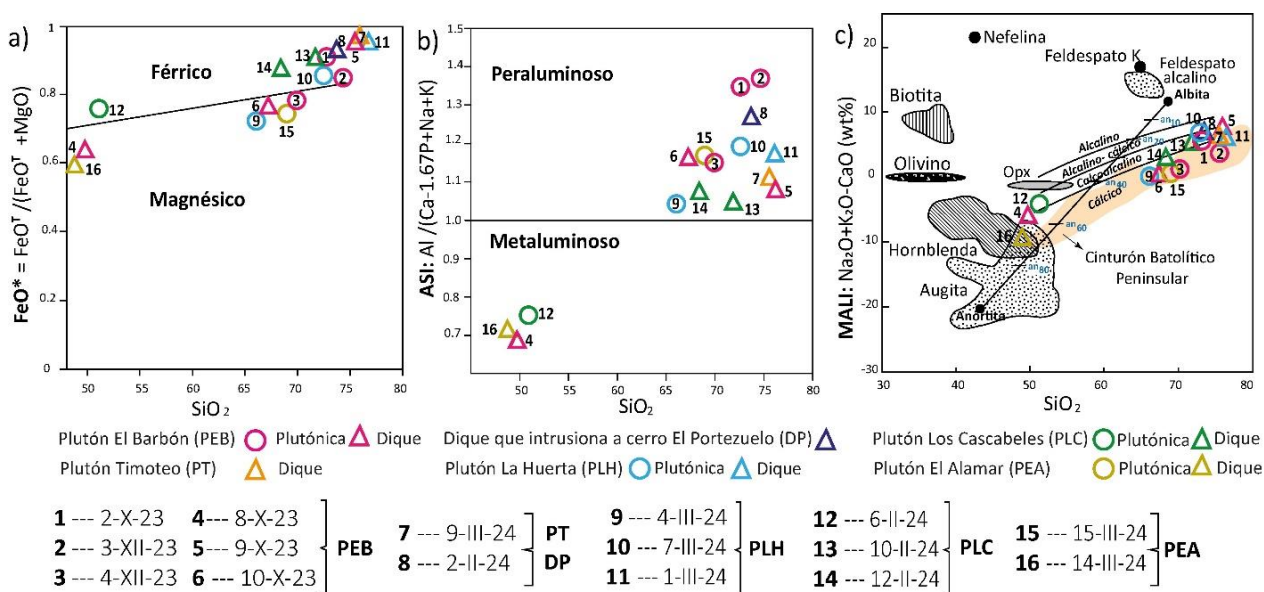


Figura 46. Diagramas de clasificación geoquímica de Frost y Frost (2008). a) Diagrama de sílice vs. $\text{FeO}^* = \text{FeO}^T / (\text{FeO}^T + \text{MgO})$. b) Diagrama de sílice vs. índice de saturación de aluminio (ASI). c) Diagrama de sílice vs. índice modificado de álcalis menos calcio (MALI) donde se muestra que la mayor parte de las muestras coinciden con el campo principalmente cálcico de las rocas del Cinturón Batolítico Peninsular. El listado numérico indica la clave de cada muestra. Abreviaturas: **PEB**: Plutón El Barbón, **PT**: Plutón Timoteo, **DP**: Dique en el cerro El Portezuelo, **PLH**: Plutón La Huerta, **PLC**: Plutón Los Cascabeles, **PEA**: Plutón El Alamar.

De acuerdo con los criterios de clasificación geoquímica de Frost y Frost (2008), las rocas plutónicas del área de estudio son predominantemente férricas, peraluminosas y ligeramente más calcoalcalinas que las

identificadas por los autores para muestras del Cinturón Batolítico Peninsular (Figura 46). En el diagrama Fe^* vs. sílice (Figura 46a), la granodiorita y el dique gabróico de El Alamar son magnésicos, mientras que todas las rocas del plutón Los Cascabeles grafican en el campo férrico. Las muestras de los plutones El Barbón y La Huerta varían de magnésicos a férricos conforme se incrementa su contenido de SiO_2 .

Se utilizó el diagrama del índice de saturación de aluminio (ASI) para distinguir si las rocas son metaluminosas o peraluminosas (Figura 46b). Según Frost y Frost (2008) las rocas peraluminosas tienen $\text{ASI} > 1$ y tienen más Al del necesario para producir feldespatos, mientras que las metaluminosas $\text{ASI} < 1$ y carecen del Al necesario para la formación de feldespatos. En la Figura 46b se observa que la mayoría de las rocas intrusivas con SiO_2 mayor de 65% del Valle de Ojos Negros grafican en el campo peraluminoso. Como cabe esperar, las rocas pobres son metaluminosas, es decir, tienen valores de ASI menores a 1.

En el diagrama del índice modificado de álcalis menos calcio (MALI) vs. sílice (Figura 46c) se observa que el conjunto de las muestras define una tendencia desde el campo cálcico, cerca del límite con el calcoalcalino en el caso de la diorita de Los Cascabeles, hasta aproximadamente 71% de SiO_2 donde el conjunto es principalmente calcoalcalino. Hasta dicho valor de SiO_2 , la tendencia de las muestras es similar al mostrado por Frost y Frost (2008) para el Cinturón Batolítico Peninsular, y en esa porción de la gráfica existe un traslape con la tendencia claramente calcoalcalina del plutón Tuolumne de Sierra Nevada, EUA.

3.3.2 Química de elementos traza y tierras raras

A partir del análisis de elementos traza, reportados en el Anexo E, se realizaron diagramas de discriminación tectónica (Shervais, 1982 y Pearce et al., 1984) y de tierras raras normalizados a condrita (McDonough y Sun, 1995) para identificar el ambiente tectónico y determinar la naturaleza de la fuente.

Para las rocas metaígneas que incluyen metalavas, metabasitas y el sill basáltico, se utilizó el diagrama de discriminación tectónica de Shervais (1982) de la Figura 47a, debido a que el Ti y el V son inmóviles, tanto bajo condiciones de hidrotermalismo, como de metamorfismo intermedio a alto (Rollinson, 1993). En la gráfica se observa que todas las muestras grafican en el campo de toleitas de arco y su distribución es más o menos paralela al campo de los basaltos alcalinos, sin embargo, son más pobres en Ti. Las muestras con el mayor contenido de V (muestras 5-IX-23 y 3-II-24), clasificadas como picritas, se caracterizan también por su alto contenido de MgO.

En el diagrama de discriminación tectónica para granitos de Pearce et al. (1984; Figura 47b) se observa que la mayoría de las muestras del Valle de Ojos Negros grafican en el campo de los granitos de arco volcánico. Las muestras 1 a 3 que se encuentran cerca del límite entre los granitos de arco y los colisionales pertenecen al plutón El Barbón y, como se mencionó en la sección de los elementos mayores, el dique félsico que intrusión a las metabasitas en el cerro El Portezuelo (muestra 2-II-24), es probable que sea parte del borde SW del plutón El Barbón. El mayor contenido de Ta de las muestras de El Barbón, que a su vez es el más peraluminoso (Figura 47b), puede estar influenciado por el contenido de aluminosilicatos como el granate y las micas (muscovita y biotita).

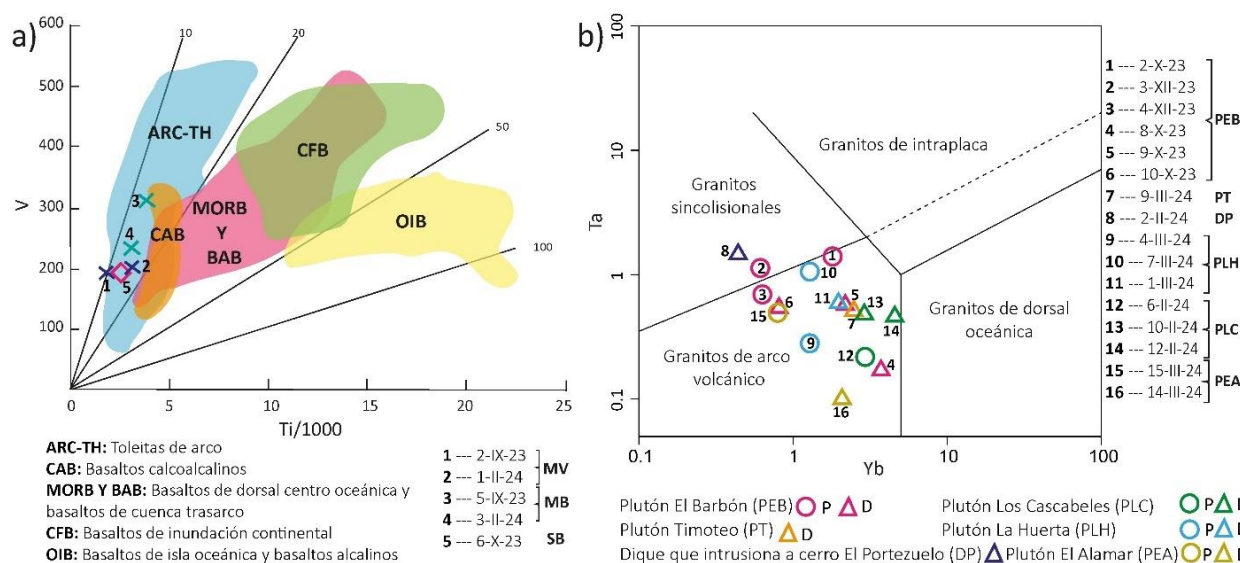


Figura 47. a) Diagrama de clasificación tectonomagmática de rocas basálticas Ti/1000 vs. V de Shervais (1982) para las rocas metaígneas del Valle de Ojos Negros. b) Diagrama de discriminación tectónica para granitos (Pearce et al., 1984). Los números dentro de los símbolos de las muestras indican su respectiva leyenda, la cual se encuentra a la izquierda en rocas metaígneas y derecha para las rocas plutónicas. Abreviaturas: P: Plutón, D: Dique.

Respecto al patrón de las tierras raras en las rocas ígneas, Rollinson (1993) sugiere que está controlado por la química de la fuente y el equilibrio cristal- fundido, que han tenido lugar durante la evolución. En la Figura 48 se presenta el diagrama de tierras raras normalizado a condritas (McDonough y Sun, 1995) para rocas metaígneas del área de estudio.

Se observa que, salvo las metabasitas, las metalavas y el sill basáltico (muestras 2-IX-23, 1-II-24, 6-X-23 y 8-X-23) forman un patrón plano y paralelo entre sí, indicando una variación progresiva de rocas posiblemente cogenéticas (Cox et al., 1979). Las metabasitas (muestras 5-IX-23 y 3-II-24), cuyos protolitos

probables son picritas, tienen patrones muy pobres en tierras raras ligeras, como el mostrado por los coeficientes de partición de la hornblenda en líquidos basálticos (Rollinson, 1993).

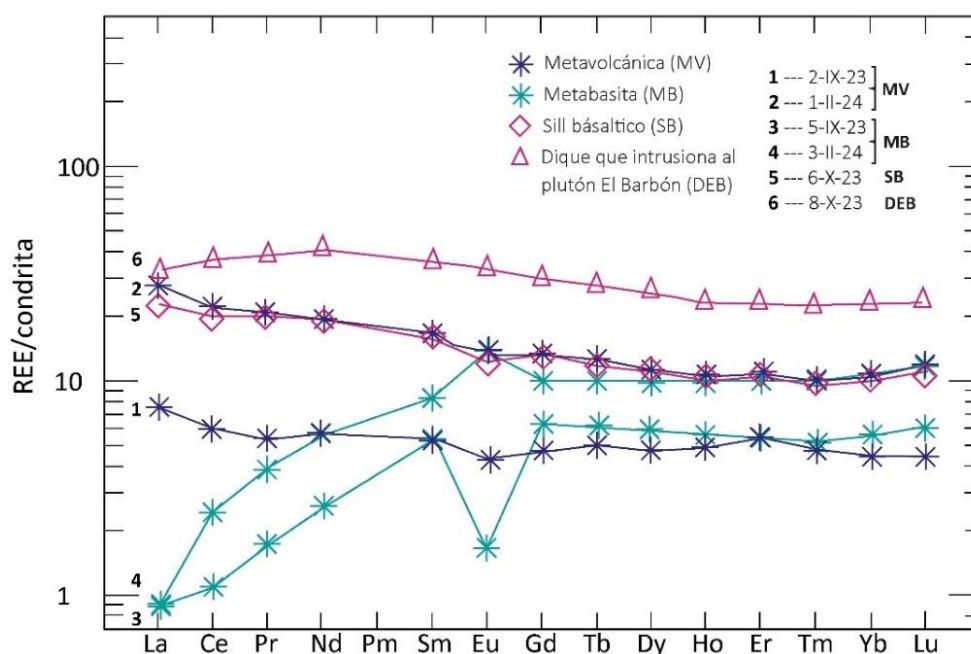


Figura 48. Diagrama de elementos de tierras raras normalizados a condritas (McDonough y Sun, 1995) para las rocas metaígneas del Valle de Ojos Negros.

En la Figura 49 se presentan diagramas de REE para las rocas plutónicas y diques del área de estudio, separados por plutón. En el diagrama de la Figura 49a se muestran los patrones de REE para las rocas plutónicas y diques del plutón El Barbón, así como los diques que intrusionan al plutón Timoteo y al cerro El Portezuelo. Los patrones son subparalelos mostrando enriquecimiento en las tierras raras ligeras en todos los casos, excepto en el dique granítico que intrusiona a las rocas básicas del cerro El Portezuelo, el cual muestra también una fuerte anomalía negativa de Eu.

Con excepción de las muestras de granodiorita (muestras 10-X-23 y 4-XII-23), las rocas más ácidas muestran anomalías negativas de Eu, característica de la cristalización de la plagioclasa. Las muestras sin anomalía notable de Eu muestran un empobrecimiento notable en las REE pesadas posiblemente debido a la influencia del granate, particularmente presente en los plutones orientales.

Los patrones del plutón La Huerta (Figura 49b) tienen tendencias similares al plutón El Barbón, mientras que en el plutón Los Cascabeles (Figura 49c) la ligera anomalía positiva de Eu corresponde a una diorita

(muestra 6-II-24). En el caso del plutón El Alamar, se observa mayor enriquecimiento en las tierras raras ligeras del plutón con respecto al dique máfico que lo intrusióna (muestras 15-III-24 y 14-III-24 respectivamente).

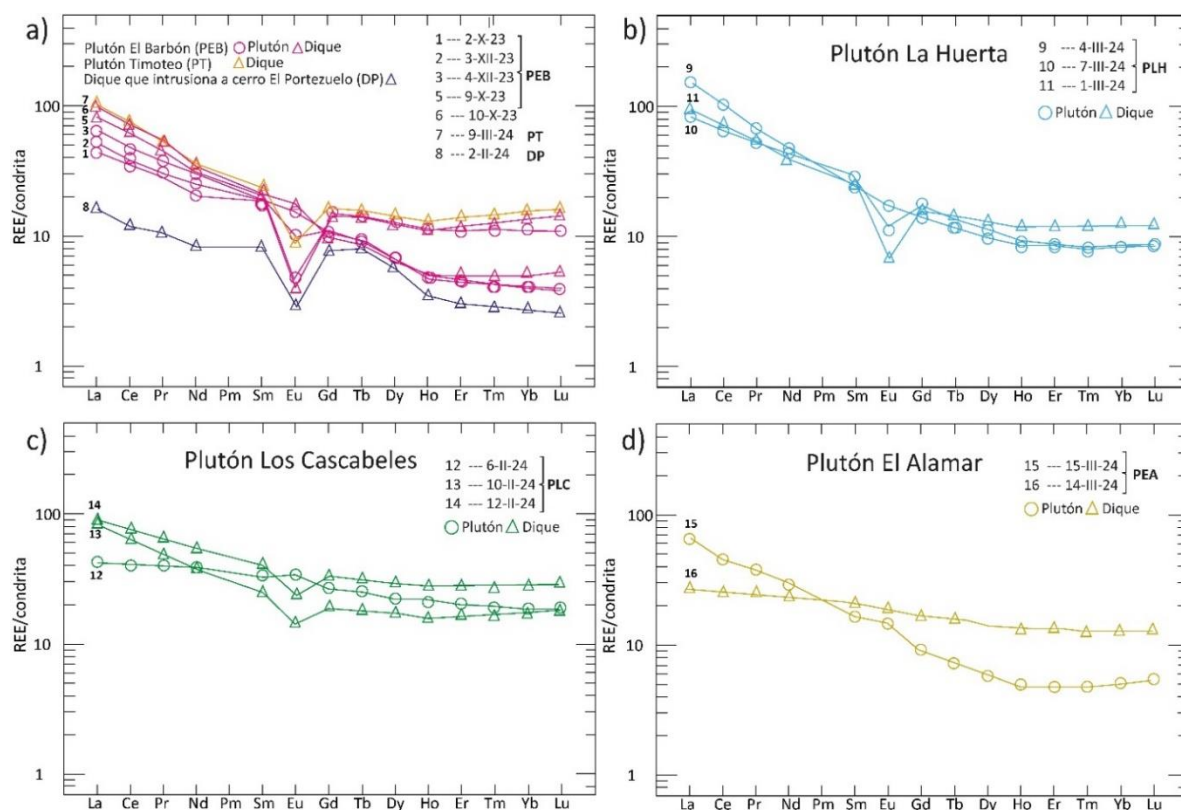


Figura 49. Diagrama de elementos de tierras raras normalizados a condritas (McDonough y Sun, 1995) para las rocas plutónicas y diques del área de estudio, separada por plutón analizado: a) plutón El Barbón y Timoteo, b) plutón La Huerta, c) plutón Los Cascabeles y d) plutón El Alamar.

Capítulo 4. Aeromagnetometría

Los estudios aeromagnéticos miden la magnitud (escalar) del campo magnético terrestre local. Esta medición es una suma del campo magnético de una Tierra casi esférica (Campo Geomagnético Internacional de Referencia; IGRF) más el campo magnético inducido por las rocas de la corteza, conocido según Isles y Rankin (2013) como la Intensidad Magnética Total (TMI). Estos autores también mencionan que las imágenes de la TMI, las cuales son el producto de un estudio aeromagnético, suelen ser la diferencia entre el campo medido y el IGRF. Este campo suele denominarse IGRF residual o anomalía magnética.

Aunque el campo magnético terrestre es vectorial (B), los equipos que se usan para prospección terrestre y aérea solo miden la magnitud de este vector. Por medio de estaciones magnéticas en varios puntos del planeta se mide la inclinación (I) y declinación (D) y se interpola en los lugares donde no hay estaciones. El campo magnético terrestre es mayormente dipolar, este dipolo está en constante movimiento dentro del planeta, por esa razón cada cinco años se calcula el IGRF y se interpola para años no múltiplos de cinco. En el caso de las prospecciones regionales las mediciones son por adquisición aérea y la unidad de intensidad de campo utilizada son las nanoTeslas (nT) (Keary et al., 2002; Isles y Rankin, 2013).

Los datos adquiridos deben corregirse por variaciones diurnas y por corrección geomagnéticas. Esta última, consiste en remover el campo geomagnético de referencia (IGRF), dejando los valores de anomalía magnética de la corteza (Keary et al., 2002). Una vez que los datos observados son corregidos puede plantearse una discretización en 2D o 3D del medio y realizar una inversión de datos, que permita determinar el valor de magnetización para cada celda que representa un prisma rectangular homogéneo (Carrillo et al., 2022). En este sentido, la propiedad física es denominada como magnetización y la respuesta de un cuerpo magnetizado anomalía magnética.

Los mapas de anomalías magnéticas delimitan variaciones laterales de la magnetización en la corteza y a menudo caracterizan variaciones aisladas asociadas con anomalías magnéticas debidas a rasgos geológicos (García-Abdeslem, 2014). En este sentido, el análisis de datos aeromagnéticos proporcionan información a profundidad sobre la geometría e intensidad de magnetización de las estructuras geológicas.

El Cinturón Batolítico Peninsular tiene variaciones magnéticas notables a escala regional, en donde, según Gastil et al. (1990) la zona occidental es marcadamente magnética en contraste con la oriental que es débilmente magnética (Figura 5). En particular, el Valle de Ojos Negros se ubica en la zona occidental con

respecto a la línea magnetita-ilmenita, sin embargo, los plutones que bordean el valle muestran variaciones magnéticas muy contrastantes, como se ve en el mapa aeromagnético de la Figura 51. Según Gastil et al. (1990), en el Valle de Ojos Negros hay traslape entre las zonas de la serie magnetita y de la serie ilmenita.

En este capítulo se presenta la interpretación de los datos de susceptibilidad magnética y aeromagnéticos del área de estudio, con el objetivo de correlacionar anomalías magnéticas con intrusivos para describir su geometría a profundidad, en particular, los ubicados en la zona occidental y los de la porción SE del área de estudio.

4.1 Principios físicos

La magnetización J según Clark (1997) es el momento dipolar magnético por unidad de volumen de un material, la cual puede entenderse como la sumatoria de los componentes de magnetización inducida J_i y la magnetización remanente J_r . Por lo tanto, $J = J_i + J_r$. La magnetización inducida se produce cuando se aplica un campo magnético sobre un cuerpo, es variable, de manera que si el campo magnético es removido esta componente desaparece. Por su parte la magnetización remanente se produce sin la acción de un campo externo, quedando registrada en los materiales cuando el campo magnético es removido (Clark, 1997; Keary et al., 2002).

El magnetismo es una característica común de la materia, ya que los electrones que giran en las órbitas de los átomos realizan movimientos orbitales generando corrientes eléctricas y esto a su vez, el campo magnético (Jeleńska et al., 2018). El campo magnético terrestre afecta a las rocas de la corteza e induce campos magnéticos en minerales magnéticamente susceptibles que se encuentran a profundidades donde la temperatura es inferior a la del punto de Curie, cerca de los 550° (Isles y Rankin, 2013). Cabe señalar que esta temperatura se alcanza por el gradiente geotérmico a profundidades de 16 a 20 km, aunque puede darse cerca de la superficie en zonas con flujo térmico alto (Reeves, 2005).

En cuerpos rocosos con minerales magnéticos se presentan las magnetizaciones inducidas y remanentes, teniendo diferentes direcciones e intensidades en función de los arreglos minerales y proporción de minerales magnéticos (Reynolds, 1997). En este sentido, la relación entre el campo magnético (M) y la inducción o fuerza magnética (H) puede expresarse en términos de un parámetro vinculado a la geología conocido como susceptibilidad magnética (k ; Reynolds, 1997). Este parámetro es una medida de la

respuesta de una roca a un campo magnético aplicado representado por un valor adimensional (SI) y puede medirse en campo por medio de un susceptibilímetro magnético. Los rangos de susceptibilidad para rocas comunes, según Clark (1999) se presentan en la Figura 50. Existen tres tipos de comportamiento magnético en relación con la susceptibilidad, de acuerdo con Jeleńska et al. (2018):

a) Diamagnético: Los materiales diamagnéticos se magnetizan en dirección opuesta a la del campo magnético. La susceptibilidad diamagnética es negativa. Su efecto es muy débil y se elimina al remover el campo magnético. Algunos minerales diamagnéticos son el cuarzo y la calcita (Clark, 1990).

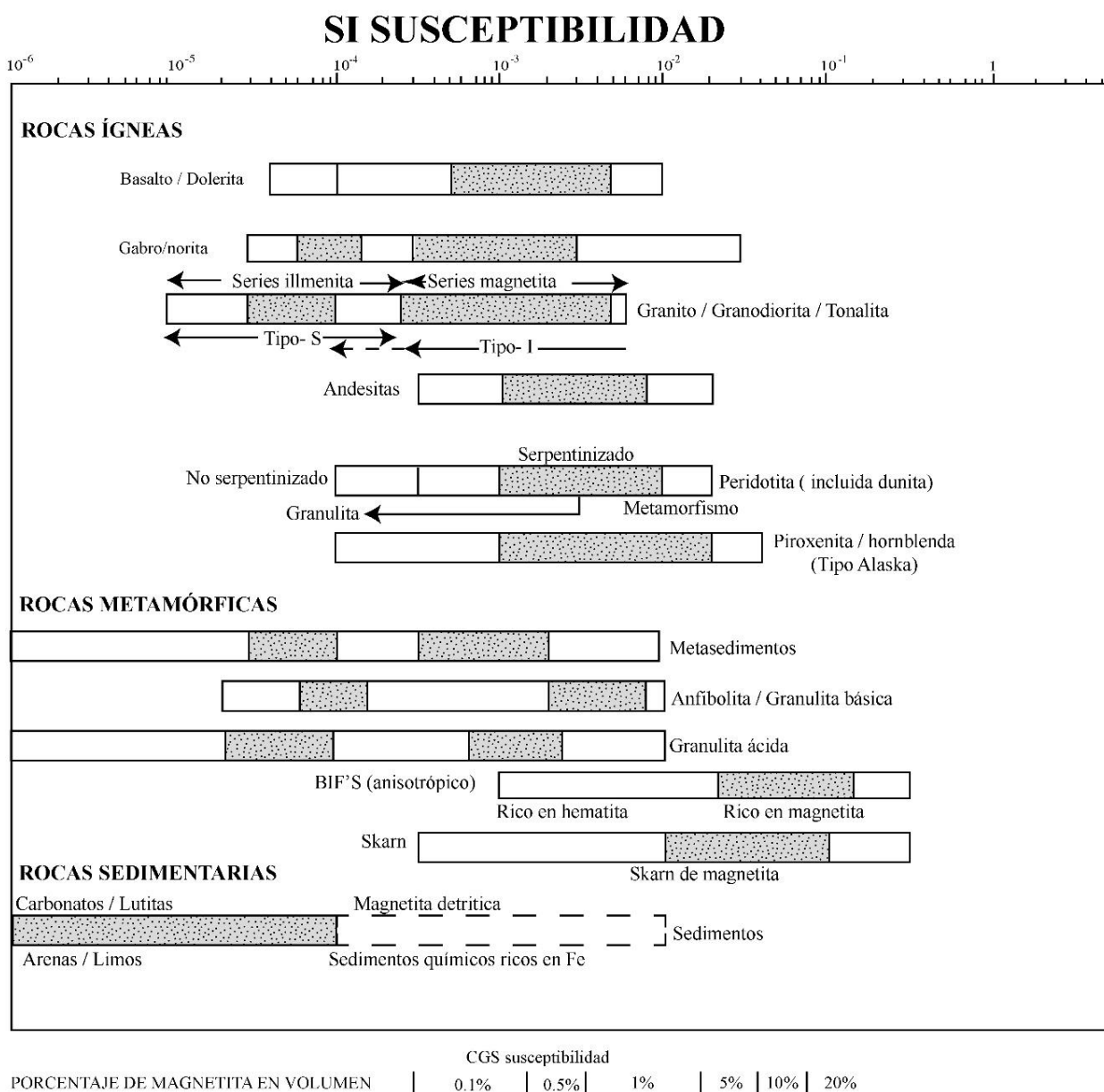


Figura 50. Rangos de susceptibilidad magnética para los principales tipos de rocas. Los cuadros en blanco indican los rangos comunes de susceptibilidad magnética, los cuadros sombreados muestran los rangos máximos de susceptibilidad. Modificado de Clark (1990).

b) Paramagnético: Tienen una pequeña susceptibilidad positiva (k) en un campo aplicado. Los materiales paramagnéticos se magnetizan orientados al azar. Algunos minerales de esta categoría son las arcillas, anfíboles y micas (Isles y Rankin, 2013).

c) Ferromagnético: Los materiales ferromagnéticos tienen la capacidad de mantener la magnetización en ausencia de un campo magnético (magnetización remanente). Estos materiales se alinean paralelamente (ferromagnetismo) o antiparalelamente (antiferromagnetismo o ferrimagnetismo) (Jeleńska et al., 2018), según se describe enseguida.

En los materiales ferromagnéticos los dipolos son paralelos, dando lugar a una magnetización muy fuerte, que puede existir incluso en ausencia de un campo magnético y dan lugar a una susceptibilidad muy alta. Entre los materiales ferromagnéticos se encuentran el hierro, el cobalto y el níquel (Keary et al., 2002).

En los materiales antiferromagnéticos el acoplamiento dipolar es antiparalelo con igual número de dipolos en cada dirección, los campos magnéticos de los dipolos se auto cancelan, por lo que no existe ningún efecto magnético externo. A este grupo pertenece la hematita (Keary et al., 2002).

Por último, en los materiales ferrimagnéticos como la magnetita el acoplamiento dipolar es antiparalelo, pero la fuerza de los dipolos en cada dirección es desigual. En consecuencia, los materiales ferrimagnéticos pueden presentar una fuerte magnetización y una alta susceptibilidad (Keary et al., 2002).

4.2 Susceptibilidad magnética

En este apartado se presentan los resultados de susceptibilidad magnética de las rocas metamórficas encajonantes y rocas intrusivas medidos en campo. En el mapa del campo magnético reducido al polo de la Figura 51 se incluyen los valores promedio de susceptibilidad magnética por sitio. Siguiendo el criterio de Ávila-Ortiz (2021), quien observó que los intrusivos máficos que normalmente tienen altos valores de susceptibilidad, cuando están alterados hidrotermalmente, arrojan valores menores a 2×10^{-3} SI, por lo que se adopta ese valor como referencia para separar a los cuerpos magnéticos. Los datos de susceptibilidad magnética promedio por sitio, se encuentra en la Tabla 53 de susceptibilidad del Anexo D.

En las Figuras 52 y 53 se grafican las susceptibilidades magnéticas promedio (SI) respecto al valor de referencia; en la primera gráfica se agrupan por plutón y en la segunda según su litología.

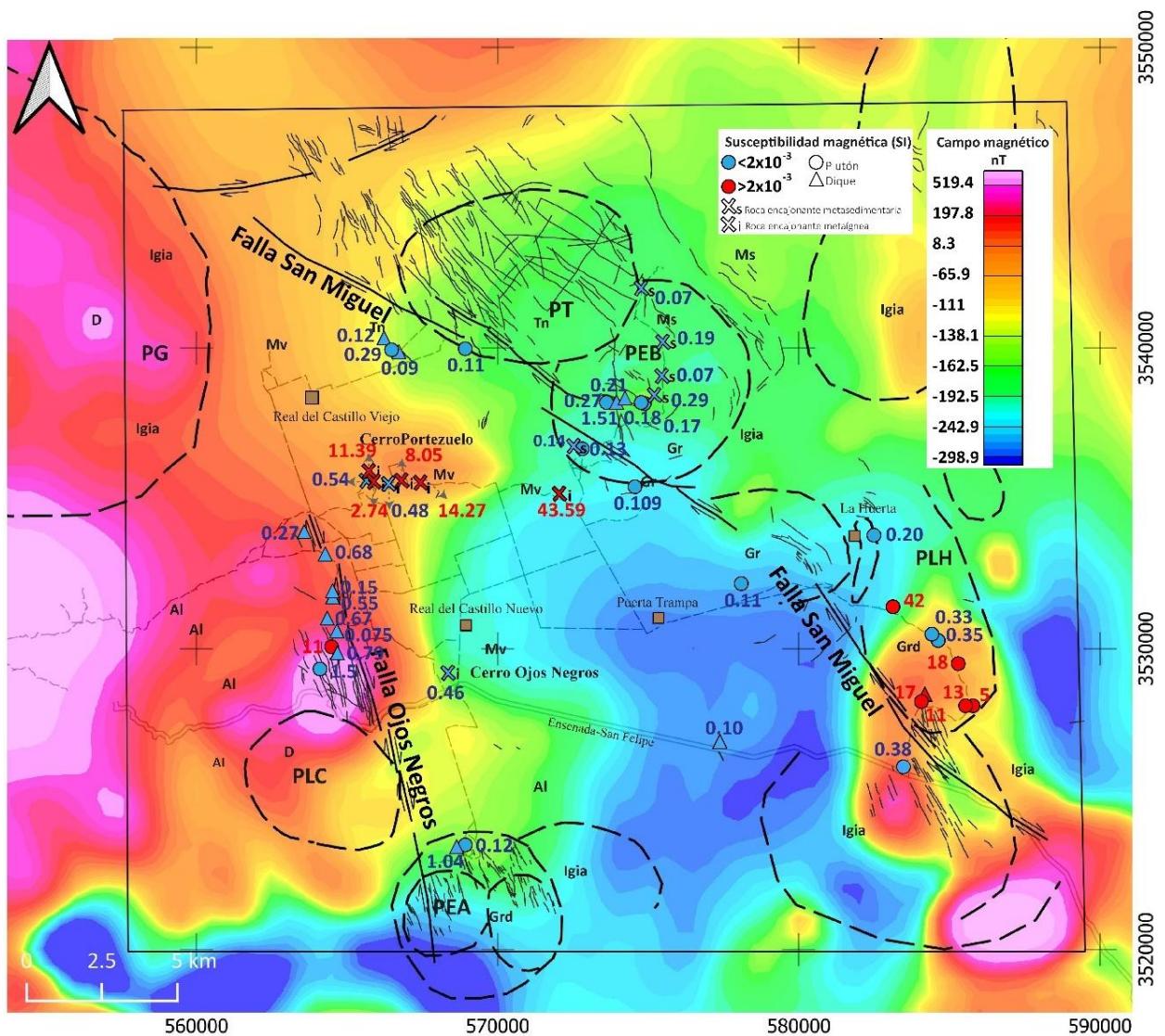


Figura 51. Mapa del campo magnético reducido al polo del Valle de Ojos Negros indicando los valores de susceptibilidad magnética medida *in situ*. El valor de referencia entre los valores de baja y alta susceptibilidad magnética es de 2×10^{-3} (SI) (Ávila-Ortiz, 2021). Los círculos corresponden a rocas plutónicas, los triángulos a diques y las cruces a las rocas encajonantes, indicando las metasedimentarias (s) y las metaígneas (i). Abreviaturas: **PT**: Plutón Timoteo, **PEB**: Plutón El Barbón, **PLH**: Plutón La Huerta, **PG**: Plutón Guadalupe, **PLC**: Plutón Los Cascabeles, **PEA**: Plutón El Alamar. **Coordenadas**: WGS 84/ UTM zona 11.

4.2.1 Susceptibilidad magnética de las rocas encajonantes

Al noreste del Valle de Ojos Negros, rodeando al plutón El Barbón afloran las rocas metasedimentarias pelíticas y samíticas que han sido asociadas al Complejo Bedford Canyon, de posible edad Triásico-Jurásico. Esta secuencia metasedimentaria tiene una susceptibilidad magnética muy baja, desde 0.07×10^{-3} hasta 0.29 SI (Figura 51, 52 y 53) por su contenido de minerales paramagnéticos, como las micas. En el mapa aeromagnético se observa que su intensidad magnética está en el rango de -243 y -163 nT (Figura 51).

Las rocas metaígneas encajonantes, asociadas a la Formación Santiago Peak, de edad Cretácico, muestran valores de susceptibilidad variados. Los afloramientos de derrames y *sills* metamorfizados se distribuyen en afloramientos aislados al sur de la localidad Real del Castillo Nuevo, al norte de la localidad Real del Castillo Viejo y en el cerro Portezuelo (Figura 51).

Se obtuvieron mediciones al sur del Real del Castillo Nuevo, cuyos valores de susceptibilidad promedian 0.46×10^{-3} SI (Figuras 51, 52 y 53) y su respuesta magnética está en el rango de -193 nT. En los cerros casi continuos de El Portezuelo se observan valores de susceptibilidad mayormente altos $> 2 \times 10^{-3}$ SI. El sitio del extremo oriental de El Portezuelo corresponde a una clinopiroxenita fresca sin alteración con 5% de magnetita en la que los valores de susceptibilidad promedian 44×10^{-3} SI. Es notable que la intensidad magnética en esta zona es menor de aproximadamente -200 nT.

En la parte central del cerro El Portezuelo la mayoría de los valores resultan muy magnéticos con excepción de la muestra 2-IX-23, correspondiente a una metalava intensamente cizallada, cuyos bajos valores (0.48×10^{-3} SI) se asocian con alteración hidrotermal. Los valores altos se asocian con dos sitios de un derrame andesítico los cuales arrojan valores promedio de 14.27 y 8.05×10^{-3} SI (Figura 51). En lámina delgada una de las muestras contiene más de 1% de magnetita.

El oeste del cerro El Portezuelo formado por metalavas o posibles *sills* de clinopiroxenita (incluyen talco) los valores promedio de susceptibilidad varían entre 0.54×10^{-3} y 11.39×10^{-3} SI. La respuesta de magnetización de esta zona en el mapa de la Figura 51 es alta, en el rango de -66 nT.

4.2.2 Susceptibilidad magnética de las rocas intrusivas

Se identifican por lo menos seis plutones discretos alrededor del Valle de Ojos Negros, los cuales, de este a oeste son: Timoteo (PT), El Barbón (PEB), el conjunto La Huerta (PLH), los Cascabeles (PLC) y El Alamar (PEA) (Figura 51).

En la zona Oriental del valle, el plutón El Barbón (PEB), de composición granodiorítica a granítica, se expone en su extremo sur y en algunas ventanas en las rocas encajonantes metasedimentarias. Los valores de susceptibilidad en esta zona son muy bajos por la ausencia de magnetita en su mineralogía. Los valores de susceptibilidad promedio varían desde 0.013×10^{-3} hasta 0.294×10^{-3} SI (Figuras 52 y 53) y su intensidad magnética es de alrededor de -193 nT (Figura 51). El plutón Timoteo, colindante hacia el NW, es

principalmente tonalítico (PT en la Figura 51) y aparentemente intrusiva al plutón El Barbón. La susceptibilidad magnética de dos muestras del SW de este plutón es baja, cuyos rangos promedio de susceptibilidad varían entre 0.097×10^{-3} y 0.127×10^{-3} SI (Figura 52 y 53), con intensidad magnética menor de aproximadamente -163 nT (Figura 51). Los abundantes diques tipo San Marcos que lo intrusivan también tienen un magnetismo bajo.

El conjunto de plutones La Huerta ubicado al SW del valle, es un plutón compuesto por varios *stocks* que le dan un aspecto anidado de composición variable entre granodiorita y cuarzodiorita, cuya parte central es aparentemente más joven y de composición granítica. Los afloramientos de cuarzodiorita de hornblenda-biotita con enclaves máficos tienen hasta 2% de magnetita en la moda (muestra 8-III-24) y sus valores de susceptibilidad magnética promedio alcanzan hasta 42×10^{-3} SI (Figuras 52 y 53).

Dentro de ese mismo conjunto de plutones, la zona de muestreo de granodiorita de biotita y granodiorita de hornblenda también muestra valores de susceptibilidad altos, tanto en las rocas plutónicas como en uno de los diques que lo intrusiva. Los valores de susceptibilidad de tres muestras de granodiorita varían entre 13 y 18×10^{-3} SI, mientras que el dique arroja un valor de 11×10^{-3} SI (Figuras 52 y 53) (muestras 2-III-24, 4-III-24 y 5 III-24). Las muestras de granodiorita tienen magnetita en la moda hasta 3%. Se observa que la litología con valores altos de susceptibilidad es correlacionable con zonas con valores positivos de intensidad de campo magnético. En esta misma zona, un afloramiento de tonalita arroja una susceptibilidad promedio de 0.358×10^{-3} SI (Figura 53). El afloramiento de granito de dos micas del SW de la población La Huerta tiene valores de susceptibilidad de 0.11×10^{-3} SI (Figura 53), debido a su nulo contenido de magnetita, lo cual es consistente con su ubicación en una zona de intensidad de campo magnético menor a -243nT.

Al oeste del valle se encuentran los plutones Los Cascabeles, El Alamar y el plutón Guadalupe. Este último plutón en el NW del área de estudio está cartografiado como un plutón zonado por el INEGI (1976a; 1976b; 1977a; 1977b), cuya parte central probablemente es máfica, lo cual coincide con los valores de intensidad magnética más altos que se muestran en la Figura 51. Hacia los márgenes de este plutón, correspondientes a rocas más ricas en sílice, la intensidad magnética disminuye gradualmente hasta valores negativos en la zona del valle. En el mapa de la Figura 51, la zona occidental del valle muestra los valores de campo magnético más altos de la región.

El mapa de campo magnético (Figura 51) también muestra que el plutón Los Cascabeles es magnético, principalmente de diorita de hornblenda, donde la magnetita en la moda alcanza hasta el 10%. El plutón

también contiene granito de biotita sin magnetita y valores de susceptibilidad magnética de 0.075×10^{-3} SI. La susceptibilidad magnética de dos sitios de composición diorítica varía entre 1.5×10^{-3} SI y 11×10^{-3} SI en la parte central de la zona de muestreo (muestra 6-II-24). Este alto en la susceptibilidad se ve reflejado en la intensidad magnética >500 nT (Figura 51). La mayoría de los diques que intrusionan al plutón Los Cascabeles son dioríticos, no muestran valores de susceptibilidad significativos, entre 0.075×10^{-3} SI hasta los 0.79×10^{-3} SI, dado su poco o nulo contenido de magnetita.

Finalmente, del plutón El Alamar de composición principalmente granodiorítica, una muestra arroja un valor promedio de susceptibilidad magnética de 0.1×10^{-3} SI (Figura 52 y 53). El dique cuarzodiorítico que lo intrusióna, el cual contiene abundantes óxidos de Fe-Ti en lámina delgada, tiene un valor de susceptibilidad promedio de 1.04×10^{-3} SI. En el mapa de campo magnético de la Figura 51, la zona del plutón El Alamar contrasta con la del plutón Los Cascabeles por sus valores muy bajos de intensidad de campo magnético, cercanos al límite inferior en la escala del mapa. El dique cuarzodiorítico que intrusióna al plutón es más rico en magnetita.

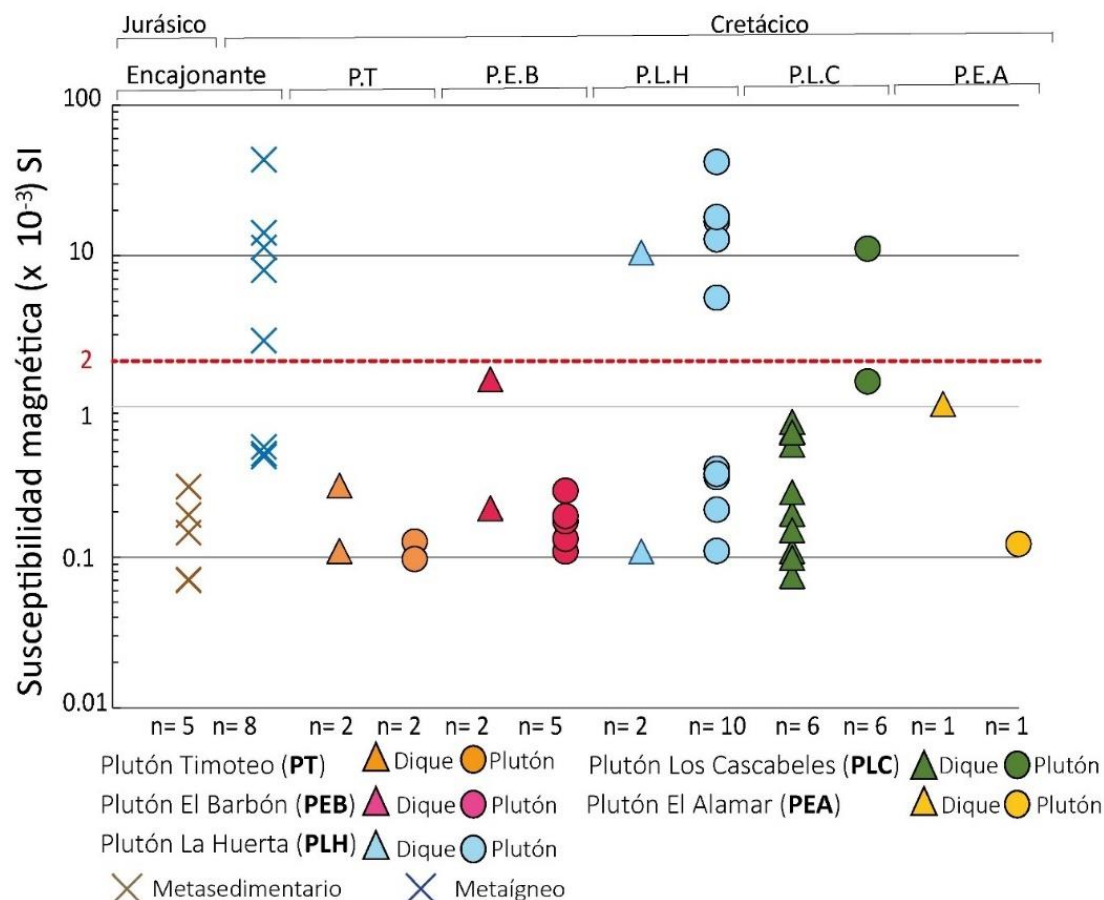


Figura 52. Susceptibilidad magnética ($\times 10^{-3}$ SI) de las rocas intrusivas y sus encajonantes en el área de estudio agrupados por plutón analizado. La línea discontinua marca 2×10^{-3} (SI) correspondiente a la frontera entre rocas consideradas magnéticas y no magnéticas. Abreviaturas: n: número de sitios medidos.

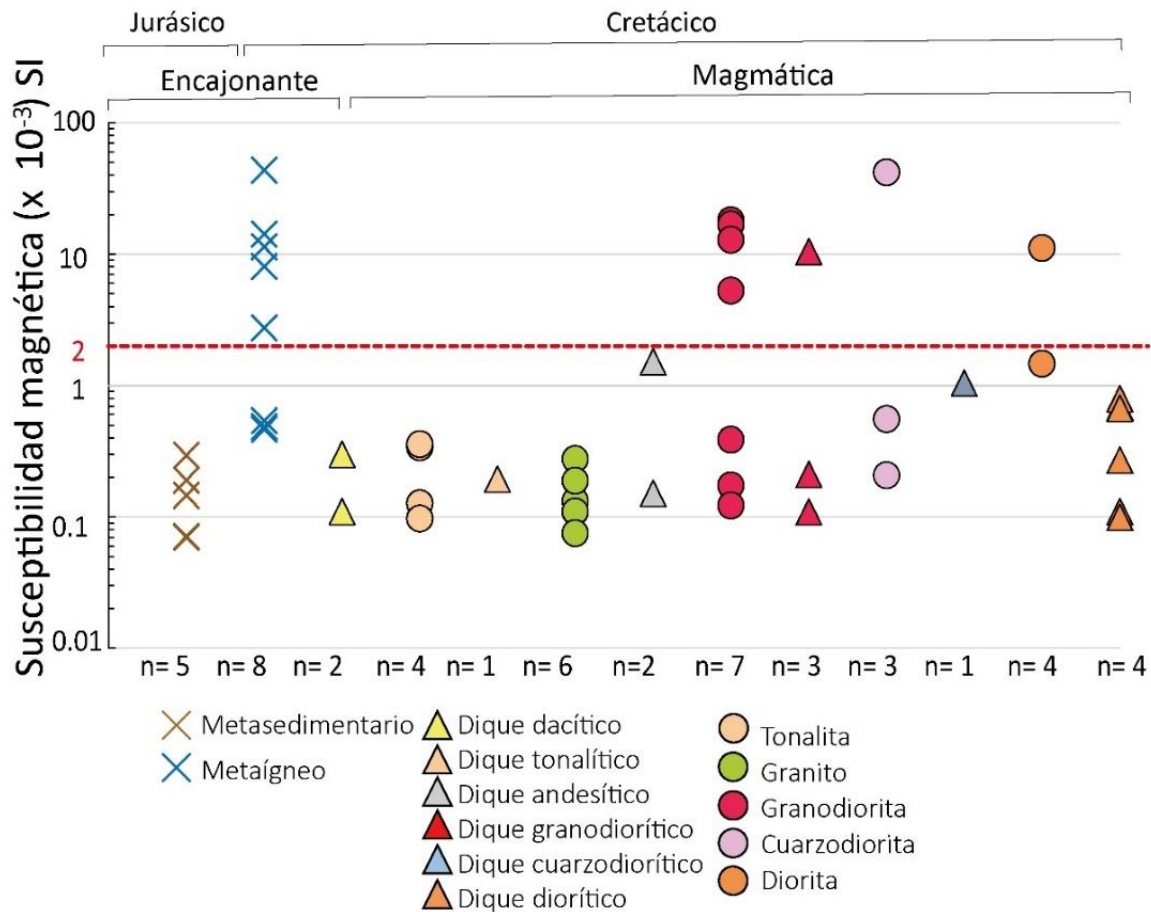


Figura 53. Susceptibilidad magnética ($\times 10^{-3}$ SI) de las rocas intrusivas y sus encajonantes en el área de estudio agrupados por litología. La línea discontinua marca 2×10^{-3} (SI) correspondiente a la frontera entre rocas consideradas magnéticas y no magnéticas. Abreviaturas: n: número de sitios medidos.

4.3 Modelo magnético tridimensional

El mapa de campo magnético y el modelo tridimensional de magnetización del área de estudio se presentan en la Figura 54. El modelo de magnetización se generó a partir del proceso de inversión magnética descrito en el capítulo 1.7 siguiendo la metodología de Carrillo-López et al. (2021). El modelo tridimensional de magnetización comprende 7, 4, 3 y 4 km hacia el W, N, E y S, respectivamente, del área de estudio con la intención de observar la extensión de los cuerpos magnetizados, según se observa en la Figura 54b y así evitar efectos de borde.

La profundidad (z) elegida de los prismas rectangulares homogéneos es de 6 km. Este modelo se realizó con el objetivo de interpretar la forma de los cuerpos magnetizados asociados con plutones, principalmente de composición máfica e intermedia.

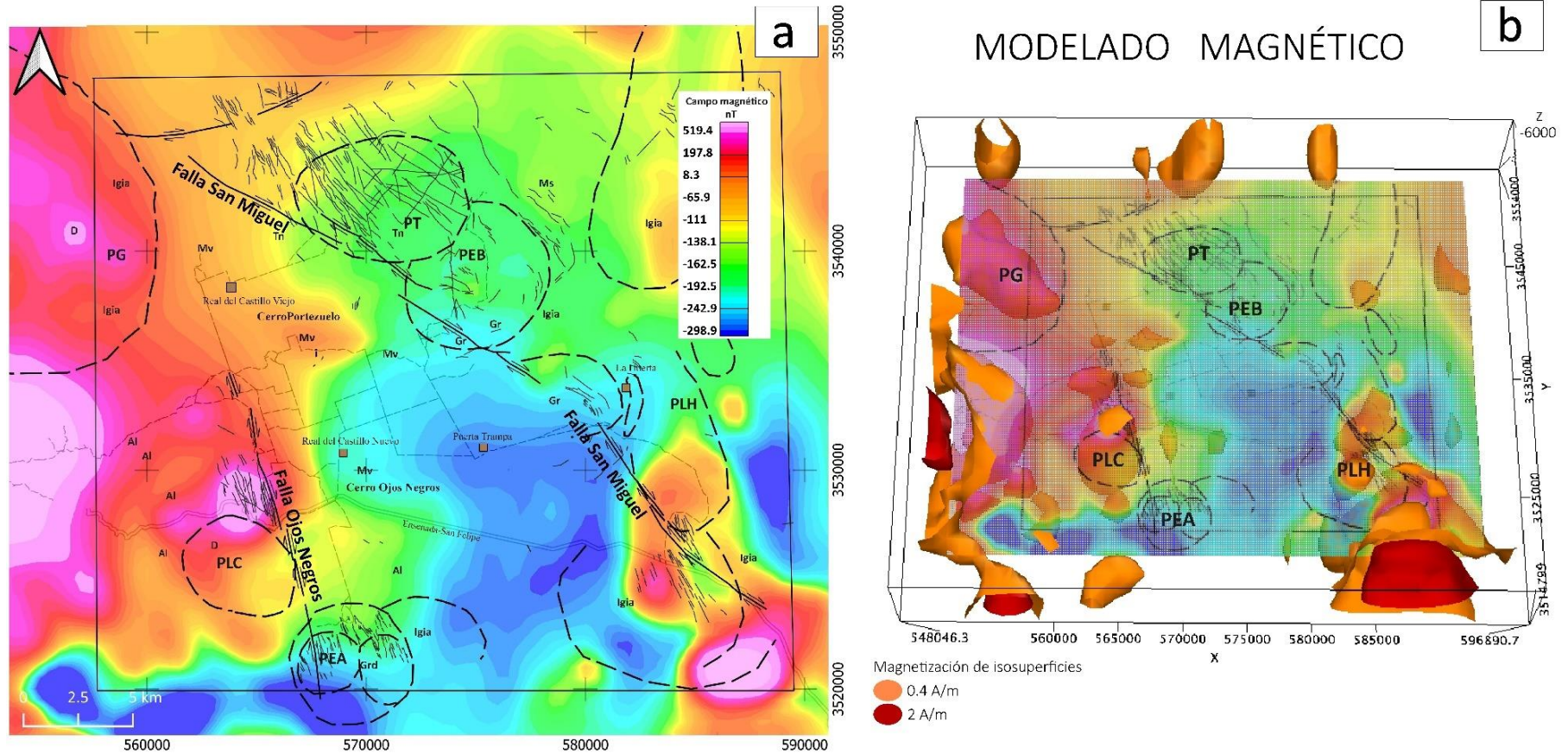


Figura 54. a) Mapa del campo magnético reducido al polo del Valle de Ojos Negros y zonas aledañas, marcando con líneas discontinuas los plutones identificados y lineamientos estructurales. Se delimita el área de estudio con un cuadro negro y se marca con abreviaturas las unidades litológicas. b) Modelo magnético tridimensional hasta 6 km de profundidad a partir de la inversión magnética. El modelo no tiene exageración vertical. Se muestran isosuperficies de magnetización de 0.4 A/m en anaranjado, hasta 2 A/m, correspondiente a las zonas en rojo. El mapa del campo magnético reducido al polo se presenta sobre las isosuperficies. Los cuerpos magnetizados permiten definir la forma y conectividad entre las rocas ígneas, principalmente en el occidente, mientras que en la zona de La Huerta se definen cuerpos discretos y un cuerpo voluminoso en la esquina SE del mapa magnético. Es notable la indefinición de los plutones Timoteo y El Barbón en el norte. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

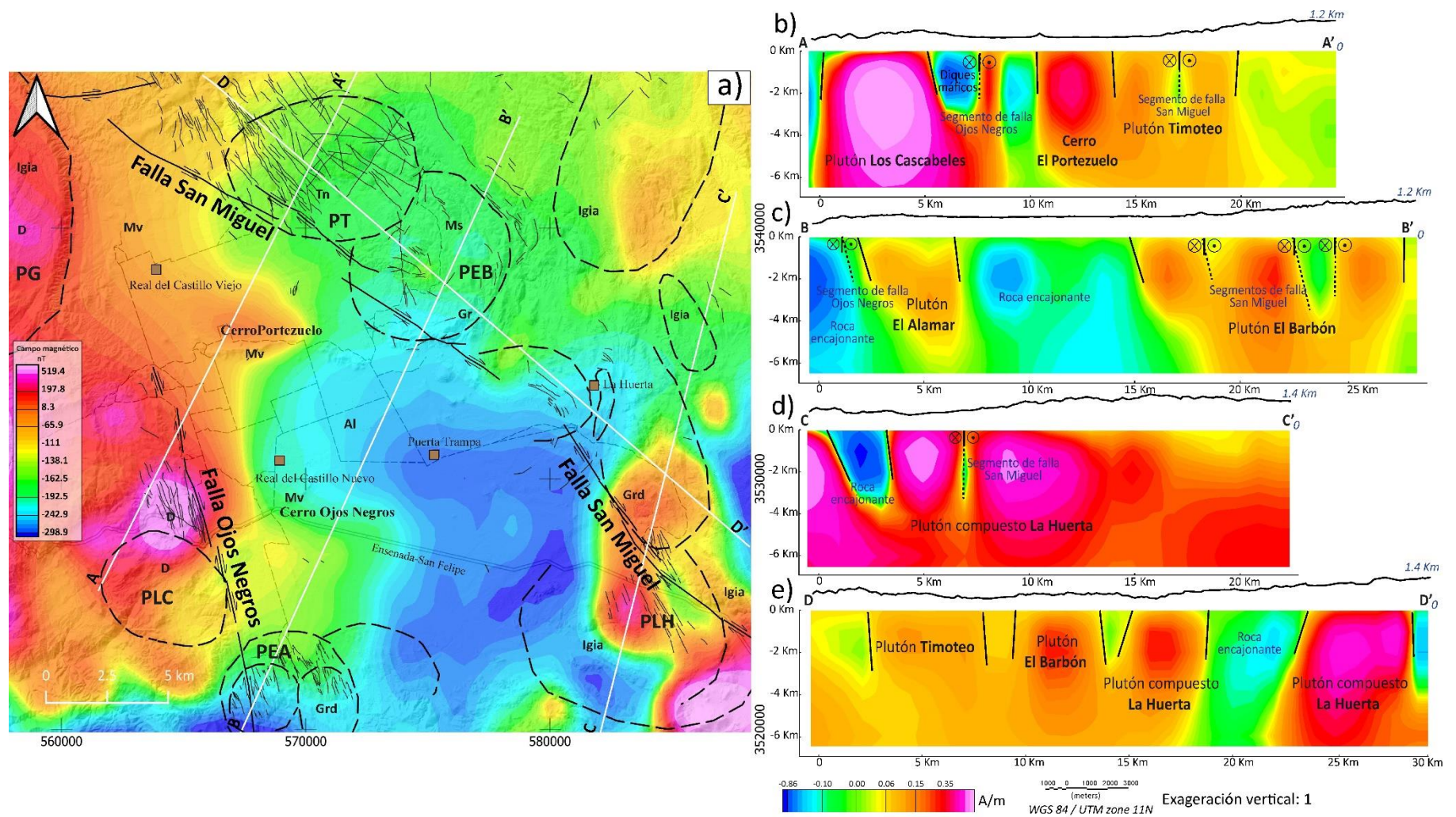


Figura 55. a) Mapa del campo magnético reducido al polo del Valle de Ojos Negros en donde se marcan los perfiles para las secciones transversales. Secciones transversales extraídas de la inversión magnética tridimensional hasta 6 km de profundidad, para los perfiles b) A-A', c) B-B', d) C-C' y e) D-D'. Las líneas continuas gruesas corresponden a los contactos entre cuerpos magnetizados contrastantes y, las líneas discontinuas indican los contactos con el sistema de fallas Ojos Negros y San Miguel, cartografiadas en superficie. **Coordenadas:** WGS 84/ UTM zona 11.

Para observar mejor la forma a profundidad se generaron isosuperficies, las cuales corresponden a cuerpos tridimensionales con valores iguales de magnetización. Los valores utilizados son de 0.4 A/m y 2 A/m. Las isosuperficies se pueden interpretar a los bordes de los plutones, los cuales, en la zona norte y noreste corresponden a cuerpos discretos hasta de 3 km de diámetro, aproximadamente.

En el NW, la porción magnética del plutón Guadalupe tiene una anchura de 7 km, mientras que el plutón Los Cascabeles, de aspecto más cilíndrico tiene 5 km de diámetro. El conjunto de plutones magnetizados de La Huerta son menores de 5 km de diámetro. Hacia el extremo SE del área de estudio, un plutón de composición gabrónica (INEGI, 1976a) puede tener un diámetro cercano a 8 km en su porción más magnetizada. Uno de los rasgos más notables corresponde a un cuerpo de aspecto tubular localizado al sur del plutón Guadalupe y oeste del plutón Cascabeles que podría indicar la conectividad lateral entre plutones de alta magnetización (2 A/m; Figura 54b). En el centro del valle, por debajo del cerro El Portezuelo (Figura 54b), formado por rocas metavolcánicas, se observa un cuerpo elongado con magnetización de 0.4 A/m, con intensidad magnética en el rango de -66 nT (Figura 54a). Aunque en el extremo este del cerro afloran granitoides que posiblemente se asocian al plutón El Barbón, su presencia no se manifiesta por su baja intensidad de campo magnético.

4.3.1 Perfiles magnéticos 2D

Se realizaron cuatro perfiles a través de los plutones Timoteo, El Barbón, el conjunto La Huerta, Los Cascabeles y El Alamar, así como el cerro El Portezuelo para observar con mayor detalle el aspecto de los cuerpos magnéticos. Estos fueron extraídos de la matriz tridimensional generada por la inversión magnética a 6 km de profundidad (Figura 55).

El perfil A- A' (Figura 55b) tiene una longitud de 24 km en dirección SW-NE, desde el plutón Los Cascabeles hasta el plutón Timoteo. El primer cuerpo en su porción central, con magnetización mayor de 0.35 A/m tiene una anchura aproximada de 2 km y la anchura máxima del plutón desde el punto de vista magnético alcanza los 5 km. Tomando en cuenta la base, cerca de los 6 km de profundidad, este plutón tendría cerca de 9 km de ancho. En el perfil, a 6 km de A se encuentra un bajo magnético de 2 km que coincide con la presencia de una serie de diques que pueden formar parte del Enjambre de Diques San Marcos. Este bajo magnético termina exactamente en la traza de la Falla Ojos Negros y profundiza hasta aproximadamente 3 km. Este bajo magnético enmascara el efecto que pudo producir la falla, como se observa en el corte de la falla San Miguel en el plutón Timoteo, en aproximadamente 17 km del inicio del perfil. En el interior del

valle, el cerro Portezuelo se caracteriza por un alto magnético que alcanza 4 km de profundidad. La porción más magnética de este cuerpo es de 0.35 A/m, la cual tiene 1.5 km de extensión aproximadamente (Figura 55b). Es importante notar que este cuerpo no profundiza pues es parte de las rocas encajonantes correspondiente a las rocas volcánicas o *sills* de la Formación Santiago Peak. A 2.5 km al NE del cerro El Portezuelo un nuevo bajo magnético coincide con la zona de falla San Miguel, la cual separa a un cuerpo moderadamente magnético (0.15 A/m) que a su vez coincide con la porción del plutón Timoteo en donde la densidad de diques del Enjambre San Marcos es mayor que la observada en el extremo NE del plutón en el mismo perfil.

El perfil B-B' (Figura 55c) inicia en la zona de falla Ojos Negros la cual, prácticamente, pone en contacto al plutón El Alamar, cuya porción más magnética es 0.1 A/m, con rocas volcanoclásticas metamorfizadas (INEGI, 1976b, 1977a, 1977b), presumiblemente de la Formación Santiago Peak. La sección atraviesa el valle, caracterizado por su magnetización baja (entre -0.1 y -0.86 A/m), la cual contrasta con litologías hacia el NE cuya magnetización se encuentra alrededor de 0.15 A/m, que correspondería a rocas intrusivas del plutón El Barbón. Ambos plutones profundizan más de 6 km. El plutón El Barbón, cuyas fracciones más magnéticas definen un plutón de diámetro aproximado de 12 km en la parte superior y de alrededor de 8 km en su parte inferior, lo que le da un aspecto trapezoidal. En la parte superior del plutón, el bajo magnético del SW coincide con la zona de falla San Miguel, mientras que el bajo magnético (0.0 A/m) corresponde a rocas metasedimentarias presumiblemente del Complejo Bedford Canyon, delimitadas por fallas normales con componente izquierda medidas en el campo.

El Perfil C-C' de 22 km de longitud atraviesa el conjunto de plutones La Huerta (Figura 55d) cuya magnetización máxima es mayor a 0.35 A/m. Los valores de magnetización altos tienen conexión con el plutón de composición gabrónica (INEGI, 1977b) de diámetro cercano a 8 km descrito en la Figura 54b. La sección corta al sistema de Falla San Miguel, que se define claramente por un bajo magnético angosto que profundiza hasta cerca de 4 km. El perfil D-D' es casi perpendicular a los tres anteriores (Figura 55e) y corta de NW a SE a los plutones Timoteo, El Barbón y al conjunto de plutones de La Huerta. Lo más destacable de este perfil es la definición de los contactos entre los plutones. El contacto intrusivo entre los Plutones Timoteo y El Barbón se manifiesta con un decremento sutil en la magnetización, mientras que entre este último plutón y el conjunto de intrusivos de La Huerta el bajo magnético (≈ 0.0 A/m) puede estar asociado con rocas encajonantes del Complejo Bedford Canyon, al igual que el amplio bajo magnético ubicado entre los plutones de La Huerta, que corresponden a un colgante entre el plutón más magnético del SE y el menos magnético del NW, o bien a rocas graníticas observadas en la localidad de La Huerta.

Capítulo 5. Discusión

En la región del Valle de Ojos Negros, en el noroeste de la península de Baja California se tiene un registro geológico dominado por rocas intrusivas pertenecientes al arco Santiago Peak. Este arco es la porción septentrional de un arco continuo el cual, atendiendo al mapa del campo magnético de Langenheim et al. (2014) se extendería hasta la región de Los Cabos, Baja California Sur (Figura 5b). En la región septentrional del arco desarrolló sobre corteza continental y hacia el sur sobre corteza oceánica, correspondiente al arco Alisitos. Aparentemente la frontera entre dichas porciones de arco es tectónica y está representada por la falla Agua Blanca ancestral (Wetmore et al., 2003).

Cerca del área de estudio se encuentran sucesiones sedimentarias fosilíferas ordovícicas (Lothringer, 1993) que se interpretan como asociadas al talud continental de la margen de Norteamérica (Gastil, 1993). Sobre esas rocas se depositó la sucesión sedimentaria y volcanosedimentaria del Complejo Bedford Canyon de 210-170 Ma (Wetmore, 2003). Esta unidad es importante en la región de Ojos Negros pues representa la unidad más antigua, expuesta en la porción oriental del área de estudio. El desarrollo de estructuras curvilíneas que caracterizan gran parte de los afloramientos metasedimentarios de este complejo en el oriente del Valle de Ojos Negros se debe al emplazamiento del plutón El Barbón, al que encajona. Tales rocas metasedimentarias están constituidas por metasamitas y metapelitas en facies que alcanzan el grado de anfibolita inferior (zona de estaurolita), las cuales están intrusionadas por diques máficos, entre los que se identificó un *sill* basáltico pseudoestratificado.

Dicho *sill* se asocia a las rocas básicas atribuibles a la Formación Santiago Peak del Cretácico Inferior que, en el Valle de Ojos Negros aflora de forma aislada como derrames brechados y lavas metamorizadas en facies de esquistos verdes. Las exposiciones más extensas se encuentran en el cerro El Portezuelo, el cual está intensamente cizallado desarrollando fábricas miloníticas en su porción occidental, mientras que en la parte central y oriental la deformación se concentra en planos de cizalla por falla.

A partir de los análisis geoquímicos, se interpreta que estas rocas son de composición basáltica y basáltico andesítica cuyos valores de SiO₂ son menores a 53%. En la porción más occidental del cerro se desarrolló talco, de donde se obtuvieron dos muestras cuyos protolitos pueden ser basaltos picríticos, pues su contenido de MgO es del orden del 30%, además de formar talco en pequeñas cantidades según se interpreta de análisis de DRX. Esas rocas son ricas en clorita (clinocloro), tremolita y clinozoisita. Desde el punto de vista geoquímico, los patrones paralelos de REE sugieren que las rocas prebatolíticas son

cogenéticas y que probablemente estén relacionadas con la Formación Santiago Peak. Los *sills* representan la fracción subvolcánica de volcanes compuestos como los identificados al oeste de Ojos Negros, en Ensenada, por Ledesma-Aguilar (2018). Lavas de la Formación Santiago Peak en Santa Ana, California, EUA, que es su localidad tipo, arrojan edades de ca. 128 Ma (Herzig y Kimbrough, 2014), sin embargo, la compilación de edades por Contreras-López et al. (2021), muestra que la parte norte del CBP contiene rocas metaígneas del Jurásico Medio (entre ca. 160-170 Ma) las cuales pertenecen a la zona W del CBP (latitud actual de Los Ángeles, California, EUA) que representan la fracción de arco oceánico, el cual contrasta con las rocas más orientales que muestran contaminación cortical (Kistler et al., 2014). Una notable similitud entre la región anterior y el área de Ojos Negros es que tales rocas jurásicas y del Cretácico Temprano intrusionan a rocas metasedimentarias Triásico-Jurásico, correlacionables con el Complejo Bedford Canyon (Kistler et al., 2014) que también se encuentran como colgantes en los plutones del Cinturón Batolítico Peninsular.

Con respecto a los plutones del área de estudio, se observa que Timoteo y El Barbón que se localizan en el oriente, intrusionan a rocas metasedimentarias del Complejo Bedford Canyon, mientras que los plutones del occidente, principalmente Los Cascabeles, intrusiona a meta-andesitas de la Formación Santiago Peak. Los tres plutones contienen diques cuyas composiciones varían entre básicas y ácidas. En conjunto forman un entramado de diques que se orientan notablemente en dirección NW-SE y han sido denominados como Enjambre de Diques San Marcos (Farquharson, 2004) los cuales se extienden por lo menos por 100 km desde Tecate hasta el distrito minero El Álamo. Este tipo de enjambres es común en el norte del CBP, en particular al oriente de la falla San Andrés, así como en diversos sectores de la Sierra Nevada, en California, EUA (Hopson et al., 2008). De acuerdo con Carl y Glazner (2002) enjambres de diques como el de Independence en Sierra Nevada, pudieron formarse en el techo de los plutones en respuesta a cizallamiento asociado con cambios rápidos en movimientos de bloques tectónicos, lo que da lugar a que las edades de los diques sean similares a las de los plutones que los contienen. A 10 km al norte del área de estudio, las edades de un dique del Enjambre San Marcos y del plutón que lo contiene son ca. 124 y 126 Ma, respectivamente (Almanza-García, 2023) lo que sugiere que su historia es similar a la observada en el sur de Sierra Nevada. Estas edades U-Pb son similares a las compiladas por Ortega-Rivera (2003), con el mismo método, para el Cinturón Batolítico Peninsular.

De acuerdo con la distribución modal QAP y las proyecciones de las series químicas de Frost y Frost (2008), el conjunto de muestras de los cinco plutones muestra una variación casi continua desde diorita hasta granito entre las tendencias de las series calcoalcalina y cálcica (Figura 46). Las rocas occidentales del plutón Los Cascabeles son las más básicas, mientras que los otros plutones muestran una evolución desde

tonalita-granodiorita hasta granito. Según Frost y Frost (2008) las muestras que siguen la trayectoria de la serie cálcica son características del CBP, mientras que las calcoalcalinas caracterizan a las de Toulumne (Sierra Nevada, California, EUA). En ese sentido, las muestras del plutón Los Cascabeles pueden tener una asociación más cercana al CBP (*sensu lato*) y las que se encuentran en la zona oriental, que incluyen granitoides de dos micas y granate, pueden ser más afines a las series características de la Sierra Nevada. En el plutón Los Cascabeles la hornblenda y el clinopiroxeno están tremolitizados posiblemente por alteración deutérica. Otra característica acerca de este plutón es el desarrollo de una textura principalmente isotrópica debido a su baja viscosidad.

El conjunto de plutones La Huerta, en el mismo diagrama QAP, muestra variaciones entre cuarzodiorita, tonalita, granodiorita y granito, el cual se considera la porción central de este conjunto. Aunque es difícil conocer el orden de emplazamiento de los plutones, se puede especular que el centro granítico es más joven, tal y como sucede en el plutón zonado Toulumne de la Sierra Nevada (Best, 2003).

5.1 Geoquímica de los plutones en el contexto regional

Para garantizar que las muestras analizadas son las adecuadas para efectuar interpretaciones geoquímicas, se utilizaron aquellas que grafican en la tendencia de las rocas ígneas según el diagrama de intemperismo químico MFW de Otha y Arai (2007). Dos muestras de metabasitas con talco del cerro El Portezuelo son la excepción, las cuales grafican hacia el vértice W, fuera del perfil de meteorización del basalto. Asumiendo que los plutones y los diques en ellos contenidos tienen una fuente común, se observa en el diagrama TAS de la Figura 44, que las rocas más básicas (gabros) corresponden a los diques de los plutones El Barbón y El Alamar, así como el gabro del plutón Los Cascabeles. Es notable en este diagrama, la ausencia de muestras en los campos de la diorita gabróica y diorita, mientras que, a partir del campo de la granodiorita, el diagrama muestra una tendencia casi lineal de incremento de álcalis con respecto al SiO_2 .

La interrupción entre las composiciones básicas a ácidas no se observa al graficar los minerales normativos An-Ab-Or (Barker, 1979) de la Figura 56d donde, el arreglo lineal se define desde el campo de la tonalita hasta el del granito. Esta observación sugiere una evolución magmática controlada por procesos de cristalización fraccionada y asimilación cortical. A medida que el magma se diferencia, hay una mayor cristalización de minerales máficos tempranos y plagioclasa rica en Ca, dejando un residuo enriquecido principalmente en potasio pues, como se observa en los diagramas sílice vs. K_2O y sílice vs. Na_2O (Figuras

45 b y 45c), en el diagrama del K_2O se muestra un enriquecimiento notable (0.16 a 4.5%) mientras que en el de Na_2O los contenidos se encuentran entre 3 y 4%.

En los diagramas de la Figura 56 están incluidos los campos en los que grafican las rocas de la Formación Santiago Peak (Herzig y Kimbrough, 2014) en California, EUA, así como los diques y rocas plutónicas analizadas entre el rancho San Marcos y el Valle de Ojos Negros (Farquharson, 2004; Almanza-García, 2023). En los diagramas se observa que los campos entre la diorita y la fracción pobre en sílice de la granodiorita ahora está cubierta por las muestras afines con el Enjambre de Diques San Marcos (Figura 56a). Se observa también que el conjunto de la Formación Santiago Peak en su localidad tipo en California, EUA, muestra una tendencia más pobre en álcalis que la de la región de Baja California analizada por Almanza-García (2023). Las rocas de este trabajo grafican en el mismo diagrama TAS casi por completo en el campo de las muestras, principalmente del Enjambre de Diques San Marcos de Almanza-García (2023). Estas tendencias sugieren que existen relaciones genéticas entre estas unidades, las cuales, en el diagrama FeO^* vs. sílice se traslapan. La diferencia más notable se observa en el menor contenido de FeO^* de las muestras con sílice menor de 55% de Santiago Peak, mientras que las rocas con esa proporción de sílice del plutón Los Cascabeles y otros diques tienen el mayor enriquecimiento (Figura 56b). El diagrama con respecto a ASI, indica que las rocas máficas ($\approx 50\% SiO_2$) grafican prácticamente en la misma zona y la separación, debida posiblemente a contaminación cortical se observa en el campo del granito (Figura 56c).

Los minerales normativos An-Ab-Or del diagrama de Barker (1979) muestran que, a diferencia de las muestras de Santiago Peak y del Enjambre de Diques San Marcos, el contenido de albita es prácticamente constante entre las rocas de composición tonalítica y granítica, lo cual es consistente con el enriquecimiento pronunciado que se discute a partir de las Figuras 45b y c. Tal tendencia evolutiva es evidente en el diagrama de discriminación tectónica de Pearce et al. (1984) donde todas las rocas grafican en el campo de los granitos de arco volcánico con un rango pequeño de variación en el eje Y+Nb, pero muestran un enriquecimiento notable en el Rb, el cual es compatible con el K. De acuerdo con Frost y Frost (2008) las tendencias observadas son típicas de magmas calcoalcalinos en ambientes de subducción.

De acuerdo con los resultados geoquímicos de este trabajo, los de Santiago Peak y el Enjambre de Diques San Marcos (Farquharson, 2004; Herzig y Kimbrough, 2014; Almanza-García, 2023) es probable que las rocas jurásicas de la Formación Santiago Peak representen el segmento más antiguo de Cinturón Batolítico Peninsular. El equivalente más cercano a esa formación en el área de estudio se encuentra en el cerro Portezuelo el cual, está intrusionado por diques félsicos que posiblemente se asocien con el plutón El Barbón cuya edad es ca. 126 Ma (Almanza-García, 2023).

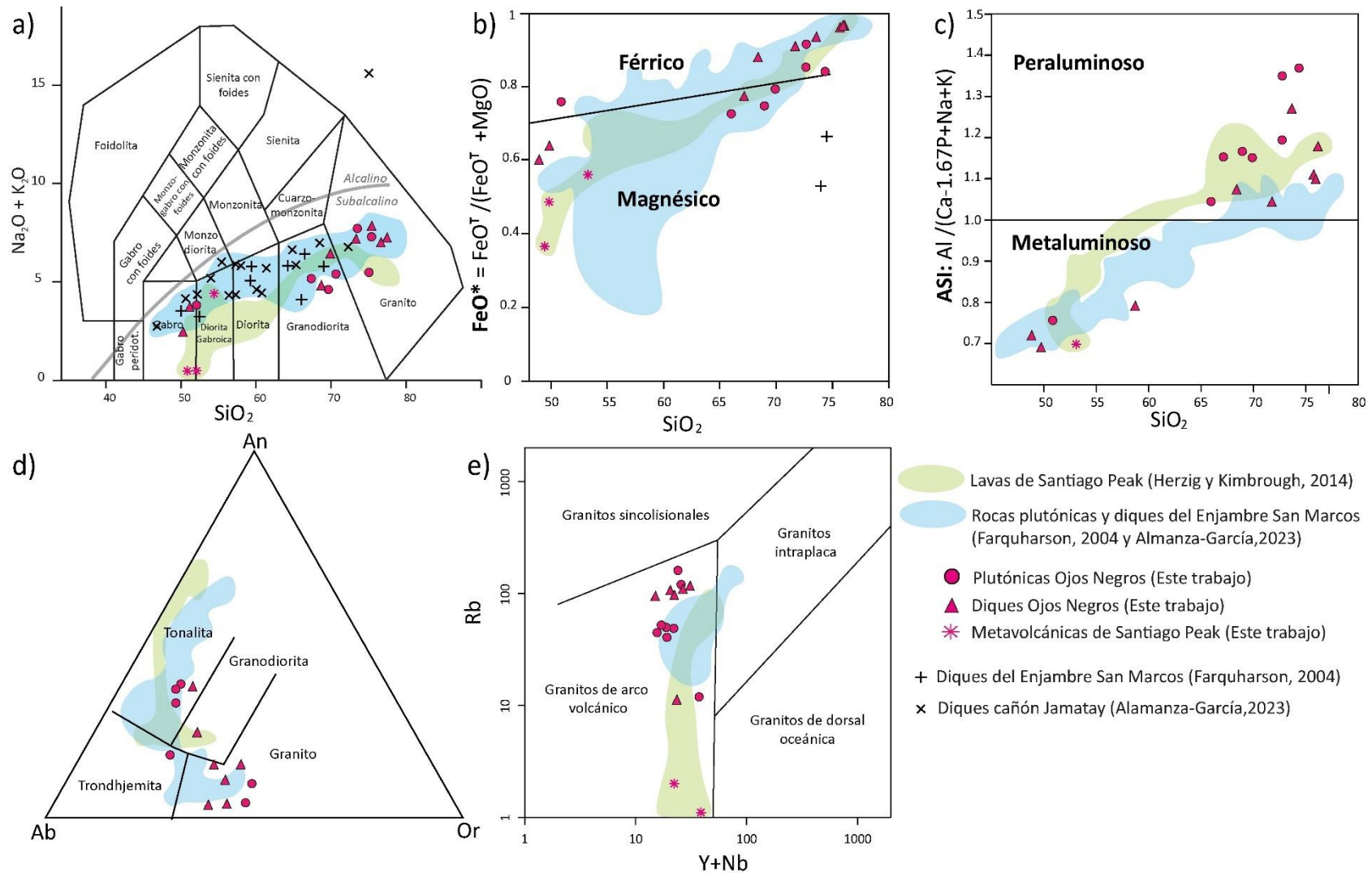


Figura 56 Diagramas de clasificación geoquímica para muestras correlacionables con las del Valle de Ojos Negros, marcadas con símbolos en color rosa (este trabajo); las muestras de la Formación Santiago Peak se somborean en color verde (Herzig y Kimbrough, 2014) y el conjunto de diques del Enjambre San Marcos en azul (Farquharson, 2004 y Almanza-García, 2023). a) Diagrama de álcalis totales vs. sílice (TAS; Middlemost, 1994) para rocas plutónicas. b) Diagrama de sílice vs. FeO^* (Frost y Frost, 2008). c) Diagrama de sílice vs. índice de saturación de aluminio (ASI; Frost y Frost, 2008). d) Diagrama de clasificación An-Ab-Or (Barker, 1979) para rocas graníticas de acuerdo con su composición normativa CIPW, e) diagrama de discriminación tectónica para granitos Y+Nb vs Rb (Pearce et al., 1984).

5.2 Relaciones tectónicas regionales

De manera sintética, tres episodios que comprenden desde el Jurásico hasta la actualidad dan forma a la región de Ojos Negros (Figura 57). No obstante, al norte de esta zona hay evidencias de olistolitos ordovícicos en filitas y meta-areniscas mesozoicas de ambiente de talud continental. Las cuales fueron reportadas en la región de San Marcos por Lonthringer (1993). En el área de estudio, la sucesión de metapelitas y metasamitas que afloran en el oriente parecen ser correlacionables con el Complejo Bedford Canyon del Triásico-Jurásico Medio. Wetmore et al. (2003) mencionaron que dicho complejo incluye varias secuencias de turbiditas ricas en volcániclastos. Tales clastos volcánicos posiblemente provengan de la actividad magmática que se reporta en el SW de E.U.A. en zonas francamente continentales y de margen continental (Stern et al., 1981) y representadas en los mapas paleogeográficos de Blakey (2013). En ese escenario, la Formación Santiago Peak, cuyas rocas ígneas más antiguas se sitúan en alrededor de 168 Ma (ver referencias en Contreras-López et al., 2020) y sus equivalentes volcánicos se depositaron sobre el Complejo Bedford Canyon (Figura 7).

La estratigrafía prebatolítica al norte de la ancestral falla Agua Blanca incluye secuencias del Triásico Tardío al Jurásico Medio que se han descrito en distintas localidades del sur de California y al noroeste de Baja California, constituidas por rocas ricas en material volcániclastico que forman un grupo de depósitos marinos profundos a moderadamente profundos, conocido como Complejo Bedford Canyon cuya localidad tipo está en las montañas de Santa Ana al sur de California, EUA (Wetmore et al., 2003). Se interpreta que las secuencias metasedimentarias son la base de la columna estratigráfica (Figura 7) y registran el primer episodio geológico del Valle de Ojos Negros, las cuales fueron probablemente depositadas alrededor del Triásico Tardío o Jurásico Temprano, en un ambiente de cuenca trasarco (Figura 57), similar a lo reportado en el segmento sur del Cinturón Batolítico Peninsular (Contreras-López et al., 2025). Su metamorfismo está relacionado con el del esquisto Julián, en el sur de California, EUA el cual alcanzó facies de anfibolita inferior, entre el Jurásico Medio y Cretácico Superior (Todd et al., 2014; Shaw et al., 2003).

El magmatismo del Jurásico Medio-Tardío (ca. 168 Ma) asociado con el arco Santiago Peak se desarrolló en un arco de islas (Contreras-López et al., 2020), cuyas rocas plutónicas en el este de San Diego, California, EUA, según Shaw et al. (2003) son granodioríticas y tonalíticas metaluminosas a peraluminosas intrusionadas por plutones tipo I del Cretácico Temprano, cuyos contactos pueden estar milonitizados. El magmatismo de la Formación Santiago Peak es continuo hasta aproximadamente 110 Ma según Herzig y

Kimbrough (2014), quienes lo describen como un arco subaéreo que evolucionó a lo largo de la margen SW de Norteamérica.

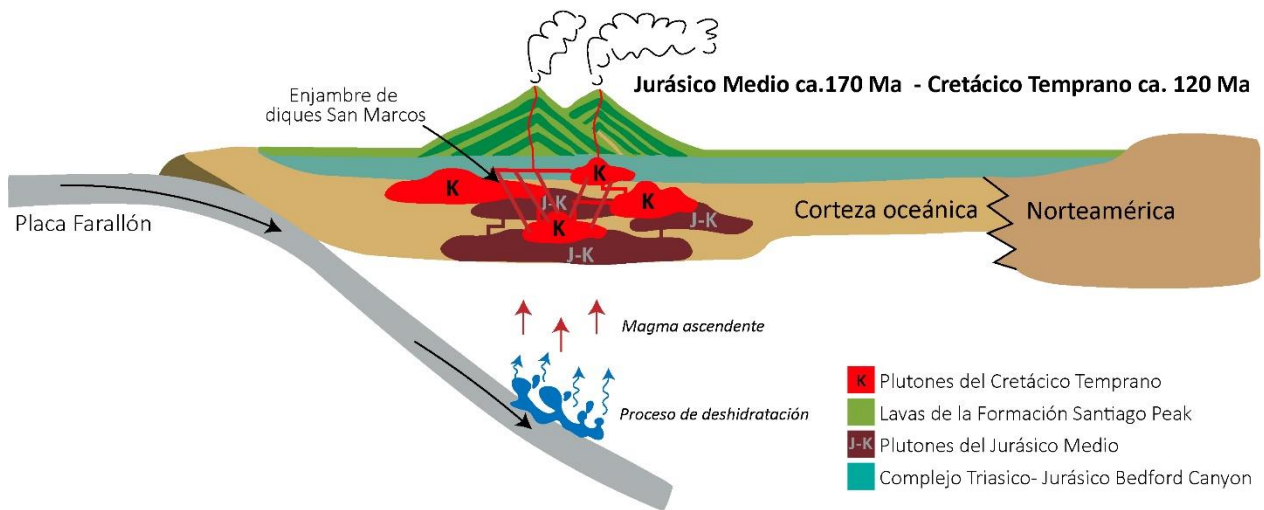


Figura 57 Modelo tectónico propuesto para el área de Ojos Negros que muestra los episodios regionales en el sur de California EUA y noroeste de Baja California. A partir del Triásico, hasta el Jurásico Medio se depositaron rocas sedimentarias con material derivado del continente, formando el Complejo Bedford Canyon, metamorfozadas en facies de anfibolita. Este Complejo está sobreyacido por rocas volcánicas del arco de islas Santiago Peak del Jurásico-Cretácico Temprano que se ubica cerca del margen continental y es parte del norte del Cinturón Batolítico Peninsular. En esa región el magmatismo es continuo hasta el Cretácico Temprano, de forma que los plutones iniciales están intrusados por plutones de las últimas fases magmáticas de este arco continuo (Shaw et al., 2003). En el área de estudio el emplazamiento de plutones de ca. 126 Ma y del Enjambre de Diques San Marcos es penecontemporáneo.

Las rocas volcánicas de la Formación Santiago Peak en la zona de estudio están representadas por metandesitas brechadas con fábricas protomiloníticas en afloramientos del Real del Castillo Viejo y Real del Castillo Nuevo. En el sector central del valle, en el cerro El Portezuelo las metabasitas ubicadas en el extremo W se interpretan como equivalentes subvolcánicos, posiblemente *sills*. Estas rocas metaígneas, interpretadas como basaltos picríticos presentan metamorfismo en facies de esquistos verdes, particularmente ricos en epidota y minerales del grupo de la clorita, con desarrollo local de talco.

Tanto las rocas máficas del oriente del cerro El Portezuelo como los *sills* que se emplazaron en el Complejo Bedford Canyon en la región del plutón El Barbón tienen concentraciones altas de clinopiroxeno y alcanzan a desarrollar fábricas de seudoestratificación. En ellos el contenido de magnetita puede ser del orden del 5%, al que se asocia su susceptibilidad magnética hasta de 14.27×10^{-3} SI y magnetización del orden de >2 A/m.

Las rocas metasedimentarias del Complejo Bedford Canyon, así como las volcánicas y subvolcánicas de la

Formación Santiago Peak están deformadas. Se deduce a partir del análisis de foliación, lineación y de cizallas, que los esfuerzos máximos dominantes responsables de la deformación regional debieron orientarse en dirección NW-SE, N-S y NE-SW (Figuras 38 y 41). Es común observar también cambios en esas tendencias debido principalmente al emplazamiento posterior de las rocas plutónicas, las cuales no están deformadas. De acuerdo con esta observación, el periodo dominante de deformación debió ocurrir entre la edad probable de las rocas volcánicas de la Formación Santiago Peak de ca. 128 Ma (Herzig y Kimbrough, 2014) y ca.124 Ma, edad de un dique del Enjambre de Diques San Marcos (Almanza-García, 2023). En la zona donde la deformación es más intensa se define una estructura tipo anticlinal, donde la zona interna se ubicaría en el cerro Portezuelo. En la parte occidental de este cerro las soluciones cinemáticas definen fallamiento inverso con desplazamiento lateral, asociado con una deformación transpresiva (Figura 41c y d). Características similares reporta Ledesma-Aguilar (2018) en secuencias volcánicas de la Formación Santiago Peak en el oriente de Ensenada, Baja California.

Los plutones emplazados y el Enjambre de Diques San Marcos en la región de Ojos Negros son afines geoquímicamente a las rocas volcánicas de Santiago Peak (Figura 57). Al igual que las rocas plutónicas y diques, las lavas de la Formación Santiago Peak forman una serie continua desde el basalto hasta las riolitas, pero estas últimas son ligeramente más pobres en álcalis. El mayor enriquecimiento de feldespatos potásicos en el diagrama An-Ab-Or de Baker (1979) y de Rb en el diagrama Y+Nb vs. Rb (Pearce et al., 1984) puede deberse al efecto de contaminación con corteza continental y metapelitas como las del Complejo Bedford Canyon, como lo sugiere también la presencia de dos micas en los plutones del oriente. Esa región también coincide con una zona de traslape entre las subprovincias de plutones con magnetita del occidente y sin magnetita del oriente, estos últimos, ricos en granate o muscovita, coincide con regiones cuyo basamento es de afinidad continental (Gastil et al., 1990).

Siguiendo el criterio anterior los plutones orientales El Barbón, Timoteo y algunos *stocks* del conjunto de plutones La Huerta de composición mayormente granítica, contienen muscovita y granate, son menos magnéticos, de donde se infiere que están más contaminados. Los valores bajos o nulos de magnetita en dichos plutones orientales limitan la definición de la extensión y forma con el modelo magnético 3D. Entre el conjunto de plutones La Huerta, destacan algunos intrusivos con un contenido de magnetita >2% y valores de susceptibilidad magnética que alcanzan los 42×10^{-3} SI y magnetización >2 A/m. Por esas características fue posible observar del modelo magnético 2D y 3D (Figuras 54 y 55d) que en una sección orientada NNE (C-C' en la Figura 55d) del cuerpo magnetizado principal de 11 km de longitud en su porción más magnetizada tiene más de 6km de profundidad. Este plutón está cortado por la falla San Miguel formando dos cuerpos magnetizados de aproximadamente 5 km de diámetro. Es probable que estos

intrusivos formen parte de un plutón particularmente grande y magnetizado que se localiza en el extremo SE, fuera del área de estudio, y cuya relación temporal con los intrusivos de la Huerta se desconoce.

En contraste con la discontinuidad de los cuerpos magnetizados del oriente, en la parte occidental los valores del campo magnético son notablemente más altos, hasta 519 nT. Los plutones mejor definidos son el Guadalupe en el NW y Los Cascabeles en el suroeste del área de estudio. El plutón Los Cascabeles tiene 5 km de diámetro y su forma es cilíndrica. El perfil de la Figura 55b muestra que en la zona de falla Ojos Negros se forma un bajo magnético similar al observado en la Falla San Miguel. El efecto parece estar oscurecido por el hecho de que hacia el SW de la zona de falla se encuentra un conjunto de diques más ricos en sílice con intensidad magnética menor a 200 nT. En la misma sección, hacia el NE, la falla San Miguel tiene una expresión similar a la descrita en la región del plutón La Huerta (Figura 55d), mientras que las rocas máficas pertenecientes a la Formación Santiago Peak en el cerro El Portezuelo muestran un cuerpo magnetizado más somero que los plutones más jóvenes sugiriendo que puede asociarse con un colgante.

Los marcados contrastes en las propiedades magnéticas entre los plutones del occidente y oriente de la zona de estudio concuerdan con las observaciones hechas por Gastil et al. (1990), quien define a esta región como una zona de traslape a partir de la respuesta aeromagnética y la definición de la línea magnetita-ilmenita. Estos autores mencionan que este límite regional se rige por diferencias en las concentraciones de agua y oxígeno de los magmas parentales.

Con respecto al emplazamiento del Enjambre de Diques San Marcos en el Valle de Ojos Negros, Farquharson (2004) mencionó que el buzamiento persistente hacia el NE de los diques sugiere que esta porción del batolito se haya inclinado regionalmente hacia el SW. Sin embargo, los datos paleomagnéticos en diques de la misma región fechados en ca. 120 Ma no soportan el basculamiento en esta zona (Böhnel et al., 2002).

El último episodio regional registrado en el área de estudio se asocia con el actual fallamiento activo que delimita los bordes este y oeste del valle. A partir de las soluciones cinemáticas de las fallas San Miguel y Ojos Negros (Figura 41) se propone que pertenecen al mismo periodo de deformación. Esas fallas activas se extienden, a partir de las secciones transversales 2D de la Figura 55 hasta aproximadamente 3 km de profundidad.

Capítulo 6. Conclusiones

Las rocas encajonantes más antiguas en el área de estudio se encuentran en la zona oriental del Valle de Ojos Negros, donde afloran una secuencia de metapelitas y metasamitas que, por su ensamble mineral, se asocian con facies de anfibolita inferior. Estas rocas se correlacionan con el Complejo Bedford Canyon del Triásico- Jurásico.

Sobreyacen al Complejo Bedford Canyon metalavas de la Formación Santiago Peak, las cuales están metamorfizadas en facies de esquistos verdes y se exponen en el sector occidental y central del valle en afloramientos individuales, así como en el cerro El Portezuelo. Algunas muestras presentan concentraciones altas de MgO, por lo que se infiere que su protolito son basaltos picríticos. Estas rocas están intensamente cizalladas por deformación transpresiva, que debió ocurrir antes de ca. 126 Ma, edad más antigua de las rocas plutónicas del Cinturón Batolítico Peninsular en la región.

Se analizaron cinco plutones en el Valle de Ojos Negros (Timoteo, El Barbón, La Huerta, Los Cascabeles y El Alamar), los cuales pertenecen a la porción sur del arco Santiago Peak, dentro del Cinturón Batolítico Peninsular. Estas rocas son producto de una serie de pulsos magmáticos con variaciones mineralógicas y geoquímicas en litologías desde diorita hasta granito, pertenecientes a las series cálcicas y calcoalcalinas.

Los plutones del Valle de Ojos Negros, están intrusionados por el Enjambre de Diques San Marcos de ca. 124 Ma, con orientación preferencial NNW-SSE, geoquímicamente muestran características afines con las rocas plutónicas que lo contienen. Este enjambre pudo formarse en el techo de los plutones, como los de Independence en Sierra Nevada.

Los plutones más diferenciados se encuentran en la parte oriental del Valle de Ojos Negros: El Timoteo, El Barbón y algunos *stocks* del conjunto La Huerta. Las rocas de composición granítica contienen muscovita y granate. En contraste, al oeste, el plutón Los Cascabeles es el más máfico, su composición a partir del diagrama QAP es diorítica y es muy magnetizada.

A partir del análisis geoquímico se interpreta que los plutones del Valle Ojos Negros experimentaron procesos de evolución magmática por cristalización fraccionada y asimilación cortical.

Desde el punto de vista geoquímico los plutones, el Enjambre de Diques San Marcos y las lavas de la Formación Santiago Peak pertenecen al mismo sistema magmático.

Los plutones de la zona oriental se caracterizan por ser débilmente magnetizados, mientras que los de la zona occidental son notablemente más magnetizados. La parte sur de la zona oriental tiene ambas características por lo que se le considera una zona de traslape.

Del modelo magnético 3D y las secciones transversales 2D, se concluye que los plutones profundizan aproximadamente más de 6 km. La falla San Miguel divide en dos *stocks* de aproximadamente 5 km de diámetro al plutón La Huerta. Debido posiblemente a su baja viscosidad, el plutón Los Cascabeles de 5 km de diámetro tiene una forma cilíndrica.

Las fallas activas San Miguel y Ojos Negros cortan a los plutones La Huerta y Los Cascabeles, respectivamente y se definen por su baja magnetización que se extiende hasta aproximadamente 3 km de profundidad.

La historia geológica del Valle de Ojos Negros comprende desde el Triásico-Jurásico hasta el presente. Inicia con la formación del Complejo Bedford Canyon con aporte sedimentario derivado del continente, seguido por magmatismo claramente continuo desde el Jurásico hasta finales del Cretácico Temprano y finalmente, el fallamiento activo en los sistemas de fallas San Miguel y Ojos Negros.

Literatura citada

- Allmendinger, R. W. (2016) *Faultkin* (version 8.3) [Software]. Richard W. Allmendinger <https://www.rickallmendinger.net/faultkin>
- Almanza-García, C. E. (2003). *Petrogénesis de los diques emplazados en el Cañón Jamatay, Valle de Guadalupe, Baja California* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio institucional. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3937>
- Alsleben, H., Wetmore, P. H. & Paterson, S. R. (2014). Structural evidence for mid-Cretaceous suturing of the Alisitos arc to North America from the Sierra Calamajue, Baja California, Mexico. In D. M. Morton & F. K. Miller (Eds.), *Peninsular Ranges Batholith, Baja California and Southern California*. Geological Society of America Memoir 211 (pp. 691–711). [https://doi.org/10.1130/2014.1211\(22\)](https://doi.org/10.1130/2014.1211(22))
- Antonio-Carpio, R.G. (2009) *Análisis de la transformación serie-paralelo y desarrollo de nuevos procesos para la interpretación de datos magnetotélúricos* [Tesis de doctorado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio institucional. Repositorio institucional <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2034>
- Ávila-Ortiz, N.A.E. (2021) *Análisis geológico y magnetométrico del plutón zonado La Primavera en el borde de las zonas occidental y oriental del sur del Cinturón Batolítico Peninsular, Baja California* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio institucional <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3537>
- Barker, F. (1979). Trondhjemite: definition, environment and hypothesis of origin. In Barker, F. (ed.), *Trondhjemites, dacites and related rocks* (pp. 1-12): Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41765-7.50006-X>
- Best, M. G. (2003). *Igneous and metamorphic petrology* (2nd ed.). Blackwell Science.
- Bhattacharyya, B.K. (1964). Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, 29(4), 517-531. <https://doi.org/10.1190/1.1439386>
- Blakey, R. (2020). *Deep Time Maps: Maps of ancient Earth (North America)*. <https://deeptimemaps.com/map-lists-thumbnails/north-america>
- Böhlner, H., Delgado-Argote, L. A. & Kimbrough, D. L. (2002). Discordant paleomagnetic data for middle-Cretaceous intrusive rocks from northern Baja California: Latitude displacement, tilt, or vertical axis rotation? *Tectonics*, 21(5), 13-1. <https://doi.org/10.1029/2001TC001298>
- Cardozo, N. & Allmendinger, R. W. (2013). Spherical projections with OSXSteronet. *Computers & Geosciences*, 51, 193-205. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.021>
- Carl, B. S. & Glazner, A. F. (2002). Extent and significance of the independence dike swarm eastern California. In A. F. Glazner, J. D. Walker & J. M. Bartley (Eds.), *Geologic evolution of the Mojave Desert and southwestern Basin and Range*. Geological Society of America Memoir 195 (pp. 117-130). <https://doi.org/10.1130/0-8137-1195-9.117>

- Carr, M. J. & Gazel, E. (2016). Igpet software for modeling igneous processes: examples of application using the open educational version. *Mineralogy and Petrology*, 111(2), 283–289. <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0473-z>
- Carrillo, J., Perez-Flores, M. A., Gallardo, L. A., & Schill, E. (2022). Joint inversion of gravity and magnetic data using correspondence maps with application to geothermal fields. *Geophysical Journal International*, 228(3), 1621–1636. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab416>
- Clark, D. A. (1997). Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 83–104. https://www.researchgate.net/publication/266077672_Magnetic_petrophysics_and_magnetic_petrology_Aids_to_geological_interpretation_of_magnetic_surveys/citations
- Clark, D. A. (1999). Magnetic petrology of igneous intrusions: implications for exploration and magnetic interpretation. *Exploration Geophysics*, 30(1–2), 5–26. <https://doi.org/10.1071/EG999005>
- Contreras-López, M. (2020). *Petrología, geoquímica, isotopía Sr-Nd-Hf y geocronología U-Pb del transecto Sierra El Arco-El Barril: Magmatismo del Jurásico Medio al Cretácico Tardío, extremo sur del Cinturón Batolítico Peninsular, Baja California México*. [Tesis de doctorado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio institucional. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3486>
- Contreras-López, M., Delgado-Argote, L.A., Weber B., Torres-Carrillo, X.G., Ávila-Ortiz, N.A.E. & Quintana-Delgado, J. A. (2025). U-Pb detrital zircon and Sm-Nd garnet-whole-rock geochronology of metasedimentary rocks from the southern Peninsular Ranges Batholith, Baja California, Mexico: Inferred Early Jurassic deposition, followed by Middle Jurassic and Cretaceous metamorphism. In N. Riggs, K. Putirka & J. Wakabayashi (Eds.), *The Virtue of Fieldwork in Volcanology, Sedimentology, Structural Geology, and Tectonics—Celebrating the Career of Cathy Busby*. Geological Society of America Special Paper 563 (pp. 1–20). [https://doi.org/10.1130/2025.2563\(11\)](https://doi.org/10.1130/2025.2563(11))
- Contreras-López, M., Delgado-Argote, L. A., Weber, B., Torres-Carrillo, X. G., Frei, D. & Gómez-Álvarez, D. K. (2020). Petrogenesis of the meta-igneous Rocks of the Sierra El Arco and coeval magmatic rocks in Baja California: Middle Jurassic-Early Cretaceous (166–140 Ma) island arc magmatism of NW Mexico. *International Geology Review*, 63(9), 1153–1180. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1753249>
- Contreras-López, M., Delgado-Argote, L. A., Weber, B., Torres-Carrillo, X. G., Frei, D., Gómez-Álvarez, D. K., Tazzo-Rangel, M. D. & Schmitt, A. K. (2021). Geochemistry, U–Pb geochronology, and Sr–Nd–Hf isotope systematics of a SW–NE transect in the southern Peninsular Ranges batholith, Mexico: Cretaceous magmatism developed on a juvenile island-arc crust. *Lithos*, 400, 106375. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106375>
- Cox, K. G., Bell, J. D. & Pankhurst, R. J. (1979). *The interpretation of igneous rocks*. George Allen & Unwin. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-3373-1>
- Davis, G. H., Reynolds, S. J. & Kluth, C. F. (2012). *Structural geology of rocks and regions* (3rd ed.). John Wiley and Sons.
- Deer, W. A., Howie, R. A. & Zussman, J. (2013). *An introduction to the rock-forming minerals* (3rd ed.). Berfords Information Press. <https://doi.org/10.1180/DHZ>

- Farquaharson, P. T. (2004). *Geology of the Rancho San Marcos dike swarm, Baja California, México* [Tesis de maestría, San Diego State University]. <https://digitalcollections.sdsu.edu/do/7b16c4cd-9510-4f0f-ab69-0d43e7fe2921>
- Frez, J., González, J. J., Acosta, J. G., Nava, F. A., Méndez, I., Carlos, J. & Alvarez, M. (2000). A detailed microseismicity study and current stress regime in the Peninsular Ranges of northern Baja California, Mexico: The Ojos Negros region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(5), 1133-1142. <https://doi.org/10.1785/0119990164>
- Frost, B. R. & Frost, C. D. (2008). A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology*, 49(11), 1955-1969. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn054>
- Frost, C.D. & Snoke, A. W. (1989). Tobago, West Indies, a fragment of a Mesozoic oceanic island arc: petrochemical evidence. *Journal of the Geological Society*, 146, 953-964. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.146.6.0953>
- García-Abdeslem, J. (2014). On the significance of magnetic anomalies from the Baja California Peninsula: its relationship with IOCG deposits and the deep crustal magnetic layer. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(2), 270-279. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v31n2/v31n2a10.pdf>
- Garrity, C.P. & Soller, D.R. (2009). *Database of the Geologic Map of North America; adapted from the map by J.C. Reed, Jr. and others (2005) (U.S. Geological Survey Data Series No. 424)*. U.S. Department of the Interior. <https://doi.org/10.3133/ds424>
- Gastil, R. G. (1993). Prebatholithic history of peninsular California. In R. G. Gastil & R. H. Miller (Eds.), *The Prebatholithic Stratigraphy of Peninsular California*. Geological Society of America Special Paper 279 (pp. 145–156). <https://doi.org/10.1130/SPE279-p145>
- Gastil, R. G., Diamond, J., Knaack, C., Walawender, M., Marshall, M., Boyles, C., Chadwick, B. & Erskine, B. (1990). The problem of the magnetite/ilmenite boundary in southern and Baja California. In J. L. Anderson (Ed.), *The Nature and Origin of Cordilleran Magmatism*. Geological Society of America Memoir 174 (pp. 19-32). <https://doi.org/10.1130/MEM174-p19>
- Gastil, R. G., Phillips, R. P. & Allison, E. C. (1975). *Reconnaissance Geology of the State of Baja California*. Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/MEM140>
- Herzig, C. T. & Kimbrough, D. L. (2014). Santiago Peak volcanics: Early Cretaceous arc volcanism of the western Peninsular Ranges batholith, southern California. In D. M. Morton & F. K. Miller (Eds.). *Peninsular Ranges Batholith, Baja California and Southern California*. Geological Society of America Memoir 211 (pp. 345–363). [https://doi.org/10.1130/2014.1211\(09\)](https://doi.org/10.1130/2014.1211(09))
- Hildebrand, R.S. & Whalen, J.B. (2014). Arc and slab-failure magmatism in Cordilleran batholiths II—The Cretaceous Peninsular Ranges batholith of southern and Baja California. *Geoscience Canada*, 41(4), 399-458. <https://doi.org/10.12789/geocanj.2014.41.059>
- Hopson, R. F., Willhouse, J. W. & Howard, K. A. (2008). Dike orientations in the Late Jurassic Independence dike swarm and implications for vertical-axis tectonic rotations in eastern California. In J. E. Wrigth & J. W. Shervais (Eds.), *Ophiolites, arcs, and batholiths: A tribute to Cliff Hopson*. Geological Society of America Special Paper 438 (pp. 481-498). [https://doi.org/10.1130/2008.2438\(17\)](https://doi.org/10.1130/2008.2438(17))

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1976a). Carta geológica Ensenada H11B12 (1:50 000). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825647452>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1976b). Carta geológica Francisco Zarco I11D82 (1:50 000). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825648695>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1977a). Carta geológica Real del Castillo Nuevo H11B13 (1:50 000). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825647469>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1977b). Carta geológica San Juan de Dios I11D83 (1:50 000). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825648701>
- Irvine, T. N. & Baragar, W. R.A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5), 523-548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Isles, D. J. & Rankin, L. R. (2013). *Geological interpretation of aeromagnetic data*. Society of Exploration Geophysicist and the Australian Society of Exploration Geophysicists. <https://library.seg.org/doi/book/10.1190/1.9781560803218>
- Janoušek, V., Moyen, J.F., Martin, H., Erban, V. & Farrow C. (2016) Geochemical modelling of igneous processes principles and recipes in R language *Bringing the Power of R to a Geochemical Community*. Springer Geochemistry. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46792-3>
- Jeleńska, M., Łęczyński, L. & Ossowski, T. (2018). *Magnetometry in environmental sciences: studying environmental structure changes and environmental pollution*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-60213-4>
- Kearey, P., Brooks, M. & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration* (3rd ed.). Blackwell Science.
- Kimbrough, D.L., Grove M. & Morton D. M. (2015). Timing and significance of gabbro emplacement within two distinct plutonic domains of the Peninsular Ranges batholith, southern and Baja California. *GSA Bulletin* 127(1-2), 19-37. <https://doi.org/10.1130/B30914.1>
- Kirsch, M., Paterson, S. R., Wobbe, F., Ardila, A. M. M., Clausen, B. L. & Alasino, P. H. (2016). Temporal histories of Cordilleran continental arcs: Testing models for magmatic episodicity. *American Mineralogist*, 101(10), 2133–2154. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5718>
- Kistler, R. W., Wooden, J. L., Premo, W. R. & Morton, D. M. (2014). Pb-Sr-Nd-O isotopic characterization of Mesozoic rocks throughout in the northern end of the Peninsular Ranges batholith: Isotopic evidence for the magmatic evolution of oceanic arc-continental margin accretion during the Late Cretaceous of southern California. In D. M. Morton & F. K. Miller (Eds.), *Peninsular Ranges Batholith, Baja California and Southern California*. Geological Society of America Memoir 211 (pp. 263–316). [https://doi.org/10.1130/2014.1211\(07\)](https://doi.org/10.1130/2014.1211(07))
- Langenheim, V. E., Jachens, R. C. & Aiken, C. (2014). Geophysical framework of the Peninsular Ranges batholith—Implications for tectonic evolution and neotectonics. In D. M. Morton & F. K. Miller (Eds.), *Peninsular Ranges Batholith, Baja California and Southern California*. Geological Society of America Memoir 211 (pp. 1-20). [https://doi.org/10.1130/2014.1211\(01\)](https://doi.org/10.1130/2014.1211(01))

- Ledesma-Aguilar, R. (2018) *Análisis de las secuencias volcánicas del Cretácico Temprano entre las localidades de Ensenada y San Antonio de Las Minas Baja California* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio institucional. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2242>
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen A., Zanettin B. & IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3), 745-750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J., Bonin, B., Bateman, P. & Woolley A. R. (2002). *Igneous rocks: A classification and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge University Press, New York. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581>
- Lothringer, C. J. (1993). Allochthonous Ordovician strata of Rancho San Marcos, Baja California Norte, Mexico. In R. G. Gastil & R. H. Miller (Eds.), *The Prebatholithic Stratigraphy of Peninsular California*. Geological Society of America 279 (pp. 11– 22). <https://doi.org/10.1130/SPE279-p11>
- McDonough, W. F. & Sun, S. -s. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4), 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Middlemost, E. A. (1994). Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4), 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- 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. In Johnson, S. E., Paterson, S. R., Fletcher, J. M. Girty, G. H., Kimbrough, D. L. & Martín-Barajas, A (Eds.), *Tectonic evolution of northwestern Mexico and the Southwestern USA*. Geological Society of America (pp. 297-335). <https://doi.org/10.1130/0-8137-2374-4.297>
- Otha, T. & Arai, H. (2007). Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: a new tool for evaluating the degree of weathering. *Chemical Geology*, 240(3-4), 280-297. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.02.017>
- Patterson, S. R., Vernon, R. H. & Tobisch, O. T. (1989). A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. *Journal of Structural Geology*, 11(3), 349-363. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90074-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90074-6)
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. & Tindle, A. G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4), 956-983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Reeves, C. (2005). *Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation*. Geosoft.
- Reynolds, J. M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons Ltd.
- Rollinson, H. R. (1993). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Routledge.
- Rollinson, H. R. & Pease, V. (2021). *Using Geochemical Data: To Understand Geological Processes* (2da ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108777834>

- Schmidt, K. L., Wetmore, P. H., Alsleben, H., Paterson, S. R., Morton, D.M. & Miller, F.K (2014). Mesozoic tectonic evolution of the southern Peninsular Ranges batholith, Baja California, Mexico: Long-lived history of a collisional segment in the Mesozoic Cordilleran arc. In D. M. Morton & F. K. Miller (Eds.) *Peninsular Ranges Batholith, Baja California and Southern California*. Geological Society of America Memoir 211 (pp. 645-668). [https://doi.org/10.1130/2014.1211\(20\)](https://doi.org/10.1130/2014.1211(20))
- Schmidt, K. L., Wetmore, P. H., Johnson, S. E. & Paterson, S. R. (2002). Controls on orogenesis along an ocean-continent margin transition in the Jura-Cretaceous Peninsular Ranges batholith. In A. Barth (Ed.), *Contributions to crustal evolution of southwestern United States*. Geological Society of America Special Paper 365 (pp. 49-71). <https://doi.org/10.1130/0-8137-2365-5.49>
- Sedlock, R. L. (2003). Geology and tectonics of the Baja California peninsula and adjacent areas. In Johnson, S. E., Paterson, S. R., Fletcher, J. M. Girty, G. H., Kimbrough, D. L. & Martín-Barajas, A (Eds.), *Tectonic evolution of northwestern Mexico and the Southwestern USA*. Geological Society of America Special Paper 242 (pp. 1-42). <https://doi.org/10.1130/0-8137-2374-4.1>
- Servicio Geológico Mexicano. (2002). Carta magnética de campo total de Ensenada H11-B12 (1: 50 000). https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geofisica/12_H11-B12_GF.pdf
- Servicio Geológico Mexicano. (2002). Carta magnética de campo total de Real del castillo H11-B13 (1: 50 000). https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geofisica/18_H11-B13_GF.pdf
- Shaw, S. E, Todd, V. R & Grove M. (2003) Jurassic peraluminous gneissic granites in the axial zone of the Peninsular Ranges, southern California. *Tectonic evolution of northwestern Mexico and the Southwestern USA*. Geological Society of America Special Paper 242 (pp. 157-183) <https://doi.org/10.1130/0-8137-2374-4.157>
- Shervais, J. W. (1982) Ti-V plots and petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59, 101-118. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90120-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90120-0)
- Stern, T. W., Bateman, P. C., Morgan, B. A., Newell, M. F. & Peck, D. L. (1981). Isotopic U-Pb ages of zircon from the granitoids of the Central Sierra Nevada, California. (*U.S. Geological Survey Professional Paper No. 1185*). U.S. Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/pp1185>
- Todd, V. R., Hernandez, J. L., Busch, L. L., Morton, D. M. & Miller, F. K. (2014). The zoned Ramona plutonic complex: An Early Cretaceous mid-to upper-crustal intrusive sequence, Peninsular Ranges batholith, southern California. In D. M. Morton & F. K. Miller (Eds.), *Peninsular Ranges Batholith, Baja California and Southern California*. Geological Society of America Memoir 211 (pp. 583-608). [https://doi.org/10.1130/2014.1211\(17\)](https://doi.org/10.1130/2014.1211(17))
- Twiss, R. J. & Moores, E. M. (1992). *Structural geology*. WH Freeman & Company.
- Twiss, R. J. & Moores, E. M. (2007). *Structural geology* (2nd ed.). WH Freeman & Company.
- Valencia-Moreno, M. & Ortega-Rivera, A. (2011). Capítulo 6: Cretácico Tardío–Eoceno medio en el noroeste de México – evolución del arco magmático continental y su contexto geodinámico (orogenia Laramide). *Boletín del Instituto de Geología*, 118, 201–226. <https://boletin.geologia.unam.mx/index.php/boletin/article/view/32/34>
- Walawender, M. J., Gastil, R. G., Clinkenbeard, J. P., McCormick, W. V., Eastman, B. G., Wernicke, R. S. & Smith, B. M. (1990). Origin and evolution of the zoned La Posta-type plutons, eastern Peninsular

Ranges batholith, southern and Baja California. *Geological Society of America Memoirs*, 174, 1-18. <https://doi.org/10.1130/MEM174-p1>

Wetmore, P. H., Herzig, C., Alsleben, H., Sutherland, M., Schmidt, K. L., Schultz, P. W. & Paterson, S.R. (2003). Mesozoic tectonic evolution of the Peninsular Ranges of southern and Baja California. *Special Papers-Geological Society of America*, 374, 93-116. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2374-4.93>.

Winter, J. D. (2014). *Principles of igneous and metamorphic petrology* (2nd ed.). Pearson Education Limited.

Anexos

A. Listado de muestras

En este apartado se presenta el contenido adicional que se utilizó en este trabajo, el cual incluye: A) El listado de muestras recolectadas y el método analítico utilizado, B) La síntesis petrográfica para las muestras encajonantes, que constan de rocas metasedimentarias y metaígneas e intrusivas, plutónicas y diques, C) Datos estructurales complementarios, que incluyen las características cinemáticas de las rocas encajonantes y plutónicas, D) Datos de susceptibilidad magnética promedio agrupados por plutón o por cuerpo asociado, E) Datos geoquímicos complementarios, los cuales incluyen concentraciones de elementos mayores y traza para el análisis químico y cálculo de la norma CIPW.

Tabla 9. Listado de muestras recolectadas, en donde se muestra su relación en campo, el cuerpo plutónico al que está asociado y el método analítico que fue utilizado.

Localidad	Coordenadas		Muestra	Relación en campo	Plutón o cuerpo asociado*	Clasificación de la roca	Método analítico		
	Long.	Lat.					P.	G.	D.
Ojos Negros	568669	3528827	1-IX-23	Encajonante-metaígneas	CP	Derrame andesítico	X		
Ojos Negros	566656	3534768	2-IX-23	Encajonante-metaígneas	CP	Metalava de And+ Hbl + Cl + Cli + Tre + Clin	X	X	
Ojos Negros	566107	3534850	3-IX-23	Encajonante-metaígneas	CP	Metalava de And+ Hbl + Cl + Cli + Tre + Clin	X		
Ojos Negros	566107	3534850	4-IX-23	Encajonante-metaígneas	CP	Metalava de And+ Hbl + Cl + Cli + Tre + Clin	X		X
Ojos Negros	572641	3534632	5-IX-23	Encajonante-metaígneas	CP	Metabasita	X	X	
Ojos Negros	567658	3534785	1-II-24	Encajonante-metaígneas	CP	Metalava de Anf + Cpx	X	X	
Ojos Negros	565847	3535166	3-II-24	Encajonante-metaígneas	CP	Metabasita	X	X	
Ojos Negros	567658	3534785	2-II-24	Dique	CP	Granito	X	X	
Ojos Negros	572712	3535887	6-IX-23	Encajonante-metasedimentaria	PEB	Metasamita de Bt+Ms			
Ojos Negros	573117	3536096	5-X-23	Encajonante-metasedimentaria	PEB	Metasamita de Bt	X		
Ojos Negros	575036	3537411	1-XII-23	Encajonante-metasedimentaria	PEB	Metasamita de Grt+Bt+Rt	X		

Ojos Negros	575084	3537545	2-XII-23	Encajonante-metasedimentaria	PEB	Metapelita-samita de Bt+Ms+Ep+Grt+St	X	X
Ojos Negros	575536	3539148	5-XII-23	Encajonante-metasedimentaria	PEB	Metapelita-samita de Bt+Ep	X	
Ojos Negros	575533	3539305	6-XII-23	Encajonante-metasedimentaria	PEB	Metasamita de Bt	X	
Ojos Negros	574847	3542210	7-XII-23	Encajonante-metasedimentaria	PEB	Metasamita de Bt+Ms	X	
Ojos Negros	574626	3534747	3-X-23	Encajonante-metaígneas	PEB	Colgante máfico	X	
Ojos Negros	573485	3536833	6-X-23	Sill andesítico-basáltico	PEB	Sill basáltico	X	X
Ojos Negros	574626	3534747	1-X-23	Plutónica	PEB	Granito de dos micas	X	
Ojos Negros	574626	3534747	2-X-23	Plutónica	PEB	Granito de dos micas	X	X
Ojos Negros	572899	3535921	4-X-23	Plutónica	PEB	Granito de dos micas	X	
Ojos Negros	573485	3536833	7-X-23	Plutónica	PEB	Granodiorita de dos micas	X	
Ojos Negros	564905	3537378	11-X-23	Plutónica	PEB	Granodiorita de dos micas	X	
Ojos Negros	575460	3538024	3-XII-23	Plutónica	PEB	Granito de dos micas	X	X
Ojos Negros	575473	3538024	4-XII-23	Plutónica	PEB	Granito de dos micas	X	X
Ojos Negros	573984	3537347	8-X-23	Dique	PEB	Basalto de And-Lab	X	X
Ojos Negros	573984	3537347	9-X-23	Dique	PEB	Andesita	X	X
Ojos Negros	574258	3537496	10-X-23	Dique	PEB	Granodiorita de dos micas	X	X
Ojos Negros	566617	3539994	10-III-24	Plutónica	PT	Tonalita de dos micas	X	
Ojos Negros	569459	3539776	9-III-24	Dique	PT	Dacita	X	X
Ojos Negros	567080	3539650	11-III-24	Dique	PT	Dacita	X	
Ojos Negros	583996	3527969	2-III-24	Plutónica	PLH	Granodiorita de biotita	X	
Ojos Negros	585324	3527683	4-III-24	Plutónica	PLH	Granodiorita de biotita	X	X
Ojos Negros	585369	3529060	5-III-24	Plutónica	PLH	Granodiorita de hornblenda	X	

Ojos Negros	584820	3530153	6-III-24	Plutónica	PLH	Tonalita de hornblenda y biotita	X	
Ojos Negros	578021	3531624	7-III-24	Plutónica	PLH	Granito de dos micas	X	X
Ojos Negros	583087	3531234	8-III-24	Plutónica	PLH	Cuarzodiorita de hornblenda	X	
Ojos Negros	577393	3526498	1-III-24	Dique	PLH	Granodiorita de biotita	X	X
Ojos Negros	583996	3527969	3-III-24	Dique	PLH	Granodiorita de biotita	X	
Ojos Negros	564830	3530462	5-II-24	Plutónica	PLC	Granito de biotita	X	
Ojos Negros	564744	3530335	6-II-24	Plutónica	PLC	Diorita de hornblenda	X	X
Ojos Negros	564478	3529109	8-II-24	Dique	PLC	Diorita de hornblenda	X	
Ojos Negros	564834	3531216	9-II-24	Plutónica	PLC	Cuarzodiorita de hornblenda	X	
Ojos Negros	564834	3531216	11-II-24	Plutónica	PLC	Diorita de hornblenda	X	
Ojos Negros	564478	3529109	7-II-24	Dique	PLC	Diorita	X	
Ojos Negros	564834	3531216	10-II-24	Dique	PLC	Tonalita de biotita	X	X
Ojos Negros	563898	3533245	12-II-24	Dique	PLC	Diorita	X	X
Ojos Negros	564712	3530205	12-III-24	Dique	PLC	Diorita de hornblenda	X	
Ojos Negros	564830	3531258	13-III-24	Dique	PLC	Andesita	X	
Ojos Negros	569047	3523382	15-III-24	Plutónica	PEA	Granodiorita de biotita	X	X
Ojos Negros	568856	3523160	14-III-24	Dique	PEA	Cuarzodiorita de hornblenda	X	X

Abreviaturas: **CP:** cerro Portezuelo, **D:** Difracción de rayos X, **PEB:** Plutón El Barbón, **PLH:** Plutón La Huerta, **PLC:** Plutón Los Cascabeles, **PEA:** Plutón El Alamar.

B. Datos petrográficos

En el siguiente apartado se presentan tablas complementarias que se utilizaron en el análisis petrográfico, principalmente para las muestras sin tendencia modal como las muestras metamórficas, en donde además de sus características petrográficas se describe su paragénesis, facies metamórficas y su posible protolito, también se describen rocas intrusivas (tanto rocas plutónicas como diques) que por su textura no fue posible contabilizar su moda. Las muestras plutónicas que tienen contenido modal, se documentan únicamente las más representativas por cuerpo plutónico, ya que algunas tienden a repetir características petrográficas (por ejemplo, textura, mineralogía y tamaño de grano).

Rocas metasedimentarias

Tabla 10. Características petrográficas de la muestra metasedimentaria 6-IX-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

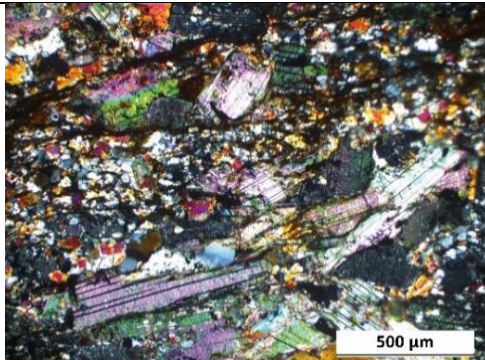
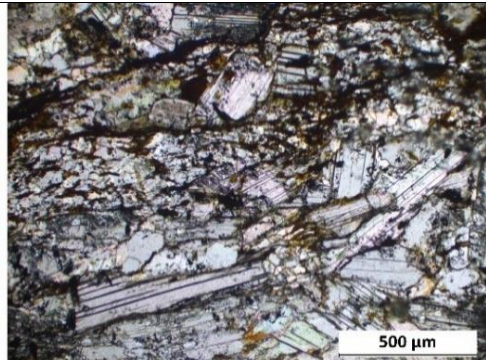
Muestra: 6-IX-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 5			
Coordenadas			
Longitud 572712	Latitud 3535887		
Características petrográficas: Textura granoblástica, con un tamaño de grano medio, compuesta por bandas micáceas de muscovita y biotita paralela a los planos de foliación, las plagioclasas aparecen como fragmentos angulosos y se presenta sobrecrecimiento de Kfs. Paragénesis: Qz+Bt+Ms+Pl+Kfs Facies metamórficas: Esquistos verdes inferior (zona de biotita) >300°C Protolito: Arcosa			
Nombre de la roca: Metasamita de Bt+Ms			

Tabla 11. Características petrográficas de la muestra 5-X-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

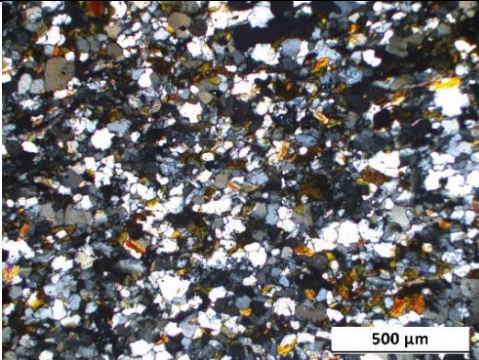
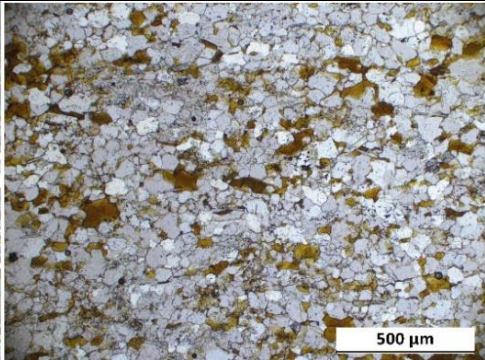
Muestra: 5-X-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 8			
Coordenadas			
Longitud 573117	Latitud 3536096		
Características petrográficas: Foliación débil S_1 marcada por biotitas, con una textura granoblástica.			
Paragénesis: Qz+Bt			
Facies metamórficas: Esquistos verdes inferior (zona de biotita) >300°C			
Protolito: Cuarzoarenita- subarcosa			
Nombre de la roca: Metasamita de Bt			

Tabla 12. Características petrográficas de la muestra 1-XII-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

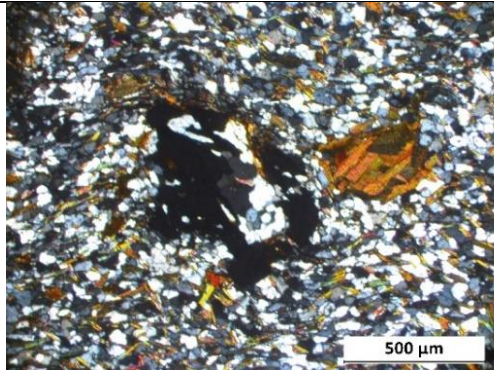
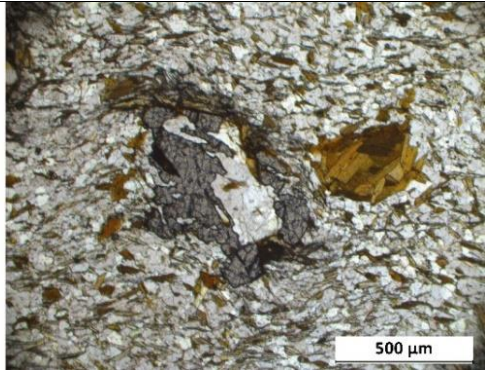
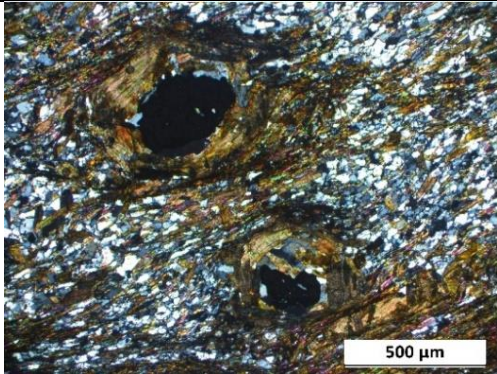
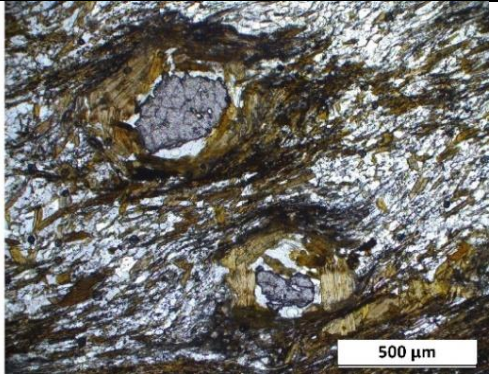
Muestra: 1-XII-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 16			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
575036	3537411		
Características petrográficas: Textura granoblástica compuesta por biotitas que definen los planos de foliación S_1, en algunos sectores aparecen cúmulos de biotitas formadas a partir de concentraciones de arcilla, se observa cristales de rutilo en forma de agujas y en menor cantidad óxidos de hierro y más del 15% de matriz Paragénesis: Qz+Bt+Ms Facies metamórficas: Esquistos verdes inferior (zona de biotita) $>300^{\circ}\text{C}$ Protolito: Grauvaca cuarzosa			
Nombre de la roca: Metasamita de Bt			

Tabla 13. Características petrográficas de la muestra 2-XII-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

Muestra: 2-XII-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 17			
Coordenadas			
Longitud 575084	Latitud 3537545		

Características petrográficas: Textura porfidoblástica, los blastos son de estaurolita que se encuentran rodeados por cristales de muscovita y granates que muestran deformación sin-cinemática, estos se encuentran rodeados por biotitas intercaladas con pequeños cristales de epidota que definen los planos de foliación. Los tamaños de grano en la matriz son de medio a fino.

Paragénesis: Qz+Bt+Ep+Ms+Grt+St

Facies metamórficas: Facies de anfibolita inferior (zona de estaurolita) >550°C

Protolito: Mezcla de arena y arcilla

Nombre de la roca: Metapelita-samita de Bt+Ms+Ep+Grt+St
--

Tabla 14. Características petrográficas de la muestra 5-XII-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

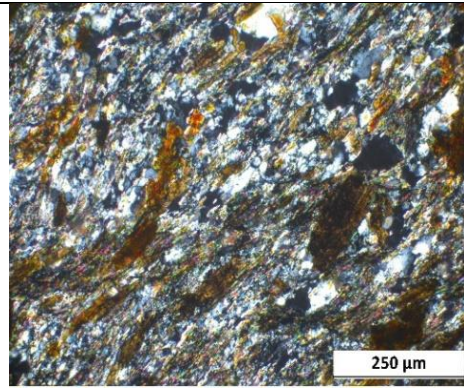
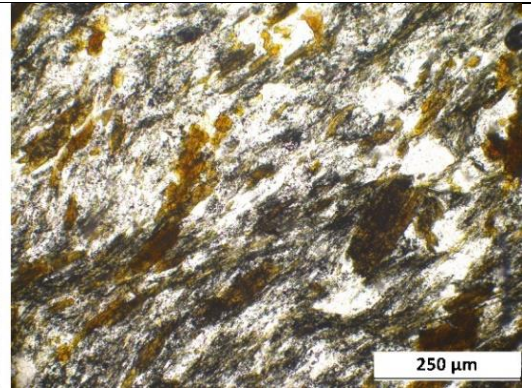
Muestra: 5-XII-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 23			
Coordenadas			
Longitud 575536	Latitud 3539148		
Características petrográficas: La muestra se encuentra cizallada, los cristales de biotitas están intercalados con pequeños cristales de epidota, los cuales se alojan en los planos de cizalla y contiene algunas vetillas de Qz y escasos óxidos de hierro. Por último, la matriz tiene un tamaño de grano medio a fino. Paragénesis: Qz+Bt+Ep Facies metamórficas: Esquistos verdes superior (zona de granate) >450 °C Protolito: Mezcla de arena-arcilla			
Nombre de la roca: Metapelita-samita de Bt+Ep			

Tabla 15. Características petrográficas de la muestra 6-XII-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

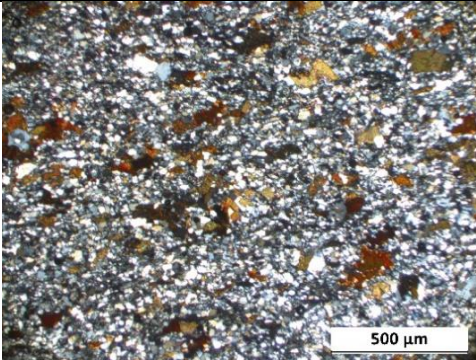
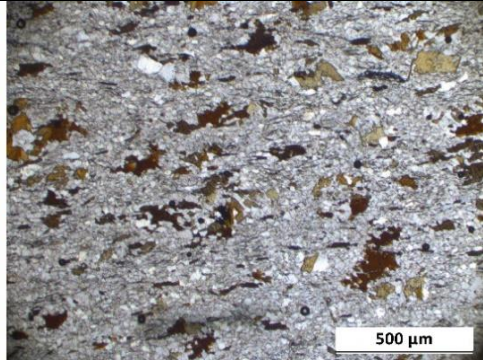
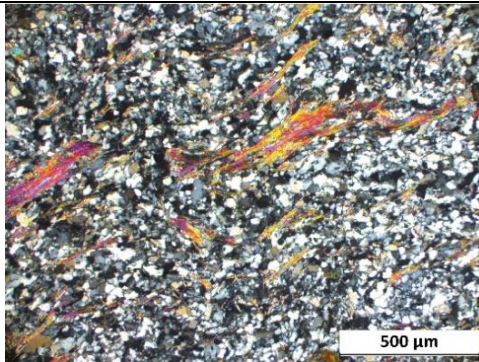
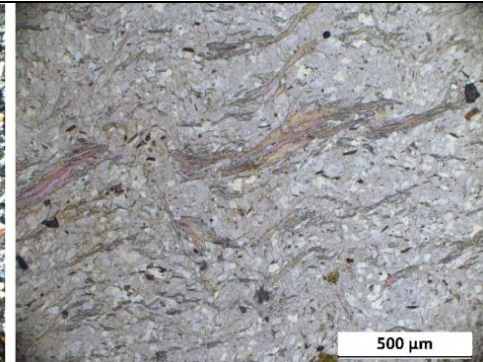
Muestra: 6-XII-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 24			
Coordenadas			
Longitud 575533	Latitud 353930		
Características petrográficas: Textura granoblástica compuesta por biotitas y pequeños cristales de epidota que definen los planos de foliación S_1. Su tamaño de grano es fino en toda la sección. Paragénesis: Qz+Bt Facies metamórficas: Esquistos verdes superior (zona de granate) >450°C Protolito: Arenisca de grano fino			
Nombre de la roca: Metasamita de Bt			

Tabla 16. Características petrográficas de la muestra 7-XII-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

Muestra: 7-XII-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 28			
Coordenadas			
Longitud 574847	Latitud 3542210		
Características petrográficas: La sección de grano fino desarrolla clivaje de crenulación S2, a partir de una foliación preexistente S1, el cual encuentra definido por cristales de muscovita y escasos cristales de biotita Paragénesis: Qz+Ms+Bt Facies metamórficas: Esquistos verdes inferior (zona de biotita) >300°C Protolito: Arenisca de grano fino			
Nombre de la roca: Metasamita de Bt+Ms			

Rocas metaígneas

Tabla 17. Características petrográficas de la muestra 1-IX-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

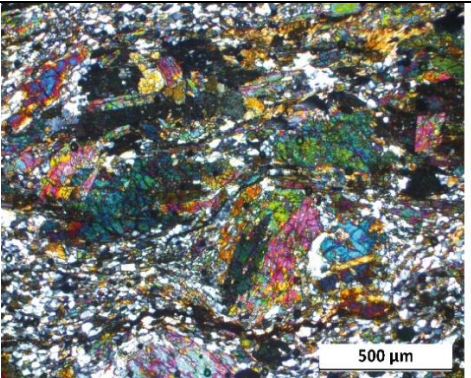
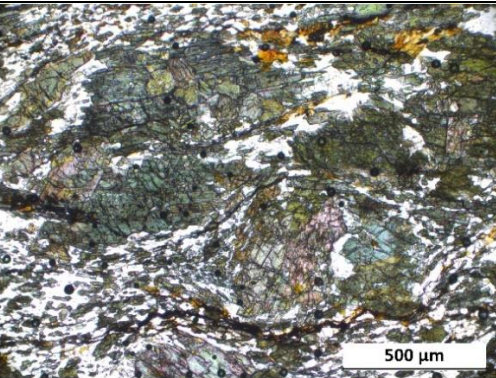
Muestra: 1-IX-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:1			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
568669	3528827		
Características petrográficas: Textura protomilonítica con foliación bien desarrollada en cristales finos de cuarzo, plagioclasa y epidota con porfiroclastos de clinopiroxenos y hornblenda Paragénesis: Qz+Pl+Ep+Cpx+Hbl Facies metamórficas: Esquistos verde >300°C Protolito: Andesita			
Nombre de la roca: Metandesita			

Tabla 18. Características petrográficas de la muestra 2-IX-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

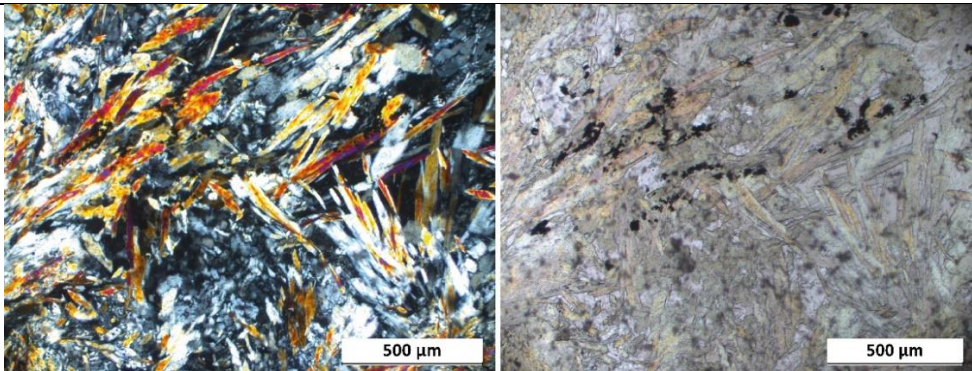
Muestra: 2-IX-23		
Localidad: Ojos Negros		
Sitio: 2		
Coordenadas		
Longitud	Latitud	
566656	3534768	
Características petrográficas: La sección delgada se encuentra mayormente deformada. En la porción menos deformada se identifican relictos de andesina (<5%) y hornblendas en una matriz vítrea recrystalizada. Los minerales metamórficos dominantes son el clinocloro, tremolita y clinozoisita. Paragénesis: Clc+Tr+Czo Facies metamórficas: Esquistos verde >300°C Protolito: Basalto		
Nombre de la roca: Metalava		

Tabla 19. Características petrográficas de la muestra 5-IX-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

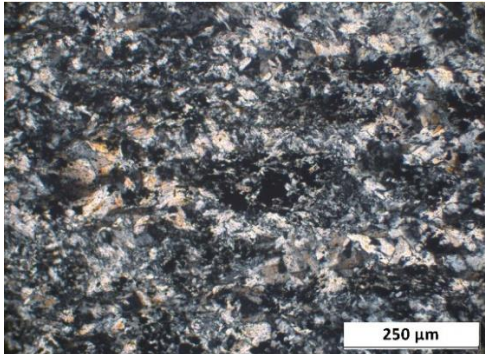
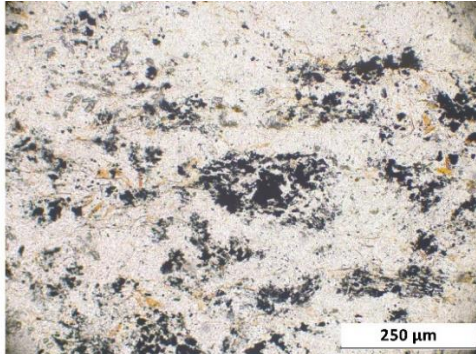
Muestra: 5-IX-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 4			
Coordenadas			
Longitud 572641	Latitud 3534632		
Características petrográficas: Se identifican clinopiroxenos y pseudomorfos de este mineral y magnetita en una porción de más del 5% en algunas porciones de la lámina delgada Paragénesis: Cpx+Mag Facies metamórficas: Esquistos verde >300°C Protolito: Basalto picrítico			
Nombre de la roca: Matabasita			

Tabla 20. Características petrográficas de la muestra 1-II-24, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

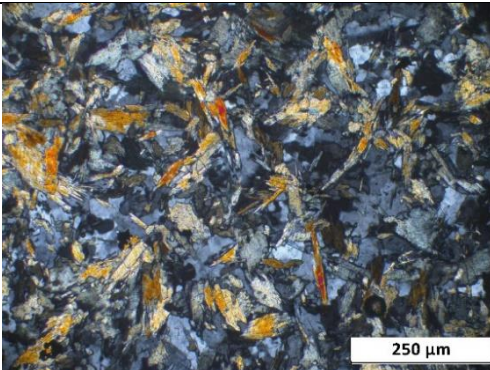
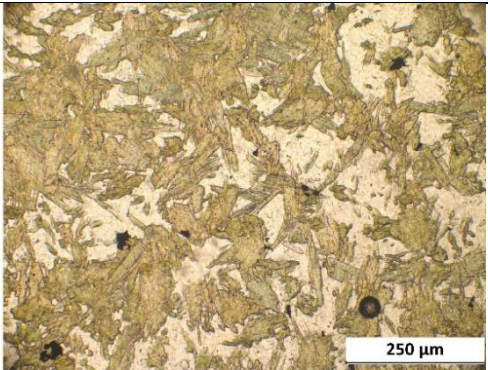
Muestra: 1-II-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 30			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
567658	3534785		
Características petrográficas: La sección se encuentra intensamente cizallada, pero conserva una textura intergranular porfídica. Los minerales que la conforman tienen texturas euédrales y subédrales de anfíboles y clinopiroxenos con plagioclasa anhedral intersticial, el clinopiroxeno está uralitizado Paragénesis: Anf+Cpx+Pl Facies metamórficas: Esquistos verde >300°C Protolito: Basalto			
Nombre de la roca: Metalava			

Tabla 21. Características petrográficas de la muestra 3-II-24, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

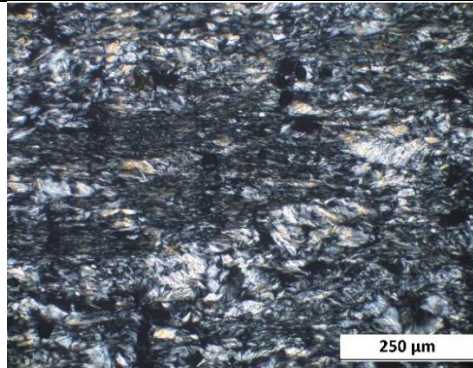
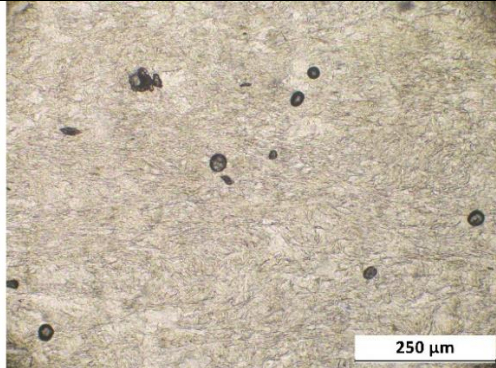
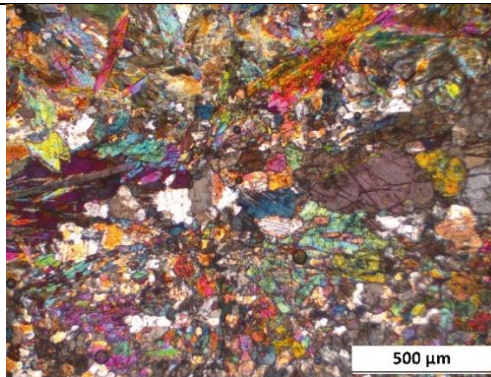
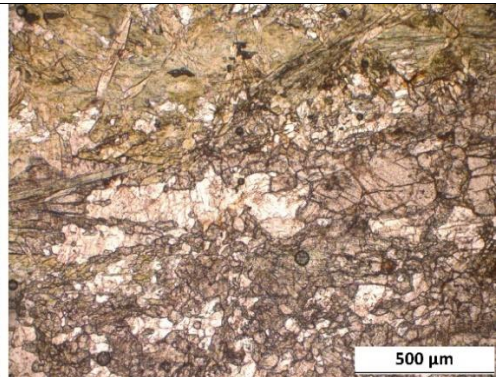
Muestra: 3-II-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:			
Coordenadas			
Longitud 565847	Latitud 3535166		
Características petrográficas: Los cristales de clorita están orientados en dirección a la foliación y se identifican minerales de clorita, talco y epidota milonitizados Paragénesis: Chl+Tlc+Ep Facies metamórficas: Esquistos verde >300°C Protolito: Basalto picrítico			
Nombre de la roca: Metabasita			

Tabla 22. Características petrográficas de la muestra 6-X-23, se muestra su paragénesis, facies metamórfica y posible protolito.

Muestra: 6-X-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 9			
Coordenadas			
Longitud 573485	Latitud 3536833		
Características petrográficas: Textura seudoestratificada definida por granos gruesos y finos de clinopiroxeno, ortopiroxeno, hornblenda con plagioclasa anhedral intersticial. Los minerales metamórficos dominantes son la epidota y la clorita Paragénesis: Cpx> Opx ≥ Hbl Facies metamórficas: Esquistos verde >300°C Protolito: Basalto			
Nombre de la roca: Sill andesítico- basáltico			

Rocas intrusivas

Plutónicas El Barbón

Tabla 23. Características petrográficas de la muestra 1-X-23.

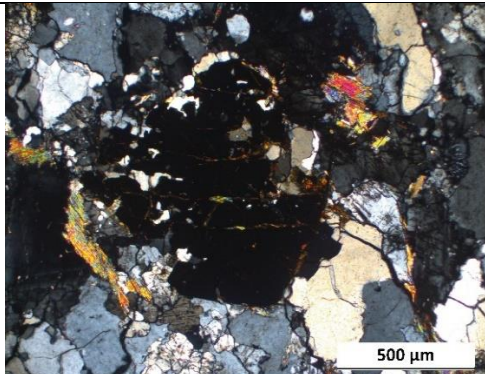
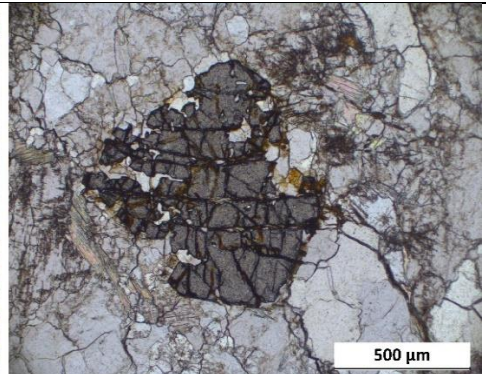
Muestra: 1-X-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 6			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
574626	3534747		
Características petrográficas: Holocristalina hipidiomórfica de grano medio, la mineralogía está compuesta por plagioclasas de composición oligoclasa- andesina, pertitas, cuarzo, biotita y muscovita y escasos cristales de granate, es frecuente que los feldespatos potásicos presenten argilitización seriada			
PI: Oligoclasa-Andesina Acc: Zrn, QAP: 38.5, 38.8,22.7			
Nombre de la roca: Granito de dos micas			

Tabla 24. Características petrográficas de la muestra 2-X-23.

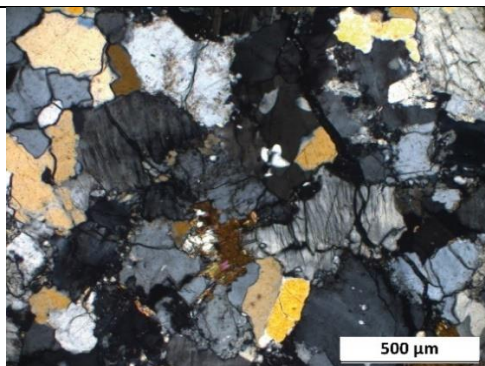
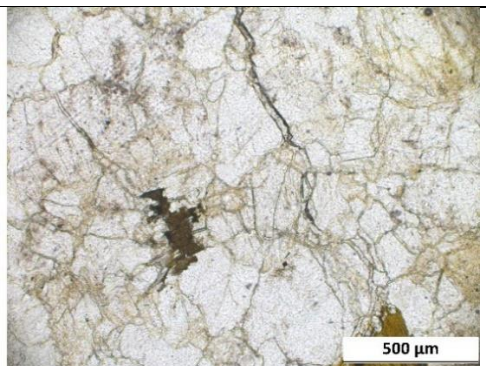
Muestra: 2-X-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 6			
Coordenadas			
Longitud 574626	Latitud 3534747		
Características petrográficas: Holocristalina hipidiomórfica de grano medio, su mineralogía está compuesta por plagioclasas subhedrales de composición oligoclasa- andesina, abundantes pertitas, cuarzo, biotita y muscovita PI: Oligoclasa-Andesina Acc: Zrn, QAP:45.4, 35.8, 18.8			
Nombre de la roca: Granito de dos micas			

Tabla 25. Características petrográficas de la muestra 7-X-23.

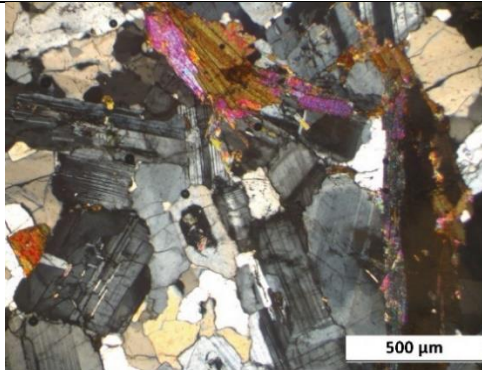
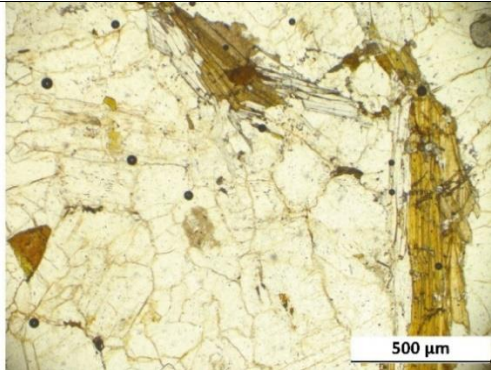
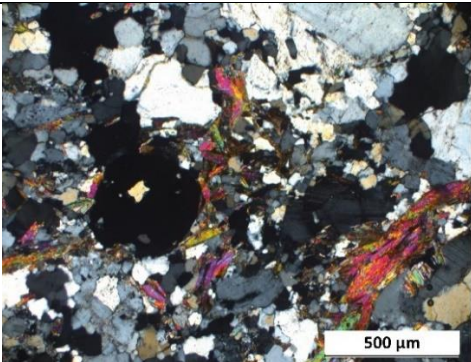
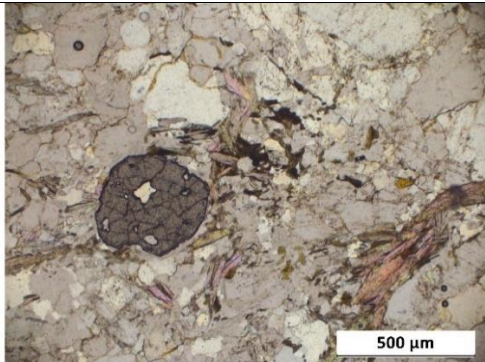
Muestra: 7-X-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 9			
Coordenadas			
Longitud 5734858	Latitud 3536833		
Características petrográficas: Holocristalina hipidiomórfica granular de grano medio, se presentan las dos micas biotitas y muscovitas, las plagioclasas se muestran subhedrales de composición Olg-And, texturas mirmequíticas en los feldespatos potásicos y argilitización selectiva. PI: Oligoclasa-Andesina Acc: Zrn, QAP:30.8, 16.8, 52.4			
Nombre de la roca: Granodiorita de dos micas			

Tabla 26. Características petrográficas de la muestra 3-XII-23.

Muestra: 3-XII-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 19			
Coordenadas			
Longitud 575460	Latitud 3538024		
Características petrográficas: Holocristalina hipidiomórfica granular de grano medio con dos micas (biotita y muscovita), las plagioclasas son subhedrales y tienen composición de oligoclasa- andesina, se observa escasos cristales de granate			
PI: Oligoclasa-Andesina, Acc: Zrn, QAP: 36.3, 25.6, 38.1			
Nombre de la roca: Granito de dos micas			

Diques del plutón El Barbón

Tabla 27. Características petrográficas de la muestra 8-X-23.

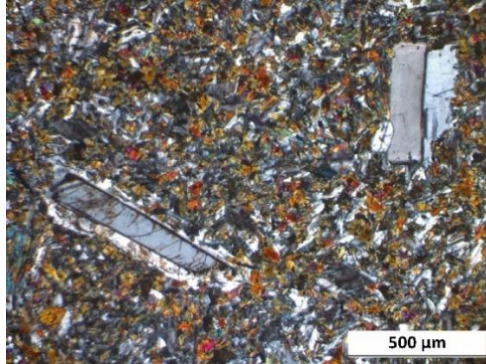
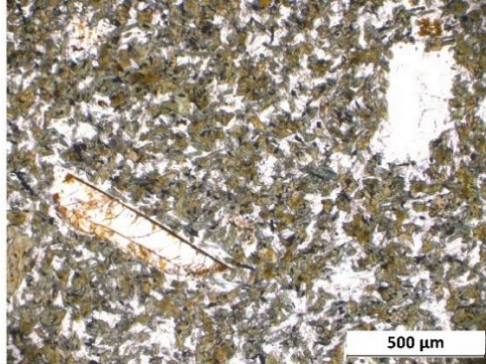
Muestra: 8-X-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 10			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
573984	3537347		
Características petrográficas: Textura porfídica, los fenocristales son de plagioclasa con un hábito de euhedral a subhedral y composición And-Lab en una matriz de clinopiroxeno cloritizado con inclusiones de óxidos de Fe dispersas en toda la sección			
Nombre de la roca: Dique basáltico de And-Lab			

Tabla 28. Características petrográficas de la muestra 9-X-23.

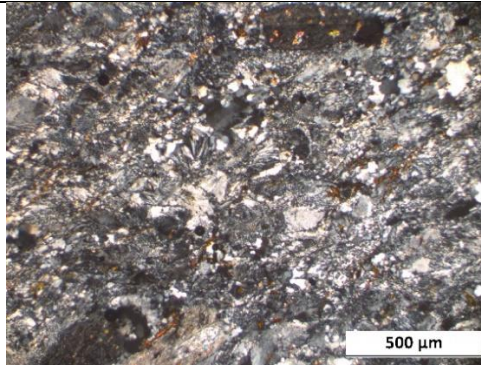
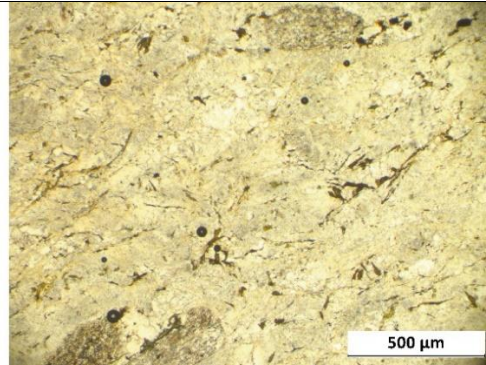
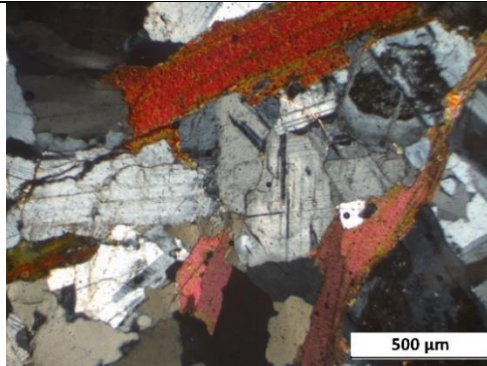
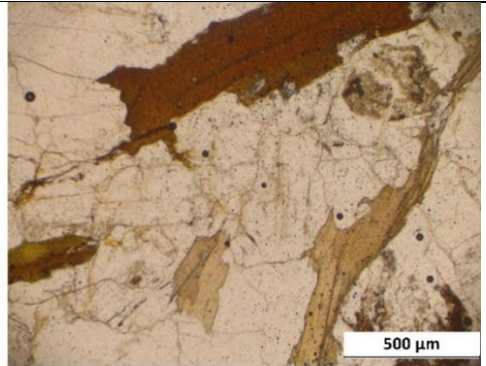
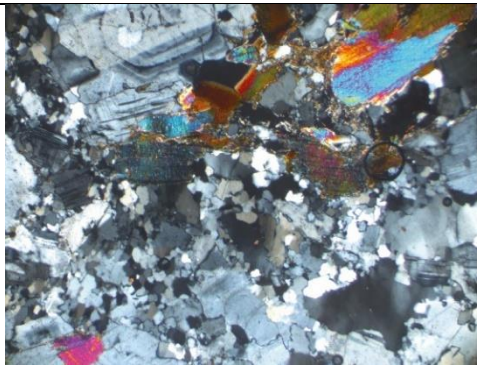
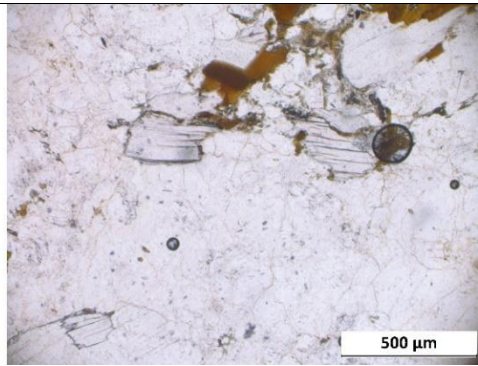
Muestra: 9-X-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 11			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
573984	3537347		
Características petrográficas: Porfídica con fenocristales de plagioclasa de composición andesina, la muestra se encuentra foliada y cizallada tanto en afloramiento como en lámina delgada, es frecuente observar textura esqueletal.			
Nombre de la roca: Dique andesítico			

Tabla 29. Características petrográficas de la muestra 10-X-23.

Muestra: 10-X-23			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 12			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
574258	3537496		
Características petrográficas: Holocristalina hipidiomórfica granular de grano medio, su mineralogía está conformada por cuarzos, feldespatos potásicos y son visibles las dos micas: biotita y muscovita, las plagioclasas subhedrales son de composición oligoclasa-andesina y es común observar argilitización selectiva en los feldespatos potásicos PI: Oligoclasa-Andesina Acc: Zrn, QAP: 33.4, 7.9, 58.7			
Nombre de la roca: Dique granodiorítico de dos micas			

Plutónica Timoteo

Tabla 30. Características petrográficas de la muestra 10-III-24.

Muestra 10-III-24	 
Localidad: Ojos Negros	
Sitio: 52	
Coordenadas	
Longitud Latitud 566617 3539994	
Características petrográficas: Holocristalina hipidiomórfica de grano medio a fino, la mineralogía está compuesta por plagioclasas con hábito subhedral oligoclasa-andesina y frecuente que presenten zonación, cristales de biotita y muscovita y abundante cuarzo recrystalizado. PI: Oligoclasa-Andesina QAP: 35.7, 0, 64.26	
Nombre de la roca: Tonalita de dos micas	

Diques del plutón Timoteo

Tabla 31. Características petrográficas de la muestra 9-III-24.

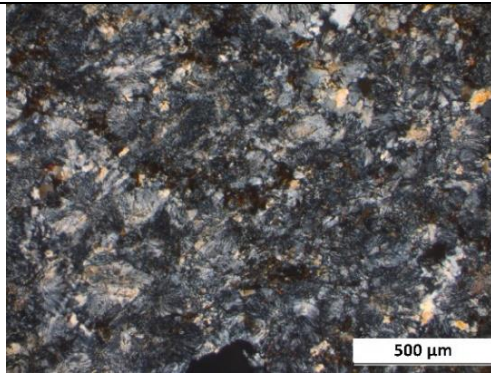
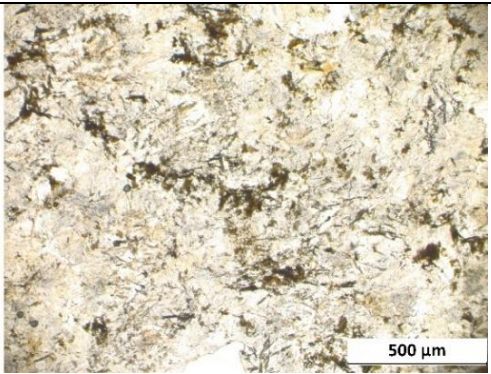
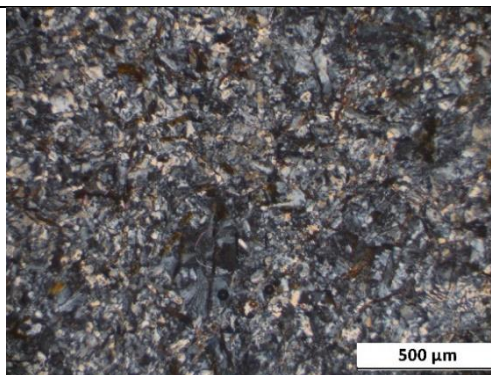
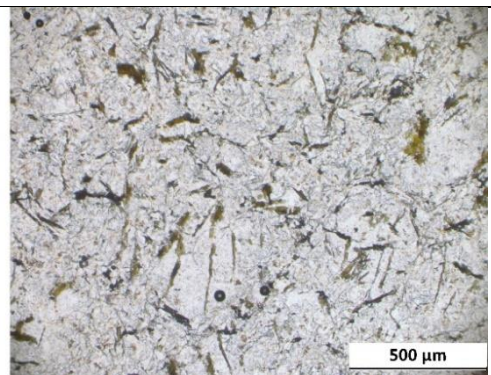
Muestra 9-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 51			
Coordenadas			
Longitud 569459	Latitud 3539776		
Características petrográficas: La muestra se clasifica como dacita por su contenido de oligoclasa en una matriz rica en clinozoisita y tremolita y óxidos de Fe dispersos y cristales de biotita			
Pl: Oligoclasa			
Nombre de la roca: Dique dacítico			

Tabla 32. Características petrográficas de la muestra 11-III-24.

Muestra 11-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 53			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
567080	3539650		
Características petrográficas: Textura porfídica, es posible distinguir algunas texturas, como esqueletales, gráficas de plumas, es poco frecuente observar cristales de epidota y clinozoisita, los cristales de biotita definen la foliación			
Nombre de la roca: Dique dacítico			

Plutónicas La Huerta

Tabla 33. Características petrográficas de la muestra 2-III-24.

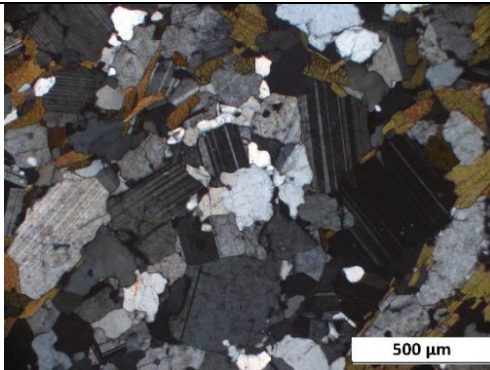
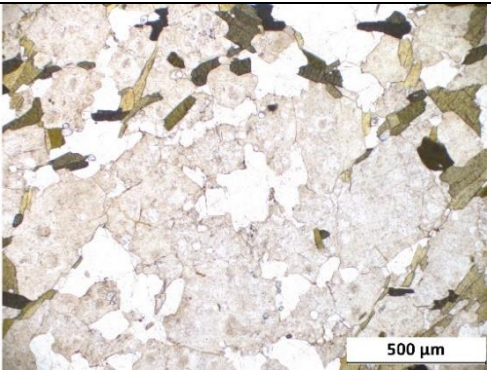
Muestra 2-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 45			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
583996	3527969		
Características petrográficas: Hipidiomórfica de grano grueso a medio, son abundantes los cristales de biotita, las plagioclasas son subhedrales y frecuentemente presentan maclas polisintéticas, se observan óxidos de Fe con hábitos de euhedrales a subhedrales PI: Andesina, QAP:35.4, 7.5, 57.1			
Nombre de la roca: Granodiorita de biotita			

Tabla 34. Características petrográficas de la muestra 5-III-24.

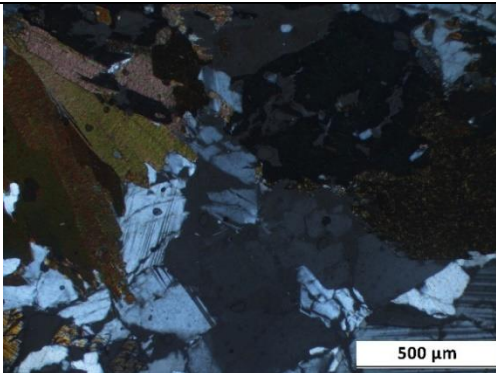
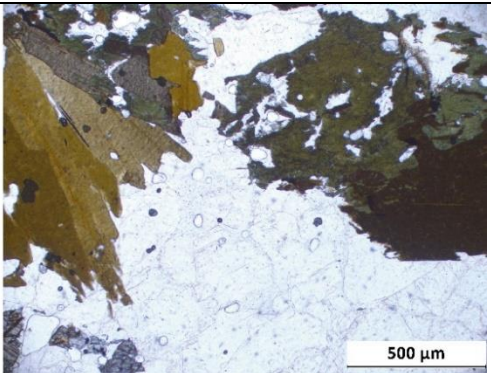
Muestra 5-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 47			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
585369	3529060		
Características petrográficas: Holocristalina, hipidiomórfica de grano grueso, son frecuentes pertitas, las plagioclasas tienen maclas polisintéticas y zonación, las hornblendas son subhedrales y óxidos de Fe dispersos en la sección PI: Oligoclasa-Andesina, QAP: 26.8, 7.4, 65.8			
Nombre de la roca: Granodiorita de hornblenda			

Tabla 35. Características petrográficas de la muestra 6-III-24.

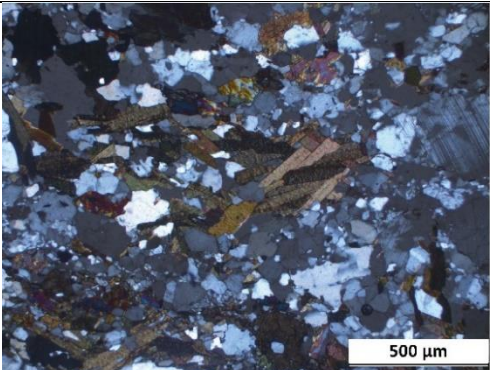
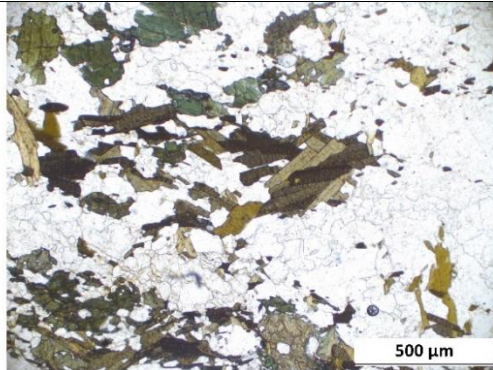
Muestra 6-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 48			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
584820	3530153		
Características petrográficas: Holocristalina hipidomórfica con grano medio a fino, destacan las texturas mirmeqíticas y pertíticas, se observa abundante recrystalización de cuarzo			
PI: Oligoclase-Andesina, QAP:42.5, 5.7, 51.8			
Nombre de la roca: Tonalita de hornblenda y biotita			

Tabla 36. Características petrográficas de la muestra 7-III-24.

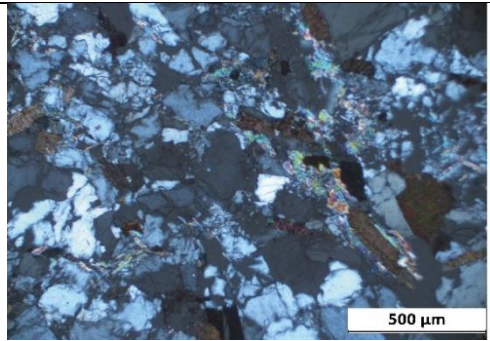
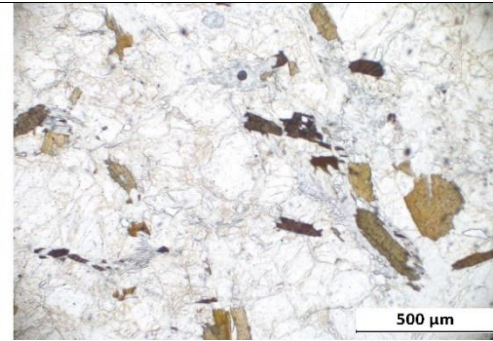
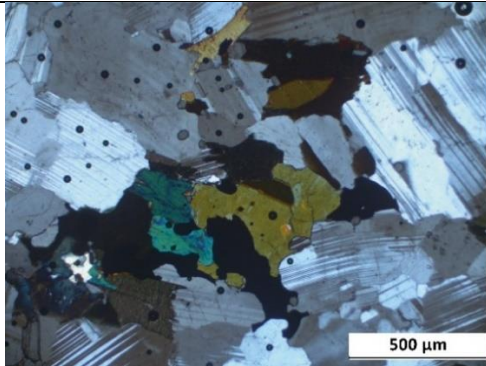
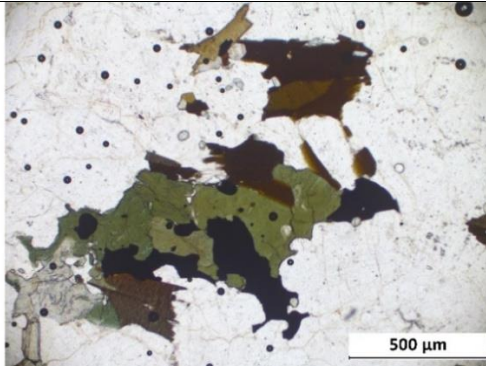
Muestra 7-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 49			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
578021	3531624		
Características petrográficas: Holocristalina hipidiomórfica de grano medio, con texturas gráficas, la muestra se encuentra fracturada, se observan las dos micas			
PI: Oligoclase-Andesina, QAP: 46.3, 36.2, 17.5			
Nombre de la roca: Granito de dos micas			

Tabla 37. Características petrográficas de la muestra 8-III-24.

Muestra 8-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio: 50			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
583087	3531234		
Características petrográficas: Holocrystalina de grano grueso con hábitos principalmente subhedrales, las plagioclasas presentan maclas polisintéticas y se observan óxidos de Fe con hábitos anhedrales PI: Oligoclase-Andesina, QAP: 16.31, 0, 83.6			
Nombre de la roca: Cuarzodiorita de hornblenda			

Diques del plutón La Huerta

Tabla 38. Características petrográficas de la muestra 1-III-24.

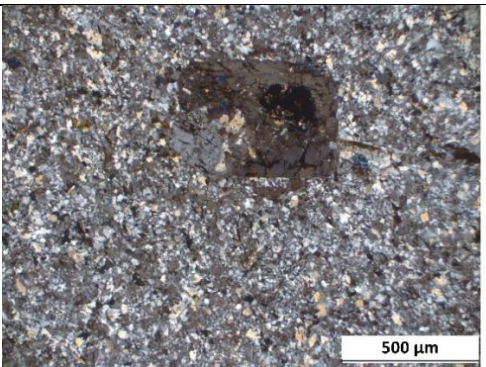
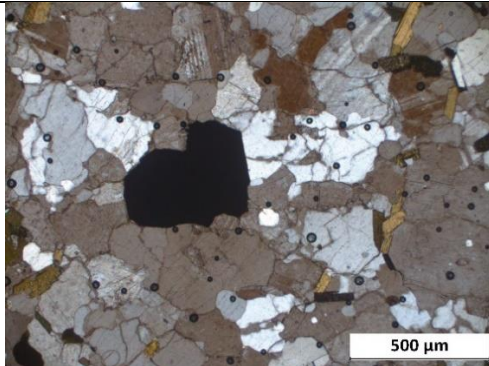
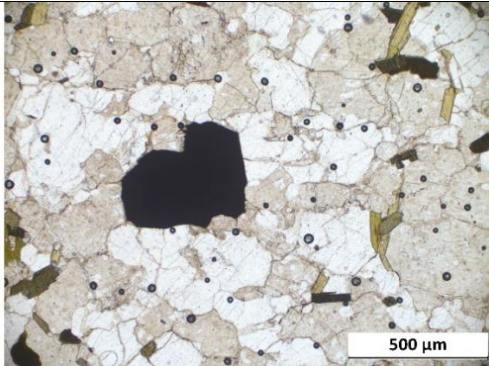
Muestra 1-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
577393	3526498		
Características petrográficas: Porfídica con fenocristales de plagioclasa y cuarzo, algunos fenocristales muestran textura mirmequítica. Los cristales de biotita son subhedrales y alargados, en una matriz de grano fino de Pl y Bt			
Nombre de la roca: Dique granodiorítico de biotita			

Tabla 39. Características petrográficas de la muestra 3-III-24.

Muestra 3-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:			
Coordenadas			
Longitud 583996	Latitud 3527969		
Características petrográficas: Holocristalina, hipidiomórfica de grano medio a grande, se observan cristales de plagioclasa, que a menudo exhiben maclas polisintéticas con inclusiones de óxidos de Fe			
PI: Oligoclasa-Andesina, QAP: 35.8, 11.7, 52.5			
Nombre de la roca: Dique granodiorítico de biotita			

Plutónicas Los Cascabeles

Tabla 40. Características petrográficas de la muestra 5-II-24.

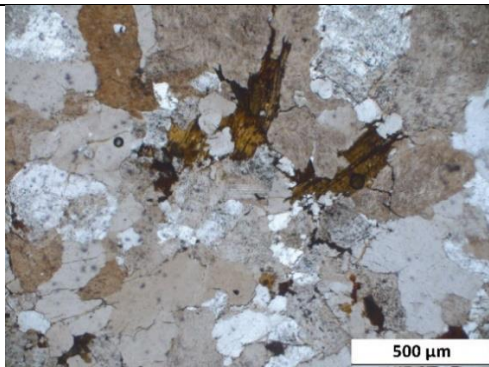
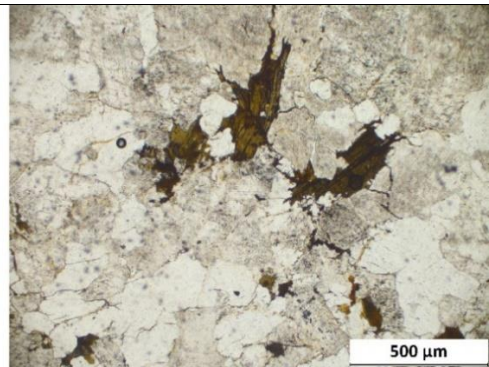
Muestra 5-II-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:			
Coordenadas			
Longitud 564830	Latitud 3530462		
Características petrográficas: Holocristalina de subhedral a anhedral de grano medio, destacan las texturas pertíticas en los feldespatos potásicos, biotitas con hábito anhedral y plagioclasas con hábitos subhedrales, frecuentemente muestran maclas polisintéticas			
PI: Oligoclasa-Andesina, QAP:38.2, 43.6, 18.2			
Nombre de la roca: Granito de biotita			

Tabla 41. Características petrográficas de la muestra 6-II-24.

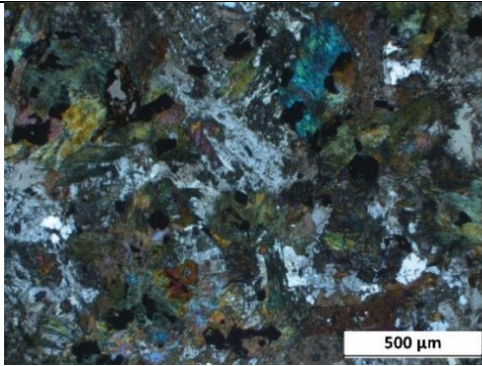
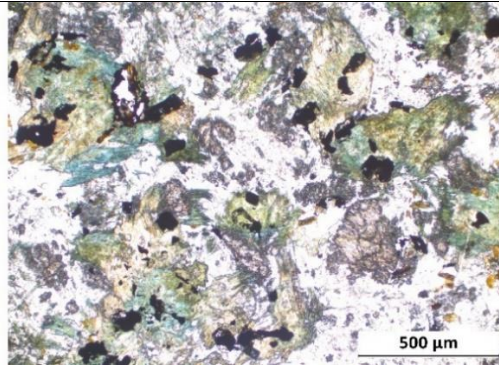
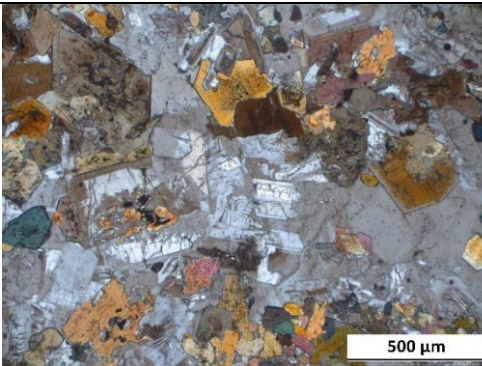
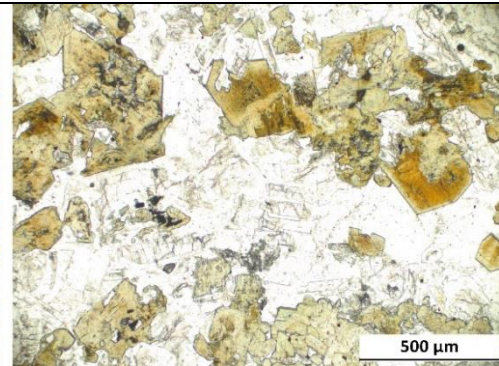
Muestra 6-II-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:			
Coordenadas			
Longitud 564744	Latitud 3530335		
Características petrográficas: Holocristalina, anhedral, de grano medio, se observa hornblendas tremolitizadas con hábito fibrosos y algunos clinopiroxenos epidotizados			
PI: Andesina, QAP:0,0,100			
Nombre de la roca: Diorita de hornblenda			

Tabla 42. Características petrográficas de la muestra 9-II-24.

Muestra 9-II-24		 
Localidad: Ojos Negros		
Sitio:		
Coordenadas		
Longitud 564834	Latitud 3531216	
Características petrográficas: Holocristalina, hipidiomórfica de grano medio, con textura secuencial seriada en las Hornblendas, se observa cuarzo intersticial, las plagioclasas tienen hábitos subhedrales, frecuentemente con maclas polisintéticas y óxidos de Fe diseminados en los cristales de hornblendas PI: Andesina, QAP:14.9,0,85.1		
Nombre de la roca: Cuarzodiorita de hornblenda		

Diques del plutón Los Cascabeles

Tabla 43. Características petrográficas de la muestra 7-II-24.

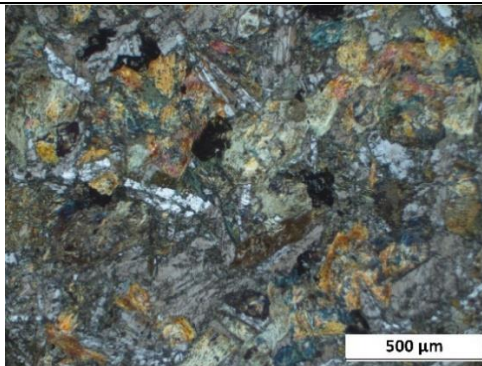
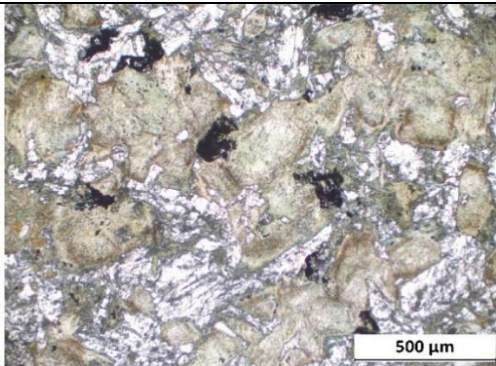
Muestra 7-II-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
564478	3529109		
Características petrográficas: Holocrystalina, anhedral de grano medio a fino, las plagioclasas tienen maclas polisintéticas y zonación, algunas se encuentran saussuritizadas, son comunes las Hbl y Cpx tremolitizados, los óxidos de Fe son secundarios, tienen hábito anhedral y su contenido aproximadamente es del 2% en la sección			
Nombre de la roca: Dique diorítico			

Tabla 44. Características petrográficas de la muestra 10-II-24.

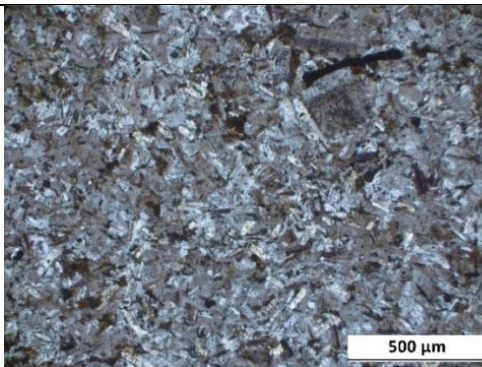
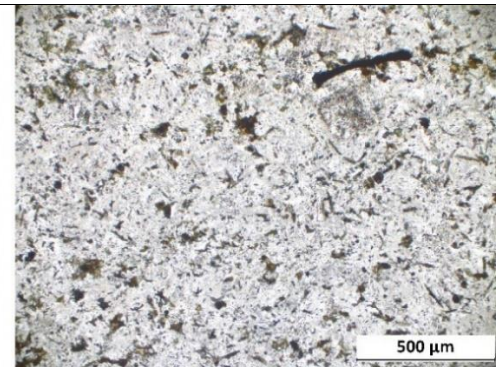
Muestra 10-II-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
564834	3531216		
Características petrográficas: Porfídica, la sección muestra plagioclasas que se extiende a la matriz de aspecto vítreo recristalizado, es abundante la biotita parcialmente alterada a epidota Pl: Oligoclasa -Andesina			
Nombre de la roca: Dique tonalítico			

Tabla 45. Características petrográficas de la muestra 12-II-24.

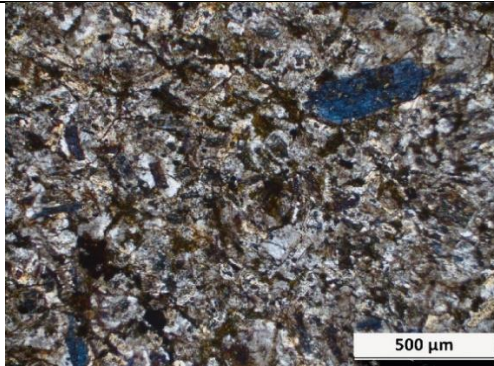
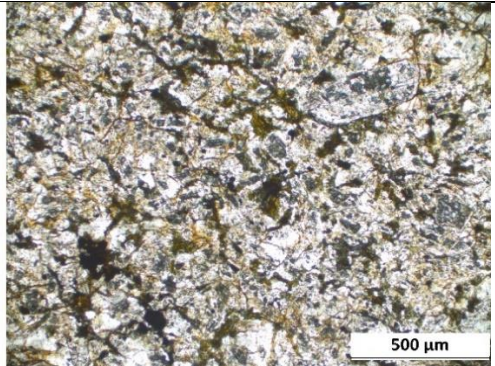
Muestra 12-II-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
563898	3533245	500 μm	500 μm
Características petrográficas: Porfídica, muestra saussuritización intensa (clinozoisita epidota) de plagioclasas en matriz y en fenocristales, es común observar epidota en vetillas y clorita en bordes de plagioclasas, se exhiben trazas de biotitas y minerales máficos epidotizados (Hbl)			
PI: Andesina			
Nombre de la roca: Dique diorítico			

Tabla 46. Características petrográficas de la muestra 12-III-24.

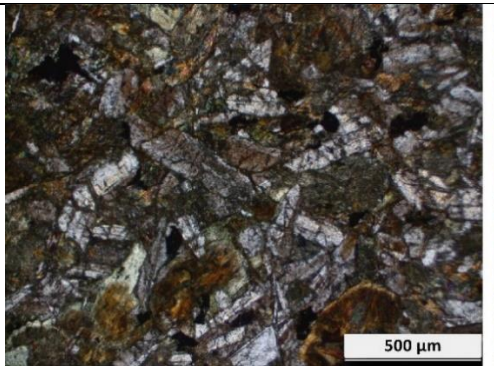
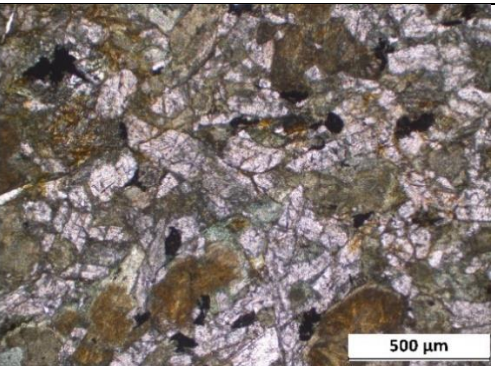
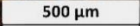
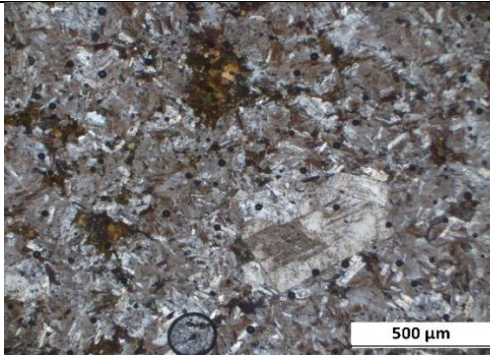
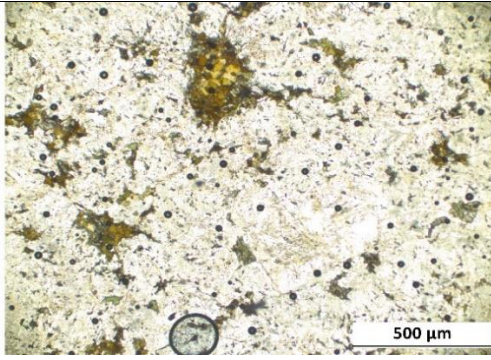
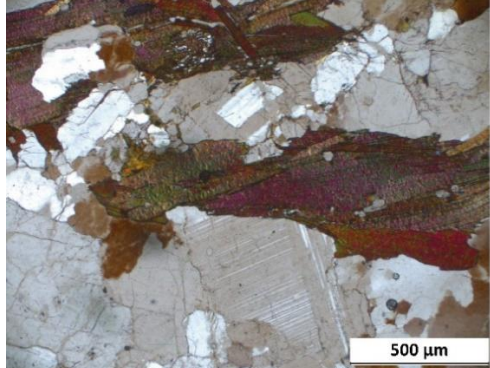
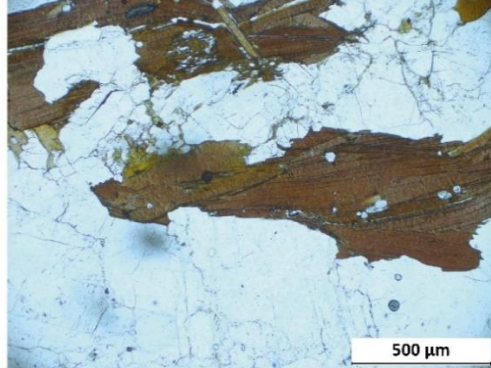
Muestra 12-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
564712	3530205		
Características petrográficas: Hipidiomórfica, los minerales muestran hábitos subhedrales, se observan anfíboles tremolitizados, las plagioclasas presentan maclas polisintéticas y son comunes los óxidos de Fe.			
PI: Andesina			
Nombre de la roca: Dique diorítico de hornblenda			

Tabla 47. Características petrográficas de la muestra 13-III-24.

Muestra 13-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
3530205	3531258		
Características petrográficas: Porfídica, tanto los fenocristales como la matriz están compuestos por Pl. Los fenocristales de Ol-And presentan maclas polisintéticas, son comunes cristales de hornblenda, epidota y clinozoisita y cuarzo secundario			
PI: Andesina			
Nombre de la roca: Dique andesítico			

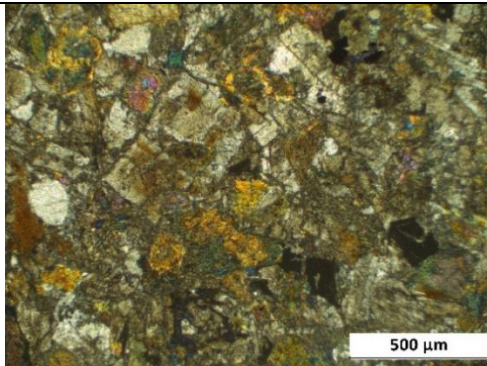
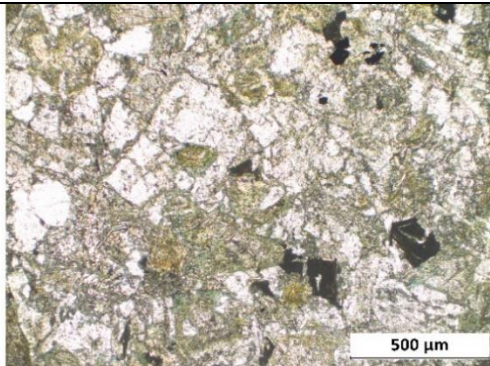
Plutónica El Alamar

Tabla 48. Características petrográficas de la muestra 15-III-24.

Muestra 15-III-24	 	
Localidad: Ojos Negros		
Sitio:		
Coordenadas		
Longitud Latitud 569047 3523382		
Características petrográficas: Holocrystalina, hipidiomórfica de grano grueso, se observan cristales de microclina, las plagioclasas tienen hábito subhedral y frecuentemente presentan maclas polisintéticas y zonación		
PI: Oligoclase-Andesina, QAP:30.8,16.9,52.3		
Nombre de la roca: Granodiorita de biotita		

Dique del plutón El Alamar

Tabla 49. Características petrográficas de la muestra 14-III-24.

Muestra 14-III-24			
Localidad: Ojos Negros			
Sitio:			
Coordenadas			
Longitud	Latitud		
568856	3523160		
Características petrográficas: Holocristalina, hornblendas tremolitizadas, se observa clinozoisita y epidota, contiene óxidos de Fe con hábitos de euhedrales a subhedrales			
Nombre de la roca: Dique cuarzodiorítico de hornblenda			

C. Datos estructurales

Tabla 50. Características cinemáticas de las rocas metaígneas.

Sitio 1				Sitio 2				Sitio 30				Sitio 31				Sitio 32			
Análisis Bingham				Análisis Bingham				Análisis Bingham				Análisis Bingham				Análisis Bingham			
Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge	Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge	Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge	Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge	Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge
1.	0.4015	296	53.9	1.	0.3774	48.9	77.8	1.	0.2633	77.2	18.8	1.	0.3293	293.1	41.6	1.	0.2786	33	66.6
2.	0.0535	87.2	32.6	2.	0.0619	316.6	0.5	2.	0.0092	214.3	65	2.	0.0453	105.7	48.2	2.	0.0831	233.3	22.1
3.	0.4550	186.3	13.8	3.	0.3155	226.5	12.2	3.	0.2540	341.6	15.8	3.	0.3745	199.8	3.7	3.	0.1955	140	7.3
Solución del plano de falla				Solución del plano de falla				Solución del plano de falla				Solución del plano de falla				Solución del plano de falla			
Strike	Dip	Trend	Plunge	Strike	Dip	Trend	Plunge	Strike	Dip	Trend	Plunge	Strike	Dip	Trend	Plunge	Strike	Dip	Trend	Plunge
312	42	19	24	316	33	47	33	119	65	120	2.1	328	59	16	25	207	42	21	34
70	66	222	48	137	57	226	57	210	88	29	25	74	65	238	31	69	56	117	48
Eje P: 186/ 14		Eje T: 296/54		Eje P: 227/12		Eje T: 49/78		Eje P: 342/16		Eje T: 77/ 19		Eje P: 200/4		Eje T:293/42		Eje P: 140/7		Eje T:33/66	

Tabla 51. Características cinemáticas de la zona El Barbón.

Sitio 5				Sitio 22				Sitio 23				Sitio 26				Sitio 28			
Análisis Bingham				Análisis Bingham				Análisis Bingham				Análisis Bingham				Análisis Bingham			
Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge	Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge	Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge	Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge	Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge
1.	0.4460	221.9	18.1	1.	0.1740	316.3	4.6	1.	0.4221	131	18.8	1.	0.4786	125.4	11.9	1.	0.3823	59.5	11.2
2.	0.0275	126.3	16.7	2.	0.0084	218.2	59.9	2.	0.0079	35.6	15.5	2.	0.0144	218	12.2	2.	0.0710	152	12.2
3.	0.4185	356.1	65	3.	0.1825	48.9	29.6	3.	0.43	268.7	65.3	3.	0.4642	352.4	72.8	3.	0.4533	288.1	73.3
Solución del plano de falla				Solución del plano de falla				Solución del plano de falla				Solución del plano de falla				Solución del plano de falla			
Strike	Dip	Trend	Plunge	Strike	Dip	Trend	Plunge	Strike	Dip	Trend	Plunge	Strike	Dip	Trend	Plunge	Strike	Dip	Trend	Plunge
337	31	28	25	89	66	96	17	245	30	62	25	200	35	44	32	134	35	250	33
118	65	247	59	186	73	2	24	28	66	155	61	46	58	110	55	340	57	44	55
Eje P: 356/65		Eje T: 222/18		Eje P: 49/30		Eje T: 316/5		Eje P: 269/65		Eje T: 131/19		Eje P: 352/73		Eje T: 125/12		Eje P: 288/73		Eje T: 60/11	

Tabla 52. Características cinemáticas de la zona Los Cascabeles.

Sitio 36				Sitio 38			
Análisis Bingham				Análisis Bingham			
Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge	Ejes	Eigenvalue	Trend	Plunge
1.	0.3025	110.6	12.6	1.	0.3279	15.2	8.8
2.	0.0054	6.2	47.9	2.	0.0432	91.2	42.7
3.	0.3080	211.1	39.3	3.	0.2847	255.5	46
Solución del plano de falla				Solución del plano de falla			
Strike	Dip	Trend	Plunge	Strike	Dip	Trend	Plunge
243	53	256	17	67	52	227	24
346	73	153	37	317	66	23	38
Eje P: 211/39		Eje T: 111/13		Eje P: 256/59		Eje T: 357/7	

D. Datos de susceptibilidad magnética

Tabla 53. Datos de susceptibilidad magnética promedio por sitio y plutón correspondiente.

Longitud	Latitud	Sitio	Relación en campo	Cuerpo asociado	Tipo de roca	Susceptibilidad promedio $\times 10^{-3}$
572712	3535887	5	Encajonante	Complejo Bedford Canyon	Metasedimentaria	0.146
575084	3537545	17	Encajonante	Complejo Bedford Canyon	Metasedimentaria	0.294
575473	3538221	19	Encajonante	Complejo Bedford Canyon	Metasedimentaria	0.070
575533	3539305	24	Encajonante	Complejo Bedford Canyon	Metasedimentaria	0.191
574847	3542210	28	Encajonante	Complejo Bedford Canyon	Metasedimentaria	0.071
568669	3528827	1	Encajonante	Santiago Peak	Metaígneas	0.466
566656	3534768	2	Encajonante	Santiago Peak	Metaígneas	0.487
566122	3534897	3	Encajonante	Santiago Peak	Metaígneas	2.748
572641	3534632	4 y 65	Encajonante	Santiago Peak	Metaígneas	43.593
567658	3534785	30	Encajonante	Santiago Peak	Metaígneas	14.272
567071	3534919	31	Encajonante	Santiago Peak	Metaígneas	8.050
566064	3535213	33	Encajonante	Santiago Peak	Metaígneas	11.393
566102	3535022	34	Encajonante	Santiago Peak	Metaígneas	0.540
569459	3539776	51	Dique	Plutón Timoteo	Dacita	0.110
567080	3539650	53	Dique	Plutón Timoteo	Dacita	0.299
566617	3539994	52	Plutón	Plutón Timoteo	Tonalita de dos micas	0.127
567080	3539650	53	Plutón	Plutón Timoteo	Tonalita de dos micas	0.097
574626	3534747	10	Dique	Plutón El Barbón	Andesita	1.516
572899	3535921	12	Dique	Plutón El Barbón	Granodiorita de dos micas	0.211
574626	3534747	6	Plutón	Plutón El Barbón	Granito de dos micas	0.109
572899	3535921	7	Plutón	Plutón El Barbón	Granito de dos micas	0.132
574905	3537378	14	Plutón	Plutón El Barbón	Granodiorita de dos micas	0.173
573698	3537396	20	Plutón	Plutón El Barbón	Granito de dos micas	0.276
574847	3537423	21	Plutón	Plutón El Barbón	Granito de dos micas	0.188
577393	3526498	44	Dique	Plutón La Huerta	Granodiorita de Bt	0.109
583996	3527969	45	Dique	Plutón La Huerta	Granodiorita de Bt	10.505
583996	3527969	45	Plutón	Plutón La Huerta	Granodiorita de Bt	16.850
585324	3527683	46	Plutón	Plutón La Huerta	Granodiorita de dos micas	12.856
585369	3529060	47	Plutón	Plutón La Huerta	Granodiorita	18.109
584820	3530153	48	Plutón	Plutón La Huerta	Tonalita de Hbl y Bt	0.339
578021	3531624	49	Plutón	Plutón La Huerta	Granito de dos micas	0.110
583087	3531231	50	Plutón	Plutón La Huerta	Cuarzodiorita de hbl	41.990
583295	3525788	59	Plutón	Plutón La Huerta	Granodiorita de Bt	0.387
585513	3527688	61	Plutón	Plutón La Huerta	Granodiorita de dos micas	5.278

584845	3530125	62	Plutón	Plutón La Huerta	Tonalita de Hbl y Bt	0.358
582380	3533199	64	Plutón	Plutón La Huerta	Cuarzodiorita	0.207
564478	3529109	37	Dique	Plutón Los Cascabeles	Diorita	1.469
564834	3531216	39	Dique	Plutón Los Cascabeles	Tonalita de Bt	0.194
563898	3533245	41	Dique	Plutón Los Cascabeles	Diorita	0.270
564456	3529126	54	Dique	Plutón Los Cascabeles	Diorita	0.099
564712	3530205	55	Dique	Plutón Los Cascabeles	Diorita de Hbl	0.793
564830	3531258	56	Dique	Plutón Los Cascabeles	Andesita	0.151
564830	3530462	35	Plutón	Plutón Los Cascabeles	Granito de Bt	0.075
564744	3530335	36	Plutón	Plutón Los Cascabeles	Diorita de Hbl	11.161
564703	3530888	38	Plutón	Plutón Los Cascabeles	Diorita	0.110
564834	3531216	39	Plutón	Plutón Los Cascabeles	Cuarzodiorita de Hbl	0.557
564650	3532508	40	Plutón	Plutón Los Cascabeles	Diorita de Hbl	0.687
564703	3530888	41	Plutón	Plutón Los Cascabeles	Diorita	0.673
568856	3523160	57	Dique	Plutón El Alamar	Cuarzodiorita de hbl	1.040
569047	3523382	58	Plutón	Plutón El Alamar	Granodiorita de Bt	0.122

E. Datos geoquímicos y norma CIPW

Tabla 54. Geoquímica en roca total de las rocas metaígneas, plutónicas y diques del Valle de Ojos Negros.

Muestra	2-IX-23	1-II-24	5-IX-23	3-II-24	6-X-23	2-II-24	2-X-23	10-X-23	3-XII-23	4-XII-23	8-X-23
Longitud	566656	567658	572641	565847	573485	567658	574626	574258	575460	575473	573984
Latitud	3534768	3534785	3534632	3535166	3536833	3534785	3534747	3537496	3538024	3538024	3537347
Relación en campo	Encajonante metaígneas	Encajonante metaígneas	Encajonante metaígneas	Encajonante metaígneas	Encajonante - Sill	Dique en roca encajonante	Plutónica	Dique en plutón	Plutónica	Plutónica	Dique en plutón
Plutón o cuerpo asociado	Santiago Peak	Santiago Peak	Santiago Peak	Santiago Peak	El Barbón	Santiago Peak	El Barbón	El Barbón	El Barbón	El Barbón	El Barbón
Tipo de roca	Metalava	Metalava	Metabasitas	Metabasitas	Gabro	Granito	Granito de dos micas	Granodiorita de dos micas	Granito de dos micas	Granito de dos micas	Basalto de And- Lab
<i>Óxidos mayores (% en peso)</i>											
SiO ₂	49.450	53.210	27.600	29.710	49.760	73.650	73.000	67.390	74.520	70.060	49.820
Al ₂ O ₃	9.760	14.640	19.840	21.010	12.640	14.280	13.650	16.130	15.340	16.180	15.760
FeO ^T	9.280	10.610	9.560	8.200	9.760	1.260	1.600	4.370	1.680	3.470	11.350
MnO	0.154	0.158	0.081	0.118	0.204	0.052	0.084	0.101	0.066	0.080	0.188
MgO	14.690	7.520	29.860	28.860	9.750	0.090	0.130	1.150	0.280	0.790	6.070
CaO	12.520	7.860	0.960	0.320	16.590	0.730	0.970	4.200	1.960	3.780	9.830
Na ₂ O	0.420	4.210	< 0.010	0.010	0.390	3.950	3.030	3.040	3.630	3.570	3.410
K ₂ O	0.030	0.110	< 0.010	< 0.010	0.110	3.540	4.050	1.600	1.790	1.450	0.160
TiO ₂	0.297	0.612	0.514	0.490	0.416	0.014	0.044	0.354	0.077	0.308	1.881
P ₂ O ₅	0.030	0.120	0.320	< 0.010	0.240	0.150	0.440	0.180	0.120	0.110	0.230
LOI	1.940	1.150	12.140	12.190	1.040	0.860	1.250	1.180	1.000	0.630	0.830
Total	98.570	100.200	100.900	100.900	100.900	98.570	98.250	99.700	100.500	100.400	99.540
<i>Elementos traza (ppm)</i>											
Sc	37.000	41.000	55.000	45.000	33.000	1.000	4.000	7.000	3.000	4.000	41.000
Be	< 1.000	< 1.000	< 1.000	< 1.000	1.000	2.000	2.000	1.000	2.000	2.000	1.000
V	192.000	312.000	201.000	232.000	197.000	< 5.000	5.000	49.000	17.000	32.000	315.000
Cr	1790.000	310.000	2380.000	690.000	750.000	730.000	710.000	760.000	460.000	600.000	280.000
Co	68.000	37.000	72.000	45.000	40.000	1.000	1.000	5.000	1.000	4.000	39.000
Ni	600.000	70.000	590.000	370.000	140.000	20.000	< 20.000	< 20.000	< 20.000	< 20.000	40.000
Cu	< 10.000	140.000	20.000	< 10.000	< 10.000	20.000	< 10.000	10.000	< 10.000	< 10.000	40.000
Zn	60.000	80.000	190.000	50.000	140.000	< 30.000	30.000	90.000	40.000	90.000	90.000
Ga	9.000	12.000	9.000	12.000	15.000	14.000	17.000	18.000	19.000	18.000	19.000
Ge	1.400	0.900	0.800	1.000	3.100	2.000	2.400	1.200	1.500	1.300	1.500
As	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000
Rb	< 1.000	1.000	< 1.000	< 1.000	2.000	91.000	116.000	53.000	49.000	49.000	1.000
Sr	81.000	142.000	11.000	< 2.000	435.000	72.000	86.000	486.000	314.000	500.000	280.000
Y	8.000	17.200	7.600	16.400	18.900	7.800	19.900	8.400	9.300	9.300	38.400
Zr	16.000	40.000	8.000	12.000	28.000	20.000	45.000	106.000	38.000	95.000	155.000
Nb	0.700	2.600	< 0.200	< 0.200	4.000	7.300	6.600	9.000	13.700	10.900	3.300
Mo	2.000	2.000	< 2.000	< 2.000	2.000	16.000	16.000	17.000	12.000	14.000	3.000

Ag	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500
In	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	0.100
Sn	< 1.000	< 1.000	15.000	< 1.000	1.000	2.000	6.000	1.000	6.000	2.000	1.000
Sb	< 0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200	0.800	< 0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200
Cs	< 0.100	0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	1.300	7.100	3.000	1.600	2.400	0.100
Ba	8.000	41.000	54.000	< 2.000	76.000	337.000	530.000	648.000	1270.000	680.000	116.000
La	1.780	6.530	0.210	0.210	5.350	3.820	10.400	23.200	12.600	15.300	7.800
Ce	3.690	13.600	0.670	1.500	12.300	7.410	21.600	43.100	23.800	28.500	22.600
Pr	0.500	1.900	0.160	0.360	1.880	0.990	2.570	4.950	2.920	3.490	3.600
Nd	2.630	8.860	1.180	2.580	8.780	3.810	9.390	18.200	11.300	13.700	19.200
Sm	0.790	2.430	0.780	1.220	2.300	1.250	2.770	2.930	2.590	2.570	5.410
Eu	0.241	0.689	0.092	0.762	0.757	0.166	0.260	0.921	0.567	0.891	1.880
Gd	0.940	2.710	1.280	1.970	2.610	1.570	2.950	2.050	2.140	1.880	5.970
Tb	0.180	0.420	0.220	0.360	0.450	0.290	0.520	0.290	0.320	0.300	1.010
Dy	1.170	2.700	1.420	2.430	2.810	1.390	3.080	1.500	1.630	1.490	6.490
Ho	0.270	0.590	0.300	0.540	0.560	0.190	0.590	0.270	0.260	0.270	1.290
Er	0.890	1.710	0.870	1.670	1.620	0.480	1.720	0.800	0.760	0.720	3.820
Tm	0.129	0.245	0.119	0.247	0.238	0.070	0.273	0.116	0.100	0.103	0.555
Yb	0.890	1.750	0.710	1.730	1.630	0.440	1.820	0.810	0.640	0.660	3.720
Lu	0.149	0.294	0.109	0.289	0.268	0.063	0.269	0.133	0.096	0.098	0.588
Hf	0.500	1.200	0.300	0.400	0.800	1.100	1.700	2.900	1.700	2.700	3.700
Ta	0.040	0.150	< 0.01	0.050	0.070	1.460	1.450	0.540	1.110	0.690	0.170
W	< 0.500	5.300	1.000	< 0.500	< 0.500	1.800	1.000	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500
Ti	< 0.050	< 0.050	< 0.050	< 0.050	< 0.050	0.520	0.550	0.380	0.340	0.360	< 0.050
Pb	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	17.000	29.000	12.000	27.000	15.000	< 5.000
Bi	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100
Th	0.240	1.060	< 0.050	< 0.050	0.810	1.000	5.160	6.550	3.300	4.840	1.270
U	0.090	0.370	0.020	0.020	1.080	1.090	2.230	1.740	1.880	1.540	0.470
<i>Cálculo de la norma CIPW</i>											
Q- Cuarzo	6.298	4.367	0.000	0.000	8.102	35.859	38.853	33.384	42.284	34.785	4.241
C- Corindón	0.000	0.000	18.847	20.418	0.000	2.982	3.571	2.191	4.154	2.128	0.000
Or- Ortoclasa	0.177	0.650	0.030	0.030	0.650	20.920	23.934	9.456	10.578	8.569	0.946
Ab- Albita	3.554	35.624	0.042	0.085	3.300	33.424	25.639	25.724	30.716	30.208	28.854
An- Anortita	24.657	20.724	2.672	1.555	32.414	2.642	1.938	19.661	8.940	18.035	27.223
Di- Diópsido	28.668	12.435	0.000	0.000	37.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	11.074
Hy- Hipersteno	23.305	12.969	13.836	24.894	7.085	0.224	0.324	2.865	0.698	1.968	9.987
Ol- Olivino	0.000	0.000	42.431	32.936	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mt- Magnetita	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.129	0.147	0.000	0.000	0.000	0.000
Il- Ilmenita	0.329	0.338	0.173	0.252	0.436	0.027	0.084	0.216	0.141	0.171	0.402
Hm- Hematita	9.281	10.611	9.561	8.201	9.761	1.171	1.499	4.370	1.680	3.470	11.351
Tn- Titanita	0.303	1.066	0.000	0.000	0.457	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.098
Ru- Rutilo	0.000	0.000	0.423	0.357	0.000	0.000	0.000	0.240	0.003	0.218	0.000
Ap- Apatito	0.071	0.284	0.758	0.012	0.568	0.355	1.042	0.426	0.284	0.261	0.545
Total	96.644	99.067	88.773	88.740	99.884	97.733	97.030	98.534	99.479	99.813	98.722

Tabla 55. Geoquímica en roca total de las rocas plutónicas y diques del Valle de Ojos Negros.

Muestra	9-X-23	9-III-24	4-III-24	7-III-24	1-III-24	6-II-24	10-II-24	12-II-24	15-III-24	14-III-24
Longitud	573984	569459	585324	578021	577393	564744	564834	563898	569047	568856
Latitud	3537347	3539776	3527683	3531624	3526498	3530335	3531216	3533245	3523382	3523160
Localidad	Ojos Negros	Ojos Negros	Ojos Negros	Ojos Negros	Ojos Negros	Ojos Negros	Ojos Negros	Ojos Negros	Ojos Negros	Ojos Negros
Relación en campo	Dique en plutón	Dique en plutón	Plutónica	Plutónica	Dique en plutón	Plutónica	Dique en plutón	Dique en plutón	Plutónica	Dique en plutón
Plutón o cuerpo asociado	El Barbón	Timoteo	La Huerta	La Huerta	La Huerta	Los Cascabeles	Los Cascabeles	Los Cascabeles	El Alamar	El Alamar
Tipo de roca	Riolita	Dacita	Granodiorita de Bt	Granito de dos micas	Granodiorita de Bt	Diorita de Hbl	Tonalita de Bt	Diorita de Hbl	Granodiorita de Bt	Cuarzodiorita de Hbl
<i>Óxidos mayores (% en peso)</i>										
SiO ₂	75.990	75.730	66.230	72.850	76.160	51.080	71.770	68.370	69.150	48.900
Al ₂ O ₃	12.410	12.400	16.160	14.380	13.450	14.790	13.580	14.420	16.600	17.140
FeO ^T	1.300	1.790	4.480	2.350	1.680	14.230	3.370	4.840	3.560	10.550
MnO	0.017	0.030	0.087	0.038	0.041	0.233	0.058	0.109	0.067	0.166
MgO	0.050	0.090	1.520	0.360	0.070	4.080	0.330	0.650	1.090	6.590
CaO	0.450	0.880	4.630	1.390	1.170	8.090	1.820	2.770	4.210	11.520
Na ₂ O	3.730	3.630	3.530	3.130	3.430	3.220	3.760	3.640	3.370	1.860
K ₂ O	4.100	3.400	1.410	4.450	3.510	0.460	3.390	2.440	1.250	0.420
TiO ₂	0.051	0.102	0.409	0.218	0.043	2.659	0.281	0.374	0.321	1.168
P ₂ O ₅	< 0.010	0.020	0.120	0.200	0.040	0.370	0.040	0.070	0.130	0.150
LOI	0.540	0.470	0.590	0.710	0.550	1.300	0.640	1.340	1.010	2.340
Total	98.650	98.540	99.150	100.100	100.100	100.500	99.030	99.010	100.800	100.800
<i>Elementos traza (ppm)</i>										
Sc	3.000	2.000	10.000	4.000	2.000	44.000	8.000	13.000	6.000	42.000
Be	2.000	1.000	1.000	1.000	2.000	< 1.000	2.000	2.000	1.000	< 1.000
V	< 5.000	< 5.000	70.000	11.000	< 5.000	378.000	23.000	25.000	52.000	314.000
Cr	410.000	390.000	460.000	690.000	300.000	200.000	460.000	320.000	600.000	300.000
Co	1.000	1.000	8.000	3.000	< 1.000	23.000	3.000	4.000	4.000	35.000
Ni	< 20.000	< 20.000	< 20.000	< 20.000	< 20.000	< 20.000	< 20.000	< 20.000	< 20.000	30.000
Cu	< 10.000	< 10.000	< 10.000	< 10.000	< 10.000	10.000	< 10.000	< 10.000	< 10.000	40.000
Zn	< 30.000	< 30.000	60.000	50.000	< 30.000	120.000	50.000	70.000	50.000	70.000
Ga	14.000	15.000	17.000	17.000	15.000	21.000	16.000	19.000	18.000	16.000
Ge	1.600	1.500	1.200	1.800	1.600	1.700	1.300	1.700	1.400	1.400
As	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000	< 5.000
Rb	106.000	107.000	41.000	158.000	98.000	12.000	110.000	71.000	43.000	11.000
Sr	31.000	75.000	348.000	143.000	127.000	309.000	142.000	176.000	512.000	289.000
Y	17.100	22.300	14.700	14.700	19.000	32.700	26.300	43.200	8.200	20.900
Zr	75.000	113.000	114.000	100.000	74.000	112.000	169.000	259.000	123.000	68.000
Nb	4.000	4.100	6.100	9.500	4.200	5.000	4.800	5.900	7.800	2.600
Mo	9.000	10.000	10.000	15.000	6.000	6.000	11.000	7.000	14.000	3.000
Ag	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.500
In	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	0.100	< 0.100	0.100	< 0.100	0.100
Sn	2.000	2.000	1.000	7.000	3.000	1.000	2.000	2.000	1.000	< 1.000

Sb	0.400	0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200	0.300	0.300	< 0.200	< 0.200
Cs	1.000	2.600	1.000	6.600	3.300	0.400	1.000	1.000	1.700	0.800
Ba	1310.000	1064.000	562.000	935.000	837.000	161.000	905.000	620.000	584.000	129.000
La	19.100	24.200	35.700	19.500	21.900	10.400	20.200	21.200	15.300	6.370
Ce	38.500	45.500	61.100	39.300	43.500	25.100	39.700	47.400	27.500	15.400
Pr	4.150	4.890	6.220	4.870	4.970	3.690	4.580	6.020	3.560	2.300
Nd	14.400	16.500	21.900	19.400	17.300	17.700	17.300	24.800	13.400	10.900
Sm	3.190	3.440	3.460	4.280	3.590	4.970	3.820	6.130	2.440	3.040
Eu	0.217	0.464	0.972	0.630	0.384	1.960	0.814	1.350	0.819	1.070
Gd	2.920	3.280	2.740	3.540	3.170	5.500	3.920	6.680	1.820	3.260
Tb	0.480	0.560	0.420	0.500	0.510	0.920	0.660	1.140	0.260	0.570
Dy	2.990	3.510	2.400	2.700	3.200	5.600	4.350	7.320	1.440	3.410
Ho	0.600	0.710	0.460	0.500	0.640	1.170	0.880	1.520	0.270	0.710
Er	1.870	2.230	1.390	1.330	1.860	3.290	2.680	4.530	0.760	2.130
Tm	0.306	0.350	0.193	0.198	0.296	0.484	0.417	0.678	0.117	0.307
Yb	2.180	2.480	1.340	1.330	1.970	3.040	2.900	4.570	0.830	2.080
Lu	0.357	0.401	0.214	0.209	0.300	0.467	0.458	0.725	0.134	0.316
Hf	2.400	2.800	3.100	2.900	2.200	2.800	3.900	5.900	2.600	1.700
Ta	0.570	0.510	0.280	1.070	0.590	0.220	0.480	0.460	0.490	0.100
W	0.500	0.800	< 0.500	< 0.500	< 0.500	< 0.5	0.800	0.600	0.700	< 0.5
Ti	0.580	0.660	0.280	0.960	0.540	0.110	0.630	0.440	0.270	0.090
Pb	11.000	11.000	8.000	20.000	16.000	< 5.000	8.000	6.000	8.000	< 5.000
Bi	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100
Th	12.200	11.300	9.390	7.690	9.140	1.800	10.200	6.180	4.120	1.000
U	3.540	2.880	0.650	3.060	3.300	0.580	3.110	1.990	1.010	0.280
<i>Cálculo de la norma CIPW</i>										
Q- Cuarzo	37.586	39.648	28.459	34.670	40.285	11.066	32.654	31.159	34.492	6.493
C- Corindón	1.030	1.196	0.696	2.366	1.976	0.000	0.512	0.922	2.360	0.000
Or- Ortoclasa	24.230	20.093	8.333	26.298	20.743	2.718	20.034	14.420	7.387	2.482
Ab- Albita	31.562	30.716	29.870	26.485	29.024	27.247	31.816	30.801	28.516	15.739
An- Anortita	2.200	4.235	22.186	5.589	5.543	24.543	8.768	13.285	20.037	37.178
Di- Diópsido	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.757	0.000	0.000	0.000	12.125
Hy- Hipersteno	0.125	0.224	3.787	0.897	0.174	8.422	0.822	1.619	2.715	10.796
Ol- Olivino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mt- Magnetita	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Il- Ilmenita	0.036	0.064	0.186	0.081	0.082	0.498	0.124	0.233	0.143	0.355
Hm- Hematita	1.300	1.790	4.480	2.350	1.674	14.231	3.370	4.840	3.560	10.551
Tn- Titanita	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.884	0.000	0.000	0.000	2.409
Ru- Rutilo	0.032	0.068	0.311	0.175	0.000	0.000	0.216	0.251	0.246	0.000
Ap- Apatito	0.012	0.047	0.284	0.474	0.095	0.876	0.095	0.166	0.308	0.355
Total	98.112	98.082	98.592	99.386	99.605	99.243	98.411	97.697	99.764	98.482