

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



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

**Análisis de las secuencias volcánicas del Cretácico Temprano
entre las localidades de Ensenada y San Antonio de Las Minas,
Baja California**

Tesis

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

Presenta:

Rafael Ledesma Aguilar

Ensenada, Baja California, México

2018

Tesis defendida por
Rafael Ledesma Aguilar

y aprobada por el siguiente Comité:

Dr. Luis Alberto Delgado Argote
Director de tesis

Miembros del comité:

Dra. Olga Sarychikhina

M.C. Juan Manuel Espinosa Cardeña

Dr. Horacio Jesús De La Cueva Salcedo



Dr. Jonas De Dios De Basabe Delgado
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Rafael Ledesma Aguilar © 2018

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Rafael Ledesma Aguilar** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología

Análisis de las secuencias volcánicas del Cretácico Temprano entre las localidades de Ensenada y San Antonio de Las Minas, Baja California

Resumen aprobado por:

Dr. Luis Alberto Delgado Argote
Director de tesis

En este trabajo se realizó un análisis geológico de las rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Santiago Peak (Fm. Santiago Peak) entre las localidades de San Antonio de las Minas y la ciudad de Ensenada, B.C. Se identificaron ocho unidades litológicas, de las cuales cinco son predominantemente volcanoclásticas y tres son secuencias lávicas. Según criterios texturales y estructurales, estas unidades definen facies volcánicas distales, proximales y centrales de un modelo de estratovolcán. La Fm. Santiago Peak presenta una mineralogía correspondiente a la facies metamórfica de esquistos verdes de bajo grado. Estas rocas fueron intrusionadas por los plutones San Antonio de Las Minas al NW y Ensenada, localizados al NW y SE de la zona de estudio. El plutón Ensenada generó metamorfismo de contacto a las rocas de la Fm. Santiago Peak. La estratificación de la Fm. Santiago Peak define un monoclinial que buza hacia el SW y tiene un rumbo general NW-SE. Las tres tendencias de lineamientos rectilíneos coinciden con las fallas observadas en el campo (100°-125°, 20°-40° y 50°-70°). Con estos datos se pudo identificar tres eventos de deformación frágil. El primero es compresivo y el segundo extensional, que afectaron a las rocas de la secuencia de asociación volcánica.; el tercer evento se interpreta que es transpresivo y afecta a todas las unidades de la zona de estudio. Con la susceptibilidad magnética de las ocho unidades litológicas y los datos de aeromagnetometría del mapa magnético de Norteamérica (NAMAG) se pudieron discriminar las rocas de la Fm. Santiago Peak de las rocas graníticas de CBP. Además, se pudieron correlacionar estructuras regionales con las tendencias de fallas.

Palabras clave: Fm. Santiago Peak, facies volcánicas, aeromagnetometría.

Abstract of the thesis presented by **Rafael Ledesma Aguilar** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Geology

Analysis of Early Cretaceous volcanic sequences between the towns of Ensenada and San Antonio de Las Minas, Baja California.

Abstract approved by:

Dr. Luis Alberto Delgado Argote
Thesis director

In this work, a geological analysis of the volcanic and volcanic rocks of the Santiago Peak Formation (Fm. Santiago Peak) between the towns of San Antonio de las Minas and the city of Ensenada, B.C. Eight lithological units were identified, of which five are predominantly volcanoclastic and three are lava sequences. According to the textural and structural criteria, these units define typical distal, proximal and central facies of a stratovolcano model. The Fm. Santiago Peak presents a mineralogy corresponding to the metamorphic facies of low-grade green schists. These rocks were intruded by the San Antonio de Las Minas plutons to the NW and Ensenada, located NW and SE of the study area. The Ensenada pluton generates a metamorphism of contact with the rocks of the Fm. Santiago Peak. The stratification of the Fm. Santiago Peak defines a monoclinical that dips towards the SW and has a NW-SE general course. The three tendencies of rectilinear lineaments coincide with the faults observed in the field (100° - 125° , 20° - 40° and 50° - 70°). With these data, three fragile deformation events could be identified. The first is compressive and the second extensional, which affects the rocks of the sequence of volcanic joints; The third event is interpreted as being transpressive and affects all the units in the study area. With the magnetic susceptibility of the eight lithological units and the aeromagnetometry data of the magnetic map of North America (NAMAG) the rocks of the Fm can be discriminated. Santiago Peak of the granite rocks of CBP. In addition, regional structures can be correlated with fault trends.

Keywords: Fm. Santiago Peak, volcanic facies, aeromagnetometry.

Dedicatoria

A mi madre y padre: Norma y Alejandro

A mis hermanos: Alejandra y Francisco

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE)

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

Al Dr. Luis Alberto Delgado Argote por su paciencia y ayuda en este trabajo. A los miembros de mi comité, M.c. Juan Manuel Espinosa Cardeña, Dra. Olga Sarychikhina, Dr. Horacio De La Cueva Salcedo. Gracias por su atención, paciencia y comentarios que ayudaron a forjar esta tesis.

A los profesores del posgrado de Ciencias de la Tierra con los que estuve en clase. Al personal de apoyo técnico/administrativo del posgrado de Ciencias de la Tierra.

Al Dr. Arturo Martin Barajas e Ing. Javier Hernández Ramos por tenerme en consideración en la expedición a la Isla Ángel de La Guarda.

A Jorge Ledesma Vázquez, gracias por su apoyo.

Al señor Jorge Guereca y a su señora esposa Martha Pizaña. A la señora Edna Peralta. A los vecinos Fco. Javier Davalos Gutierrez y Victor Perez Arroyo.

A mis compañeros de generación: Aideliz, Beatriz, Griselda, Luis Ángel, Fernando, Juventino, Iván, Josué, Jaziel, Jorge, Andrés, Juan Carlos. A los Manuel, Allan, Emanuel y Roberto. A mis amigos en Zacatecas: Esteban, Miguel, Perla, Bianney, Iván Medrano y José Hugo Arana. A mis asesores no oficiales: Jaziel, Andrés. Javier, Paul, Kommander (Raúl), Adrián, Jonathan, Sebastián, Marcos, (una disculpa a los que me haya olvidado mencionar). A los compadrishs Jaziel y Andrés, y miembros honorarios del cubo "six hundred sixty six". A los cerros de Ensenada.

Y a todas las personas del posgrado de Ciencias de la Tierra.

Tabla de contenido

Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xii
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Contexto geológico.....	6
1.2 Antecedentes.....	7
1.3 Metamorfismo, geoquímica y edad de la Fm. Santiago Peak.....	9
1.4 Objetivos.....	12
1.4.1 Objetivo general.....	12
1.4.2 Objetivos específicos.....	12
1.5 Hipótesis.....	12
Capítulo 2. Metodología.....	14
2.1 Cartografía geológica.....	14
2.1.1 Análisis de imágenes satelitales.....	14
2.1.1.1-Interpretación de lineamientos rectilíneos.....	15
2.1.1.2 Interpretación de curvilineamientos.....	15
2.1.1.3 Interpretación litológica.....	15
2.2 Trabajo de campo.....	16
2.3 Análisis estructural.....	16
2.4 Petrografía.....	17
2.5 Datos de susceptibilidad y aeromagnetometría.....	17
2.5.1 Datos de susceptibilidad magnética.....	17
2.5.2 Datos de aeromagnetometría.....	18
Capítulo 3. Litología del área de estudio.....	20
3.1 Rocas prebatolíticas.....	20
3.1.1 Tobas y lavas andesíticas.....	20
3.1.2 Volcaniclásticos y lavas.....	23
3.1.3 Lavas y depósitos volcaniclásticos.....	25
3.1.4 Lavas andesíticas.....	26
3.1.5 Rocas subvolcánicas.....	26
3.1.6 Brechas andesíticas.....	28
3.1.7 Lavas dacíticas.....	30
3.1.8 Volcaniclásticas riolíticas.....	32
3.2 Secuencia plutónica cretácica.....	32

3.2.1. Plutón San Antonio de las Minas (Unidad Kdi).....	32
3.2.2. Plutón Ensenada (Unidad Kgd).....	33
3.3 Rocas postbatolíticas.....	33
3.3.1 Formación Rosario.....	33
3.4 Petrografía	34
3.4.1 Lavas y diques de la Fm. Santiago Peak y plutones del Cinturón Batolítico Peninsular	34
3.4.2 Volcanoclásticas y epiclásticas volcánicas de la Fm. Santiago Peak.....	39
3.4.3 Rocas en contacto con el plutón Ensenada.....	43
Capítulo 4. Geología estructural.....	47
4.1 Análisis regional partir de lineamientos rectilíneos.....	47
4.2 Análisis regional a partir de lineamientos curvilineamientos.....	48
4.3 Datos de estratificación y foliación.....	51
4.4 Descripción de fallas y zonas de cizalla.....	54
4.5 Secciones geológicas.....	59
Capítulo 5. Análisis cualitativo geofísico.....	63
5.1 Datos de susceptibilidad magnética.....	63
5.2 Descripción del mapa de anomalía magnética residual.....	69
5.3 Descripción del mapa de anomalía magnética reducida al polo.....	71
5.4 Descripción del mapa de señal analítica.....	71
5.5 Descripción del mapa de gradiente horizontal direccional.....	75
Capítulo 6. Discusión.....	78
6.1 Relaciones litológicas.....	78
6.2 Relaciones petrográficas.....	80
6.3 Relaciones estructurales.....	81
6.4 Historia geológica.....	83
Capítulo 7. Conclusiones.....	87
Literatura citada.....	89

Lista de figuras

Figura	Página	
1	Figura 1. Clasificación de explosividad volcánica basado en: a) Elevación de la pluma volcánica (Cas and Wright 1988,); b) dispersión y fragmentación (Walker, 1973).	3
2	Representación esquemática de las facies volcánicas según Williams y McBirney (1979) con respecto a un volcán compuesto. Las facies centrales representan la estructura central del volcán, las facies proximales forman los flancos de la estructura volcánica, mientras que en las facies distales están los depósitos de los restos erosionados más alejados del volcán, así como depósitos piroclásticos.	4
3	Imagen satelital del área de estudio obtenida de Google Earth con el trazo de las carreteras y norte de la ciudad de Ensenada. SAM indica el sur de San Antonio de las Minas	4
4	Contexto regional de la zona de estudio (adaptado de Herzig y Kimbrough, 2014). Las zonas en blanco corresponden a áreas con rocas más jóvenes que los granitoides del Cinturón Batolítico Peninsular.	5
5	Mapa de micro sismicidad cerca de la zona consultados desde 1950 a 2017. 1, Falla Agua Blanca; 2, falla El Descanso-Estero; 3, falla Tres Hermanos (Chdawick,1978); 4, Falla Ojos Negros; 5, Falla San Miguel, (Cruz-Castillo, 2002). El recuadro amarillo representa el area de estudio de la Figura 2.	8
6	Columna estratigráfica compuesta del área de estudio. Cz: Cenozoico. Las edades isotópicas de los plutones Ensenada (1) y San Antonio de las Minas (2) y la edad de la unidad Kvc (3) son las que se muestran en la Tabla 2. El límite inferior de la Fm. Santiago Peak se tomó con base en edades U-Pb en zircones de Herzig y Kimbrough (2014) y el superior de Meeth (1993). Las edades de la Fm. Rosario (Kfr) son con base en nanofósiles y macrofósiles obtenidas por Kenneth (1982) y las de la Fm. Rosarito Beach (Trb) son de K-Ar de Gastil et al. (1975).	21
7	Mapa geológico de la zona de estudio. Las abreviaturas significan: cC, cerro Cantil; c3C, cerro Tres Cuchillas; cA, cañón Arce; cCH, cañada Chavira; cM, cerro Miracielo; aSN, arroyo sin nombre; c4M, cañón Cuatro Milpas; Km9, kilómetro 9; rLP, rancho Los Pinales; cDP, cañón Doña Petra; cCA, cañón La Cascada; cU, cerro de Ulloa; Ind, indiferenciado.	22
8	Litología característica en afloramientos. a) El dique en líneas azules y los sills en líneas naranja cortan la unidad Kan al sur de San Antonio de las Minas; b) unidad Kvc al noreste del cañón Cuatro Milpas; c) roca encajonante (Kvc metamorfozada) del plutón Ensenada al sur del cañón la Cascada; d) dique andesítico de la unidad Ksv en la carretera Tecate-Ensenada al sur del cerro Tres Cuchillas; e) dique andesítico al oeste del cerro Tres Cuchillas; f) sill en la unidad Kvc al este de la cañada Chavira; g) estratos de la unidad Klv al norte del Km 9 del Libramiento Ensenada; h) lava andesítica de la unidad Kap al este del cañón Cuatro Milpas.	27

- 9 Litología característica en afloramientos. a) Roca encajonante al norte del plutón Ensenada con foliación perpendicular al lapicero en el norte del Libramiento Ensenada; b) dique dacítico cortando a la unidad Kvc en el cerro Miracielo; c) detalle de la unidad Kab al sur del cerro de Ulloa; d) bloque de la unidad Kab rodeado por lava de la unidad Kda al suroeste del cerro de Ulloa; e) relicto de la unidad Kvc dentro del plutón Ensenada al norte del mismo plutón; f) relicto en línea discontinua de la Figura 6e suspendido en la masa granodiorítica (Kgd). Las rocas volcanoclásticas de la unidad Kvc encima de la unidad Kgd muestran estratificación vertical. 29
- 10 Litología característica en afloramientos. a) Depósitos volcanoclásticos y capa de lava vesicular de la unidad Kvc al norte de la cañada Chavira; b) capas de lapilli acrecional; c) tobas riolíticas de la unidad Krt al noreste del rancho Los Pinales; d) andesita de la unidad Ksv con estructura columnar de la unidad Ksv en el cañón Arce. 31
- 11 Microfotografías del grupo de láminas pertenecientes a lavas e intrusivos. En la izquierda vistas en luz natural y a la derecha vistas con polarizador. a) y b) Dique andesítico con textura porfídica, EN-8-II-17; c) y d) Lava dacítica con cuarzo en bahías, EN-8-III-17; e) y f) Granodiorita con textura hipidiomórfica equigranular, EN-8-X-16. Qz, cuarzo; Pl, plagioclasa; Op, opacos; Cpx, clinopiroxeno; Kfs, feldespato potásico; Bt, biotita; Hbl, hornblenda. 37
- 12 Microfotografías del grupo de láminas pertenecientes volcanoclásticas y epiclásticas volcánicas, en la columna izquierda se encuentran vistas en luz natural y las de la derecha se encuentran vistas con un polarizador. a,b) Brecha andesítica (EN-10-II-17), B) Arenisca volcánica (EN-13-II-17), c,d) Ignimbrita alterada (EN-2-V-17), e,f) Lapilli acrecional (EN-1-III-17) Qz, cuarzo; Pl, plagioclasa; Op, opacos; Czo, clinzoisita; LtV, lítico volcánico; Cl, clorita; Ep, epidota; La, lapilli acrecional; Fla, fragmento de lapilli acrecional. 42
- 13 Microfotografías del grupo de láminas pertenecientes a las rocas en contacto con el plutón Ensenada, la columna izquierda se encuentran vistas en luz natural y las de la derecha se encuentran vistas con un polarizador. a,b) Hornfels de hornblenda y clinopiroxeno (EN-2-X-16), c,d), Hornfels de actinolita (EN-7-X-16), e,f) Cuarzita (EN-5-III-17). Todos las microfotografías se encuentran con un aumento de 10x. Qz, cuarzo; Pl, plagioclasa; Op, opacos; Cpx, clinopiroxeno; Kfs, feldespato potásico; Bt, biotita; Hbl, hornblenda, Act, actinolita. 46
- 14 Lineamientos interpretados a partir de una imagen satelital Google Earth. Los colores 1 al 5 indican las diversas tendencias de lineamientos rectilíneos. Las líneas rectas naranja marcan las divisiones entre los sectores analizados. Las abreviaturas significan: cC, cerro Cantil; c3C, cerro Tres Cuchillas; cA, cañón Arce; cCH, cañada Chavira; cM, cerro Miracielo; aSN, arroyo sin nombre; c4M, cañón Cuatro Milpas; KM 9, kilómetro 9; rLP, rancho Los Pinales; cDP, cañón Doña Petra; cCA, cañón La Cascada; cU, cerro de Ulloa; cVV, Cañón Valle Verde. En azul marino se representa una tendencia con orientación 0°-40°; en café 40°-80°, en rojo 80°-280°, en negro 280°-320° y cian 320°-0°. Los números dentro del semicírculo con todos los lineamientos son el número de rasgos en cada sector de 30°. 49
- 15 Curvilineamientos que pueden asociarse con cuerpos magmáticos subvolcánicos 50

- 16 Mapa geológico de la zona de estudio. A) Estereograma de 28 polos de estratificación de la zona norte, cuyo plano promedio es $106^{\circ}/27^{\circ}$, similar al de la zona sur B) de $96^{\circ}/45^{\circ}$. El cambio en el buzamiento puede deberse a esfuerzos compresivos antes de la intrusión del plutón Ensenada. C) a F) muestran la foliación metamórfica de las rocas encajonantes del plutón Ensenada. En C) la foliación está influenciada por el emplazamiento del plutón Ensenada, en D) la foliación tiende a ser paralela a lineamientos estructurales, así como a la periferia del plutón Ensenada, mientras que en E) es notable el paralelismo entre la estratificación de la zona sur con la foliación por deformación y en F) el promedio de la orientación de los estratos de la zona norte es paralela a la foliación, ambas casi E-W buzando hacia el sur. 52
- 17 Mapa de fallas cartografiadas en el campo analizadas por sector y lineamientos de la Fig. 14. En cada sector se separan las fallas por su naturaleza según criterios de Ragan (1985). Los estereogramas muestran densidad de polos en contornos de Kamb y su plano promedio. Las abreviaturas significan: cC, cerro Cantil; c3C, cerro Tres Cuchillas; cA, cañón Arce; cCH, cañada Chavira; cM, cerro Miracielo; aSN, arroyo sin nombre; c4M, cañón Cuatro Milpas; KM 9, kilómetro nueve; rLP, rancho Los Pinales; cDP, cañón Doña Petra; cCA, cañón La Cascada; cU, cerro de Ulloa. 53
- 18 a) Falla normal en área del cañón Cuatro Milpas con una mochila de referencia; b) falla normal bajo una brecha andesítica formada por una falla inversa al este del cañón Cuatro Milpas; c) falla inversa paralela a los planos de estratificación en la zona del cañón Cuatro Milpas-KM 9; d) falla lateral de bajo ángulo al oeste del arroyo Sin Nombre; e) falla lateral derecha al norte del cerro Tres Cuchillas; f) brecha de falla en la cañada Chavira. Las flechas amarillas indican el sentido del desplazamiento y las naranjas indican el punto cardinal norte (N) o sur (S). 56
- 19 a) Falla inversa cortada por una falla normal asociada a relajación; b) falla inversa con brecha de falla al norte oeste del cañón Doña Petra; c) falla inversa en el Libramiento Ensenada al E del cañón Doña Petra; d) espejo de falla lateral al W del cañón Doña Petra, la libreta azul mide 15cm de largo; e) zona de cizalla al NW del cañón Doña Petra, se distingue que algunos bloques de roca no son deformados completamente; f) Falla de bajo ángulo lateral derecha en el Libramiento Ensenada al sur del cañón la cascada cortando a las unidades Kvc y Kgd (foto tomado por Jaziel Froilán Cambrón). Las flechas amarillas indican el sentido del desplazamiento. Las flechas naranjas indican el punto cardinal; N, norte. 58
- 20 Líneas de referencia para las secciones geológicas de la Figura 26 60
- 21 Secciones geológicas indicadas en la Figura 20. En A-A', la zona entre el Cañón Cuatro Milpas y el arroyo Sin Nombre destaca el echado más alto de los estratos con respecto al resto del área; en B-B', entre la carretera Ensenada y el cerro Miracielo se presentan los cuerpos subvolcánicos andesíticos y dacíticos de Kda. Debajo del cerro de Ulloa se infiere, a partir de observaciones al oriente de San Antonio de la Minas la presencia de cuerpos similares de Kap. 61
- 22 Variación de la susceptibilidad magnética medida en el campo en cada unidad litológica. Cada símbolo representa el promedio de diez o más datos en un sitio de muestreo. La barra amarilla en cada columna representa el promedio de cada unidad. 64

- 23 Relación de susceptibilidad magnética promedio medida en los afloramientos de las unidades litológicas versus porcentaje en peso de óxidos (minerales opacos) vistos en lámina delgada. Cada punto representa diez o más datos. 64
- 24 Datos de susceptibilidad tomados en un sill andesítico (Ksv) y las rocas volcánicas encajonantes (Kvc). Nótese que el contraste de susceptibilidad magnética entre estas rocas es de un orden de magnitud. El objeto rojo tiene una longitud de 50 cm. Abreviaturas: Kvc; brecha tobácea, Ksv; dique andesítico. 67
- 25 Mapa geológico (a) y sección de susceptibilidad magnética (b), a lo largo de un segmento del Libramiento Ensenada. Se puede observar una zona con mayor valor a partir de la estación 13 a la 18, que está asociada a la litología. Abreviaturas significan: aSN, arroyo sin nombre; c4M, cañón Cuatro Milpas; Km9, kilómetro nueve; rLP, rancho Los Pinales; cDP, cañón Doña Petra; cCA, cañón La Cascada. 68
- 26 Mapa de anomalía magnética. Se pueden distinguir tres dipolos los cuales se pueden asociar a los cuerpos plutónicos de la zona, los bajos magnéticos que se encuentran entre estos dipolos están asociados a rocas metamórficas, volcánicas y sedimentos de edades mesozoicas. Contornos cada 100 nT. Abreviatura: Prom. K, susceptibilidad magnética promedio 70
- 27 Mapa de anomalía magnética reducida al polo. Contornos cada 100 nT. Abreviatura: Prom. K, susceptibilidad magnética promedio 73
- 28 Mapa de amplitud de señal analítica Contornos cada 0.05 nT/m. Abreviaturas: Prom. K, susceptibilidad promedio 1-2-3-4, unidades magnéticas 74
- 29 Mapa regional de gradiente horizontal realizado a N45°E. Contornos cada 0.05 nT/m. El cuadro externo en línea discontinua es el área de los mapas de anomalías reducidas al polo y amplitud de la señal analítica de las figuras 22 y 23, respectivamente. Destaca la alineación de los gradientes magnéticos NW- SE posiblemente relacionados con fallas regionales y cuerpos plutónicos. Las líneas rojas discontinuas cortan a los lineamientos magnéticos. Fallas regionales: 1, Agua Blanca; 2, Tres Hermanos (Chadwick, 1978); 3, Ojos Negros (Cruz-Castillo, 2002); 4, San Miguel (Cruz-Castillo, 2002). 76
- 30 Ampliación del mapa de gradiente horizontal direccional del área de estudio (cuadro en color negro). El cuadro marcado con líneas discontinuas corresponde al área de datos de anomalías reducidas al polo y amplitud de señal analítica, figuras 26 y 27, respectivamente. 1, Alineaciones de gradiente; 2, trazas inferidas de la falla Tres Hermanos, interpretado de imágenes satelitales; 3, fallas cartografiadas en la zona de estudio, para mayor realce en el mapa se extendieron. En color rosa se muestran las líneas que cortan a los lineamientos magnéticos. Se observa que algunas de las fallas cartografiadas en la zona coinciden con la tendencia de la alineación de gradientes regionales que se observa en la Figura 28. 77
- 31 Mapa geológico de la zona de estudio. Abreviaturas: cC, cerro Cantil; c3C, cerro Tres Cuchillas; cA, cañón Arce; cCH, cañada Chavira; cM, cerro Miracielo; aSN, arroyo Sin Nombre; c4M, cañón Cuatro Milpas; Km9, kilómetro 9; rLP, rancho Los Pinales; cDP, cañón Doña Petra; cCA, cañón La Cascada; cU, cerro de Ulloa. Los incisos A), B) y C) representan las áreas mencionadas en el capítulo de Discusión. 85

Lista de tablas

Tabla	página
1 Tasas mundiales de emplazamiento de magma y producción volcánica (Tomado de Crisp, 1984)	3
2 Edades isotópicas más cercanas al área de estudio	11
3 Ubicación de las muestras petrográficas. LEN, libramiento Ensenada Norte; LES, libramiento Ensenada Sur; SAM, San Antonio de las Minas; LEC, libramiento Ensenada Centro; LEC, LPN, Los Pinales Norte; CM, Cerro Miracielo; LPS, Los Pinales Sur; C3C, Cerro Tres Cuchillas; Cañon Doña Petra.	35
4 Muestras petrográficas de lavas y diques de la Fm. Santiago Peak y plutones del CBP. Abreviaciones: ac, accesorio; Ap, apatito; Bt, biotita; Cl, clorita; Cpx, clinopiroxeno; Clz, clinozoisita; Ep, epidota; Fl, fragmento lítico; Hbl, hornblenda; Kfs, feldespato potásico; M, matriz; NA, no aplica; Op, opacos; Pl, plagioclasa; plutón Ensenada; pSAM, plutón San Antonio de las Minas. Qtz, cuarzo; Rt, Rutilio; Ser, sericita; Tn, titanita; Tpl, tipo de plagioclasa donde: A andesina, Ab albita, L labradorita, O oligoclasa, Zr, zircón	36
5 Muestras petrográficas de rocas volcanoclásticas y volcanoclásticas epiclásticas de la Fm. Santiago Peak y volcanoclásticas epiclásticas. Abreviaciones: ac, accesorio; Ap, apatito; Bt, biotita; Cal, calcita Cl, clorita; Cpx, clinopiroxeno; Clz, clinozoisita; Ep, epidota; Fl, fragmento lítico; Hbl, hornblenda; Hem, hematita; Kfs, feldespato potásico; M, matriz; NA, no aplica; Op, opacos; Pl, plagioclasa; plutón Ensenada; pSAM, plutón San Antonio de las Minas. Qtz, cuarzo; Rt, Rutilio; Ser, sericita; Tn, titanita; Tpl, tipo de plagioclasa donde: A andesina, Ab albita, L labradorita, O oligoclasa, Zc, zoisita Zr, zircón.	41
6 Muestras petrográficas de las rocas en contacto con el plutón Ensenada. Abreviaciones: ac, accesorio; Ap, apatito; Bt, biotita; Cal, calcita Cl, clorita; Cpx, clinopiroxeno; Clz, clinozoisita; Ep, epidota; Fl, fragmento lítico; Gnem, granonematoblástica; Gprf, granoporfidoblástica Hbl, hornblenda; Hem, hematita; Kfs, feldespato potásico; M, matriz; NA, no aplica; Op, opacos; Pl, plagioclasa; plutón Ensenada; pSAM, plutón San Antonio de las Minas. Qtz, cuarzo; Rt, Rutilio; Ser, sericita; Tn, titanita; Tpl, tipo de plagioclasa donde: A andesina, Ab albita, L labradorita, O oligoclasa, Zc, zoisita Zr, zircón.	45
7 Susceptibilidad magnética y volumen por ciento de minerales opacos identificados en láminas delgadas de muestras representativas de las distintas unidades litológicas.	65
8 Esquema que representa los episodios que ocurrieron desde el primer depósito de la Formación Santiago Peak hasta el Cretácico Tardío en la zona de estudio	86

Capítulo 1. Introducción

De los ambientes generadores de magma en la Tierra (Tabla 1), las zonas de subducción aportan anualmente 8.6 km^3 de material repartidos entre volcanismo (0.4 a 0.6 km^3) y emplazamiento de plutones (2.5 a 8 km^3) de un total de 30 km^3 (Crisp, 1984).

De esta aportación de materia a la corteza terrestre, el volcanismo efusivo es principalmente lávico y los materiales explosivos, principalmente en ambiente aéreo, se engloban bajo el término de volcániclastico, definido como un espectro de materiales clásticos compuestos mayormente por fragmentos volcánicos formados por cualquier mecanismo, transportados por cualquier mecanismo y depositados en cualquier ambiente (Fisher y Smith, 1993). La reconstrucción de eventos y estructuras volcánicas antiguas es un trabajo complejo debido a que las estructuras originales pueden ser destruidas rápidamente por la erosión superficial o el metamorfismo profundo (Cas y Wright, 1988). Adicionalmente, algunas leyes geológicas como el principio de horizontalidad y superposición de capas, no siempre son aplicables a las secuencias volcánicas (Williams y McBirney, 1979). La clasificación de la explosividad volcánica (Figura 1a y b) se basa principalmente en las dimensiones de las plumas de explosión y en el grado de fragmentación y dispersión de los depósitos de piroclásticos (Walker 1973, Cas and Wright, 1988). La interpretación del tipo de actividad explosiva es compleja en depósitos antiguos por efectos de erosión y cambios de facies en distancias pequeñas y periodos cortos de actividad de un volcán.

La identificación de las erupciones puede ser compleja por la alternancia de eventos de diferente explosividad y la existencia de varias ventilas y cráteres con actividad simultánea en un campo volcánico.

De manera general las rocas volcánicas de una zona de cualquier edad pueden ser analizadas a partir del concepto de facies volcánicas, el cual consiste en un conjunto de estructuras y texturas específicas de una unidad volcánica, que definen el origen y fuente, así como el ambiente de depositación (Németh y Martin, 2007). Las facies, de acuerdo con su distribución con respecto a un volcán o centro eruptivo, pueden ser distales, proximales o centrales. Se han propuesto diferentes formas de esquematizar estas facies y sus variaciones (Selley, 1978; Williams y McBirney, 1979, Wright, 1981; Mathisen y McPherson, 1991). Según Williams y McBirney (1979) las facies volcánicas (Figura 2) se describen de manera general de la siguiente forma:

- a) Las facies volcánicas centrales tienen una cercanía aproximada de 0.5 a 2 km de la ventila volcánica central. Estas facies son fáciles de reconocer porque combinan estructuras de diques, sills, brechas

asociadas con troncos y cuellos volcánicos. La alteración hidrotermal con acentuado gradiente lateral puede ser común, el material eyectado grueso puede estar mal clasificado, sus echados ser abruptos, y los flujos de lava delgados están volumétricamente subordinados al material eyectado.

- b) Las facies volcánicas proximales pueden localizarse entre 5 y 15 km de las ventilas centrales. Los productos volcánicos ubicados a distancias cada vez mayores en las laderas y flancos exteriores de volcán tienen varias de las siguientes características: a) las lavas son gruesas y anchas, pueden desarrollarse lahares con bloques angulares a subangulares por encima de los 10 m de diámetro, b) las capas de tefra tienen buena clasificación y el tamaño de las partículas es comúnmente de lapilli a ceniza gruesa. En esta zona el transporte del material detrítico puede favorecerse por el contenido de agua y, de existir ignimbritas, pueden estar moderada a fuertemente soldadas y compactadas. Varias de estos depósitos desarrollan indicadores sobre la ubicación de la fuente.
- c) Las facies distales están situadas fuera de la base de la estructura volcánica principal, tienden a tener mayor continuidad lateral que las zonas cercanas al volcán y se ajustan más estrechamente a los criterios estratigráficos convencionales. Las características de los afloramientos en esta área periférica incluyen la presencia de tefra en capas finas con tamaños de grano en el rango de cenizas gruesas a finas, lahares con compactación moderada a débil, sedimentos de ambientes lacustres, suelos y desechos orgánicos, flujos de lava restringidos, así como rellenos de cañones o mezclas de otros tipos de materiales volcanoclásticos o sedimentarios.

En este trabajo se presenta el estudio de una fracción de una secuencia volcánica y volcanoclástica cretácica antigua erosionada que forma parte de un segmento de arco equivalente a la Formación Santiago Peak (Stephens, 2009). El área de estudio se localiza al sureste del poblado de San Antonio de las Minas y al norte del Libramiento Ensenada (Figura 3). Cubre una zona de 9 km en sentido N-S y de 11 km en sentido E-W. Geológicamente, se ubica en la zona occidental del Cinturón Batolítico Peninsular (CBP) según la descripción de Gastil et al. (1990) (Figura 4). La zona presenta diferentes eventos de deformación anteriores a la tectónica actual de la península de Baja California. La descripción de las unidades litológicas y de la geometría de las zonas de falla son aportaciones de este trabajo para descifrar la historia geológica del NW de Baja California, además de ofrecer la cartografía básica que deberá utilizarse para la planeación urbana de norte y noroeste de la ciudad de Ensenada.

Tabla 1. Tasas mundiales de emplazamiento de magma y producción volcánica (Tomado de Crisp, 1984)

Ambientes generadores de magma en la Tierra	Tipo de actividad	Tasas de emplazamiento de magma y producción volcánica (Km ³ por año)
Zonas de subducción	Volcánica	0.4-0.6
	Plutónica	2.5-8
Intracontinental	Volcánica	0.03-0.1
	Plutónica	0.1-1.5
Dorsales oceánicas	Volcánica	3
	Plutónica	18
Intraplaca oceánica	Volcánica	0.3-0.4
	Plutónica	1.5-2.0
Magmatismo Global		26-34

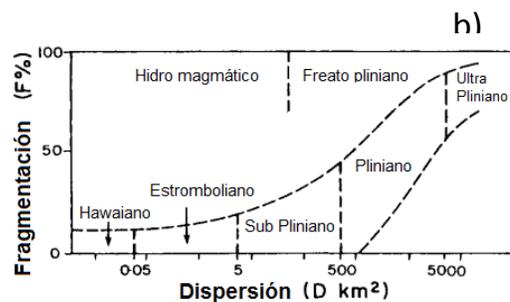
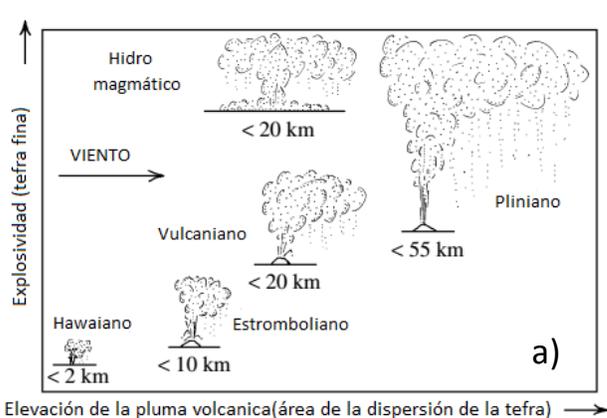


Figura 1. Clasificación de explosividad volcánica basado en: a) Elevación de la pluma volcánica (Cas and Wright 1988,); b) dispersión y fragmentación (Walker, 1973).

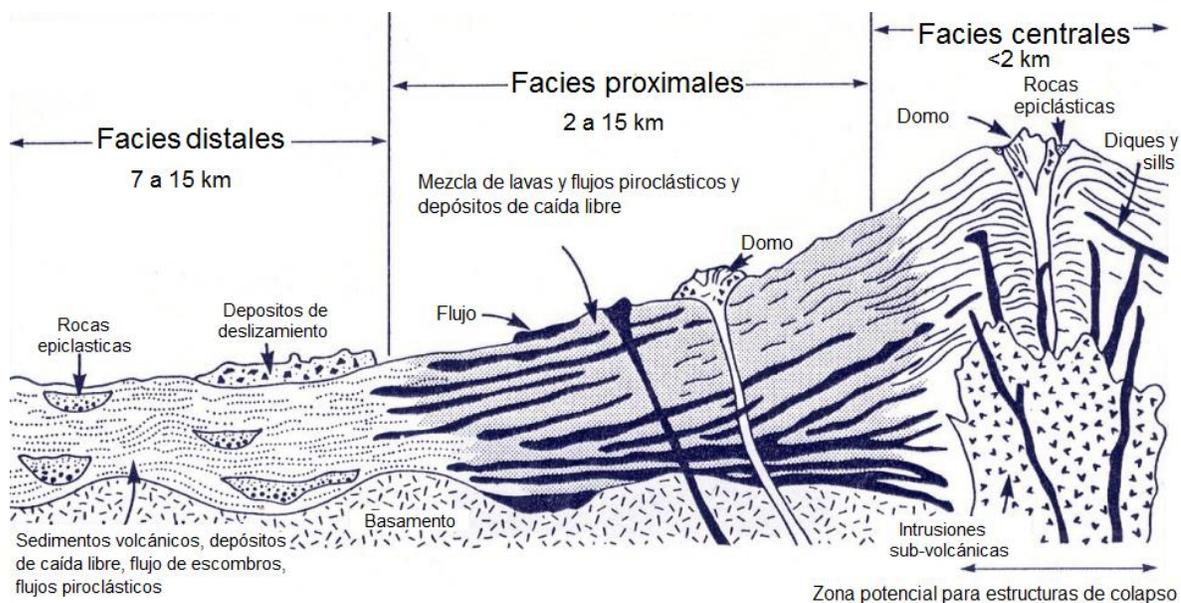


Figura 2. Representación esquemática de las facies volcánicas según Williams y McBirney (1979) con respecto a un volcán compuesto. Las facies centrales representan la estructura central del volcán, las facies proximales forman los flancos de la estructura volcánica, mientras que en las facies distales están los depósitos de los restos erosionados más alejados del volcán, así como depósitos piroclásticos.

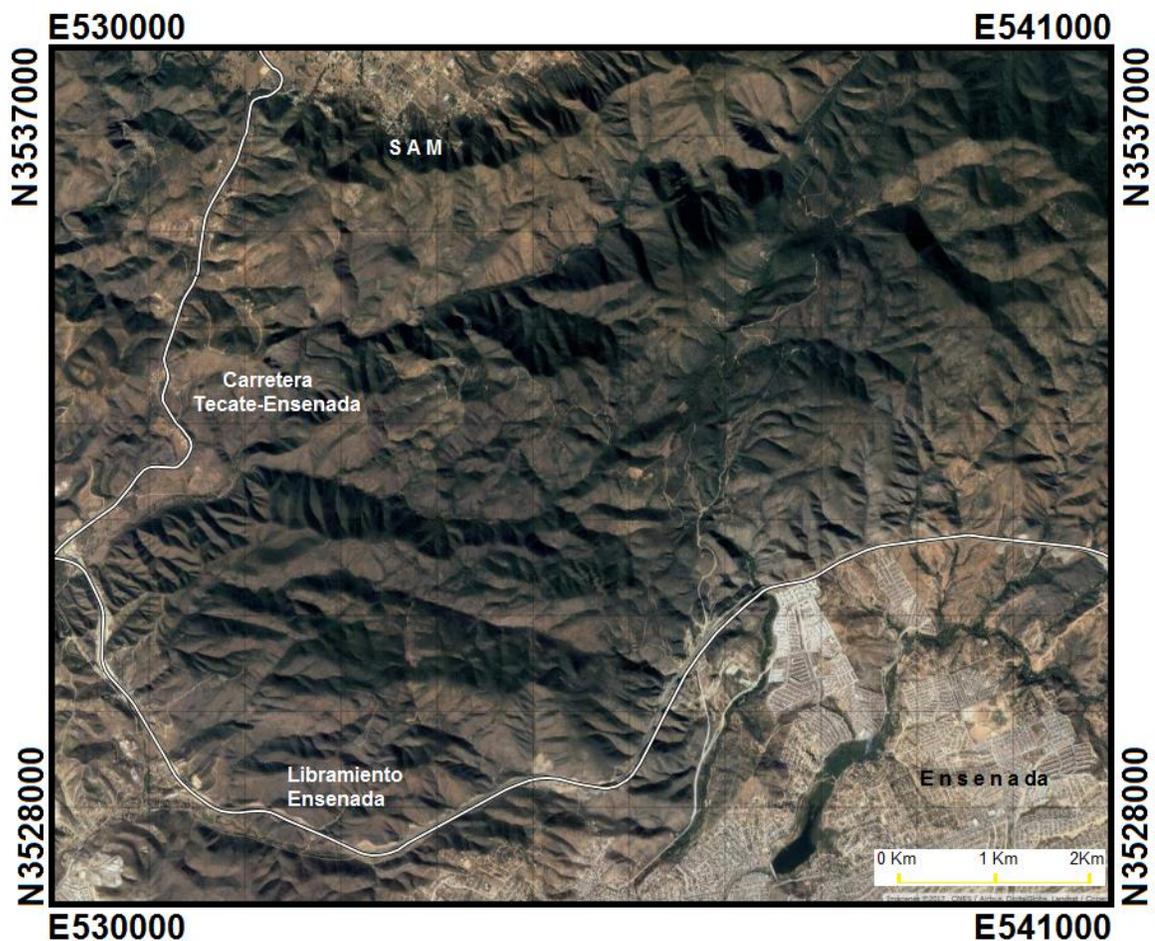


Figura 3. Imagen satelital del área de estudio obtenida de Google Earth con el trazo de las carreteras y norte de la ciudad de Ensenada. SAM indica el sur de San Antonio de las Minas

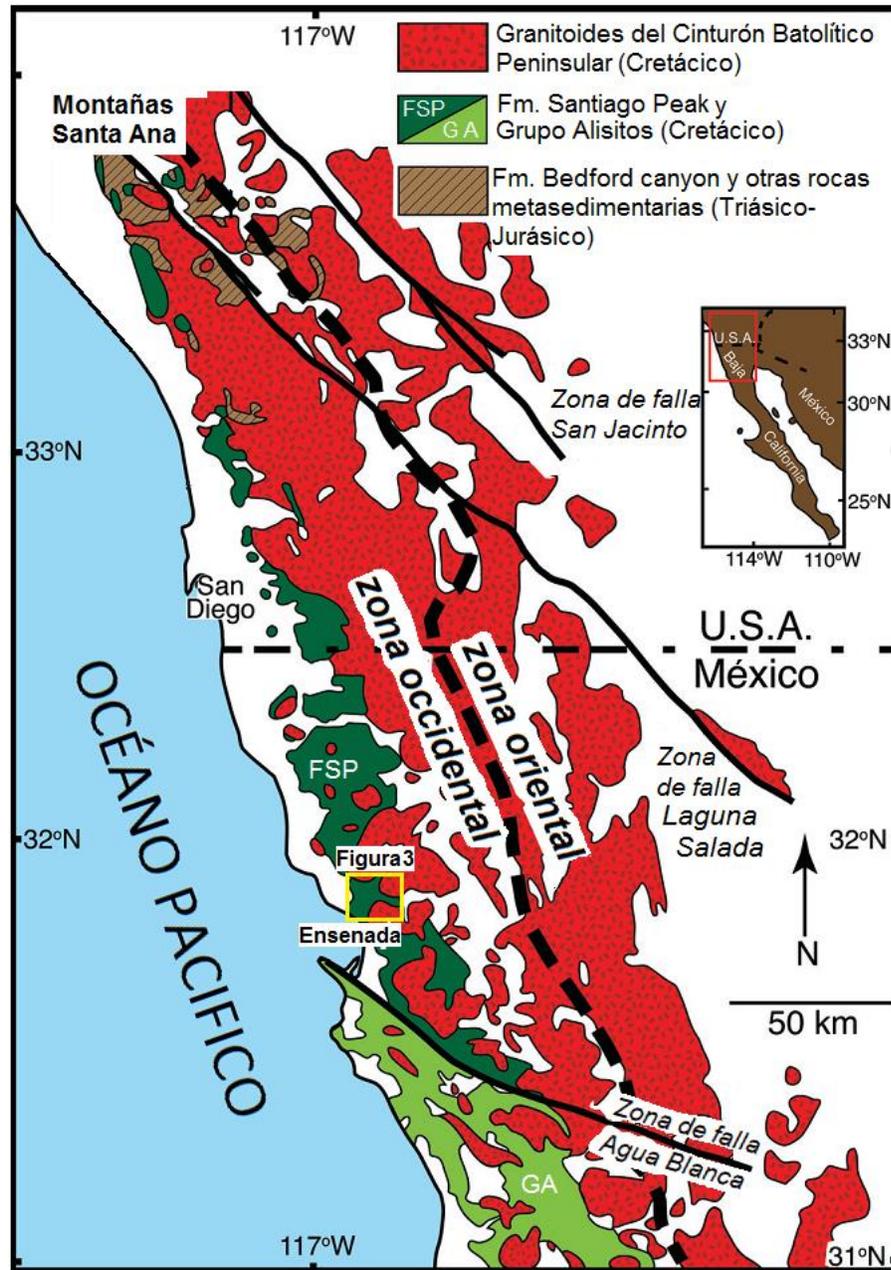


Figura 4. Contexto regional de la zona de estudio (adaptado de Herzig y Kimbrough, 2014) En color blanco se representa rocas más jóvenes que los granitoides del Cinturón Batolítico Peninsular.

1.1. Contexto geológico

De acuerdo con Gastil et al. (1975), la geología de la península de Baja California, se puede definir en tres grandes grupos litológicos: a) prebatolítico, b) batolítico y postbatolítico. Las rocas prebatolíticas incluyen litologías desde precámbricas hasta del Cretácico Temprano. Durante el Paleozoico hasta el Cretácico predominó en la península un ambiente marino (Gastil y Miller, 1993). Un cambio importante en la columna estratigráfica ocurre en el Jurásico-Cretácico con la depositación de rocas volcánicas y volcanoclásticas, las cuales corresponden a las rocas de la Formación Santiago Peak (Fm. Santiago Peak) y, posteriormente, las rocas de la Formación Alisitos (Fm. Alisitos) están relacionadas a un arco al poniente de Baja California (Allison et al., 1974). La Fm. Santiago Peak está conformada por una secuencia de arco volcánico de borde continental (Wetmore et al., 2003; Herzig y Kimbrough, 2014) que tiene una edad estimada entre 128 y 116 Ma (Cretácico Temprano) a partir de zircones (Anderson, 1991; Meeth, 1993; Herzig y Kimbrough, 2014). Esta secuencia aflora desde las montañas Santa Ana, California, E.U.A. Estudios recientes (Schmidt et al., 2014) sugieren que la extensión del Arco Santiago Peak se observa más hacia el sur hasta el límite del paralelo 28 (Figura 4). A partir de la falla Agua Blanca la Fm. Santiago Peak se separa del Grupo Alisitos. Este Grupo es una secuencia vulcanosedimentaria del Cretácico Temprano determinada con base en fósiles y se ubica al occidente del borde continental (Allison, 1955; Silver et al., 1963; Gastil et al., 1975, Almazán, 1986, Begg, 1988, Suárez-Vidal, 1988, Begg, 1988). Las rocas de la Fm. Santiago Peak fueron acrecionadas hace aproximadamente 111-103 Ma con las rocas del arco de islas del Grupo Alisitos (Wetmore et al., 2002; Schmidt et al., 2014). Es característico en este grupo la presencia de facies calcáreas arrecifales. En el segmento de arco con componentes continentales de la Formación Santiago Peak no se encuentran depósitos subacuáticos, el contenido de fósiles es limitado, principalmente de *Buchia Piochii* del Jurásico Tardío (Fife et al., 1967). Otras características importantes que diferencian a estas secuencias volcánicas son las composiciones químicas. En el Grupo Alisitos la composición dominante es máfica a intermedia (basaltos, andesitas y riolitas escasas), mientras que la Fm. Santiago Peak las rocas son predominantemente dacíticas y riolíticas. Estas dos unidades estratigráficas están separadas por la zona de falla Agua Blanca (ZFAB), localizada al sur de la ciudad de Ensenada (Allen et al., 1960; Rockwell et al., 1989; Suárez-Vidal et al., 1991). Posteriormente, a partir de las observaciones de Wetmore et al. (2002), se separan los arcos de afinidad oceánica y de borde continental a partir de la Falla Agua Blanca Ancestral, también al sur de Ensenada (Wetmore et al., 2003; Herzig y Kimbrough, 2014).

Las rocas graníticas corresponden a los cuerpos plutónicos que conforman el Cinturón Batolítico Peninsular (CBP) que intrusionan a la secuencia prebatolítica. Las edades U-Pb en zircones de las rocas del CBP varían desde 140 a 80 Ma (Ortega-Rivera, 2003). El CBP se divide longitudinalmente en franjas

orientadas NW-SE, siguiendo criterios petrológicos, geoquímicos y geofísicos, los cuales se ha interpretado que se asocian a fuentes y cortezas de emplazamiento diferentes (Wetmore et al., 2003 y referencias incluidas). En la zona occidental se reconoce una corteza primitiva, con una firma de arco de islas y la zona oriental está definida por litosfera continental más antigua (Wetmore et al., 2003). Los plutones del área de estudio son plutones ubicados en la zona occidental, están clasificados como granitos tipo I que se caracterizan por tener centros gabróticos y bordes tonalíticos-granodioríticos (Walawender et al., 1990) que, según Rogers y Hawkesworth (2000) son originados por la fusión parcial de rocas del manto. Los plutones de la zona occidental tienen edades que varían desde 120 a 105 Ma, tanto con el método U-Pb en zircones, como K-Ar y ^{40}Ar - ^{39}Ar en hornblenda y biotita (Krummenacher et. al, 1975; Ortega-Rivera, 2003).

Las rocas postbatolíticas incluyen a la Formación Rosario constituida por depósitos clásticos que comprenden conglomerados, areniscas y arcillas, que se interpretan como el producto de la erosión de los cuerpos volcánicos y plutónicos de la parte superior de los arcos del Cretácico (Santillán y Barrera, 1930; Kilmer, 1970), la cual se depositó de manera discordante durante el Cretácico Tardío. Posteriormente, durante el Mioceno tardío se depositó discordantemente la Formación Rosarito Beach la cual está constituida por derrames basálticos, brechas y arenas con matriz arcillosa, tobas, arenas tobáceas, calizas y conglomerados, característicos de ambientes fluviales, lacustres y de plataforma marina somera (Ashby, 1989).

El área de estudio se encuentra en una zona tectónicamente activa debido al movimiento lateral derecho de la península de Baja California según la dinámica debida al sistema transforme San Andrés-Golfo de California (Legg et al., 1991; Suárez-Vidal et al., 1991). Cerca de la zona de estudio hay varios sistemas de fallas como Agua Blanca y El Descanso-Estero al sur de la zona, Tres Hermanas y San Miguel (Figura 5). En el mapa de la Figura 5 se observa la distribución de epicentros y las fallas regionales más importantes cercanas a la zona de estudio.

1.2. Antecedentes

La mayor parte de los estudios geológicos cercanos al área de estudio se han efectuado principalmente al sur de la ciudad de Ensenada, específicamente los relacionados con el sistema de falla Agua Blanca (Allen et al., 1960; Rockwell et al., 1989; Suárez-Vidal et al., 1991; Wetmore et al., 2003). El más cercano

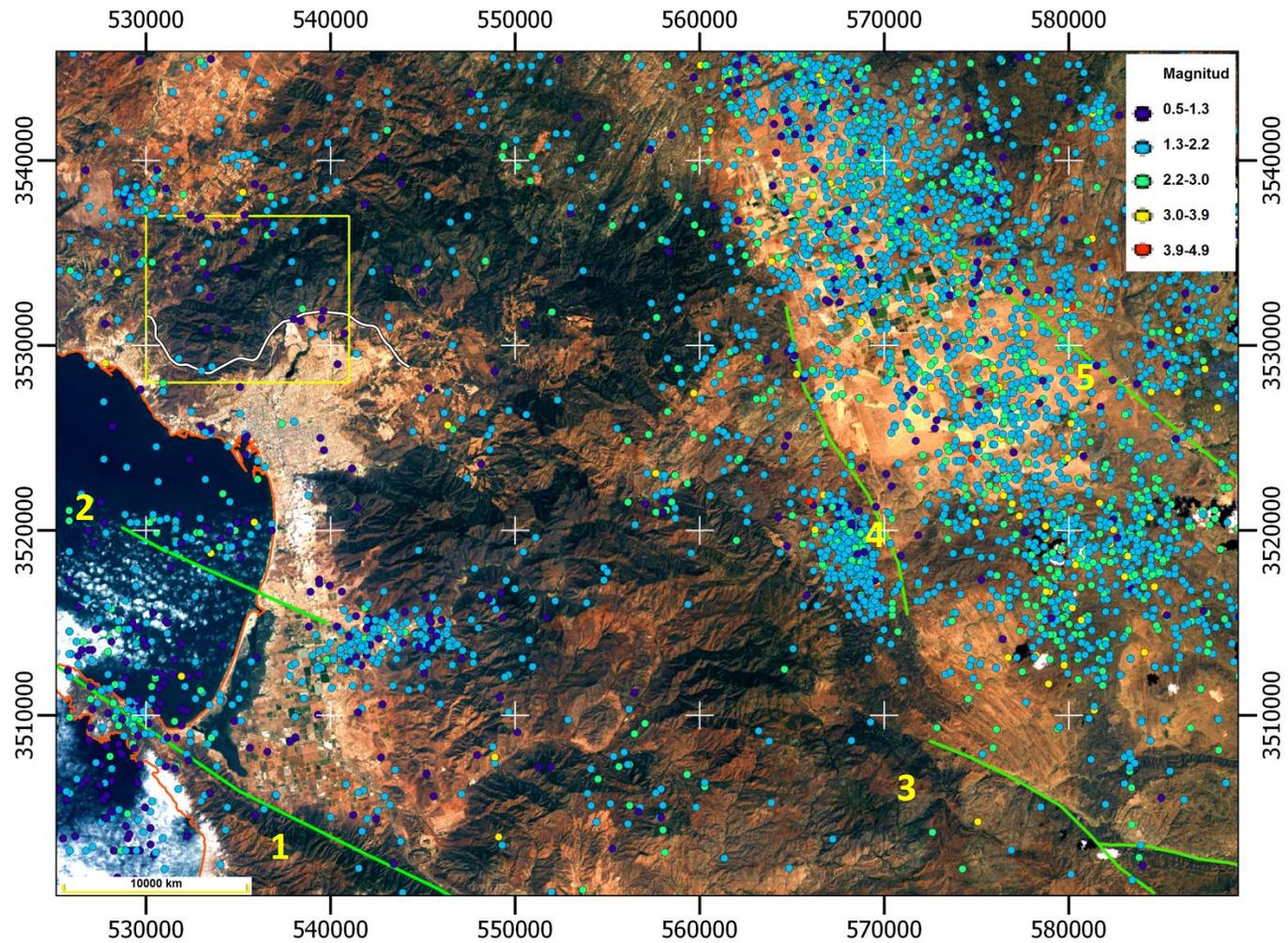


Figura 5. Mapa de micro sismicidad cerca de la zona consultados desde 1950 a 2017. 1, Falla Agua Blanca; 2, falla El Descanso-Estero; 3, falla Tres Hermanos (Chdawick,1978); 4, Falla Ojos Negros; 5, Falla San Miguel, (Cruz-Castillo, 2002);. El recuadro amarillo representa el area de estudio de la Figura 2.

hacia el sur del área de estudio es el de Schroeder (1967), quien analiza parte de la secuencia de la Fm. Santiago Peak al sur de la ciudad de Ensenada. Estudios correspondientes al norte de la zona incluye a Cruz-Castillo y Delgado-Argote (1999), quienes hicieron un estudio estructural de las rocas mesozoicas y cenozoicas que afloran al NW en la zona costera de la bahía Salsipuedes. Reed (1992) y Meeth (1993) trabajaron en el área del cañón La Misión en rocas de la Fm. Santiago Peak. Los estudios de cartografía regional que abarcan la zona de estudio están sintetizados en Gastil et al. (1975), Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL, 1976), en la carta geológico minera H11B12 (Ensenada) a escala 1:50 000, la carta magnética de campo total H11B12 escala 1:50000 y la carta geológica H11-2 (Ensenada) a escala 1:250 000 del Servicio Geológico Mexicano (SGM) (Corral-Gastélum et al., 2001). El trabajo más reciente del área fue hecho por Tiznado-Vázquez (2016), quien realizó un estudio estructural y geoelectrico en el sector norte y centro del Libramiento Ensenada.

1.3. Metamorfismo, geoquímica y edad de la Fm. Santiago Peak

El metamorfismo en las rocas de la Fm. Santiago Peak en el norte de la península es comúnmente identificado como de bajo grado, por encima de la facies de zeolitas y por debajo de la facies de esquistos verdes (Larson, 1948; Fife, 1967; Schroeder, 1968; Anderson, 1991; Balch, 1981; Wetmore et al., 2002; Herzig y Kimbrough, 2014). Los últimos autores mencionan que la alteración mineral de la Fm. Santiago Peak es principalmente producto de la actividad volcánica que formó estas rocas. Sin embargo, en las rocas de la Fm. Santiago Peak se puede observar metamorfismo de contacto por intrusión de los plutones del CBP (Larson, 1948; Schroeder, 1968; Adams, 1979; Herzig y Kimbrough, 2014).

Los mayoría de los estudios de geoquímica de la Fm. Santiago Peak han sido efectuados en las rocas cercanas a la ciudad San Diego, California, E.U.A., por Hawkins (1970), Tanaka et al. (1984), Gorzolla (1988), Herzig (1991), Reed (1992), Meeth (1993), Wetmore et al. (2002) y Farquhason (2004), quienes concluyen que las rocas de dicha Formación pueden dividirse en dos grupos: uno de basaltos y andesitas de afinidad toleítica y otro de riolitas y dacitas calcoalcalinas. Se acepta en general que la secuencia máfica joven tiene afinidad con un arco de islas, mientras que la más silícica pertenece a un arco más maduro que pudo desarrollarse en un margen continental. Herzig y Kimbrough (2014) argumentan que es difícil encontrar un modelo análogo de las rocas de la Fm. Santiago Peak, ya que sus rocas volcánicas presentan un amplio espectro composicional.

Los primeros datos isotópicos de la Fm. Santiago Peak fueron obtenidos por Bushee et al. (1963) quienes presentan edades Plomo-alfa de 150 y 155 Ma \pm 10 de una metariolita y una metadacita, respectivamente. Krummenacher et al. (1975) presentan edades K-Ar de 121 \pm 0.5 Ma de una andesita porfirítica. Posteriormente, Anderson (1991) obtuvo edades U-Pb entre 134 y 123 Ma en rocas de la misma Formación al sur de California. En Herzig y Kimbrough (2014) se sintetizan las edades obtenidas por Herzig (1991) y nuevas edades U-Pb que varían entre 127 y 118 Ma en las montañas Santa Ana. En el mismo trabajo muestran edades ^{40}Ar - ^{39}Ar entre 120 y 110 Ma. En el área del cañón La Misión, aproximadamente 20 km al NW del área de estudio, Meeth (1993) obtuvo una edad U-Pb de 116 Ma cerca del contacto discordante de la Fm. Santiago Peak con las rocas detríticas de la Fm. Rosario del Cretácico Tardío. Esta es la edad U-Pb más joven de la Fm. Santiago Peak cerca del área de estudio

Las edades isotópicas de los plutones de CBP y de la Fm. Santiago Peak más cercanas al área de estudio se presentan en la Tabla 2. Se observa en ella que las rocas de dicha formación fechadas por el método ^{40}Ar - ^{39}Ar se encuentran en un rango entre 106.0 \pm 0.9 y 104.0 \pm 1.0 Ma en muestras de la zona El Vigía, mientras que las rocas plutónicas de Ensenada, fechadas por el método K-Ar en hornblenda varían entre 107.3 \pm 0.7 y 100.9 \pm 1.1 Ma. Este traslape sugiere que el cronómetro isotópico de las rocas más antiguas de la Fm. Santiago Peak se reinició de forma simultánea al emplazamiento de los plutones del CBP.

Tabla 2. Edades isotópicas más cercanas al área de estudio.

Unidad	Lugar	Mineral	Roca	Edad meseta	Autor	Método isotópico	Oeste	Norte
Santiago Peak (3)	Cerro El Vigía (Ensenada)	Rc	M vol	106.0 ± 0.9	A	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	535349	3524790
Santiago Peak (3)	Cerro El Vigía (Ensenada)	Pl	M vol	104.0 ± 1.0	A	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	535349	3524790
Santiago Peak (3)	Cerro El Vigía (Ensenada)	Pl	M vol	104.6 ± 3.4	A	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	535349	3524790
Rocas plutónicas (1)	Ensenada	Bt	Ton	103.4 ± 1.4	B	K-Ar	539964	3525857
Rocas plutónicas (1)	Ensenada	Hbl	Ton	100.9 ± 1.1	B	K-Ar	542325	3526760
Rocas plutónicas (1)	Ensenada	Hbl	Ton	107.3 ± 0.7	B	K-Ar	539964	3525857
Rocas plutónicas (1)	Ensenada	Hbl	Ton	106 ± 1.0	B	K-Ar*	538587	3528777
Rocas plutónicas (1)	Ensenada	Bt	Ton	106.4 ± 0.8	B	K-Ar	542325	3526760
Rocas plutónicas (2)	San Antonio de las Minas	Bt	Gr	96.5 ± 1.2	A	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	536022	3540927
Rocas plutónicas (2)	San Antonio de las Minas	Kfs	Gr	102.9 ± 0.7	A	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	536022	3540927

Abreviaturas: Min, mineral datado; Rc, roca completa; Pl, plagioclasa; Bt, biotita; Hbl, hornblenda; Kfs, feldespato potásico; M vol, metavolcánica; Ton, tonalita; Gr, granito. (1) Plutón Ensenada; (2), plutón San Antonio de las Minas; (3) rocas volcánicas. Autores: A, Ortega-Rivera, 2003; B, Krummenacher et al, 1975; * reportado por Krummenacher et al (1975) recalculada por Ortega-Rivera (2003).

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Caracterizar las unidades litológicas y deformación de la Formación Santiago Peak y plutones graníticos, ambos del Cretácico Temprano al norte de la zona urbana de Ensenada y al sur de San Antonio de Las Minas.

1.4.2 Objetivos específicos

- 1.-Efectuar una descripción estratigráfica y petrográfica de las unidades volcánicas y volcanosedimentarias de la Formación Santiago Peak y sus relaciones de contacto con los plutones del Cinturón Batolítico Peninsular en la región entre Ensenada y San Antonio de Las Minas.
- 2.-Identificar estructuras primarias de las unidades de la Formación Santiago Peak y rocas plutónicas para discriminar estructuras de deformación de origen tectónico.
- 3.- Sintetizar la información estratigráfica y estructural en un mapa y secciones estructurales con la finalidad de proponer una historia geológica de un sector del occidente del arco magmático Jurásico-Cretácico al que se asocia la Formación Santiago Peak.
- 4.-Correlacionar la litología y las estructuras mayores de las rocas mesozoicas con datos de susceptibilidad magnética y la respuesta aeromagnética de la región.
5. Ofrecer un marco geológico que sirva de referencia para el diseño de las obras civiles que se están desarrollando en la parte norte de la ciudad de Ensenada.

1.5 Hipótesis

En la región entre las localidades de Ensenada y San Antonio de las Minas aflora una secuencia de rocas volcánicas que son parte de la Fm. Santiago Peak. Estas rocas están afectadas por eventos de deformación

ocurridos entre el Mesozoico y el Cenozoico. Con base en los datos estratigráficos y estructurales se infiere la presencia de facies volcánicas distales y proximales y eventos de deformación mesozoicos.

La litología característica de arco volcánico de la Formación Santiago Peak que aflora entre Ensenada y San Antonio de Las Minas muestra estructuras primarias de las que se pueden deducir facies asociadas con volcanes compuestos y actividad volcánica subpliniana.

Capítulo 2. Metodología

Este trabajo de tesis comenzó con la elaboración de un mapa geológico base a partir del análisis de imágenes satelitales. Con base en dicho mapa se realizó el trabajo de campo consistente en la toma de datos estructurales y de susceptibilidad magnética y muestreo para análisis petrográfico de la litología cartografiada. La parte final consistió en la integración del análisis estructural, petrográfico y de datos aeromagnéticos.

2.1 Cartografía geológica

Los programas utilizados para la digitalización de la cartografía geológica fueron: QGIS, AutoCAD, Google Earth Pro, GIMP 2, Surfer 11, Global Mapper y Microsoft Paint. La base topográfica para el mapa se tomó de las cartas topográficas H11B12 (Ensenada) y H11B11 (El Sauzal de Rodríguez) del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática).

2.1.1 Análisis de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales del área de estudio fueron obtenidas de Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Seleccionando los datos del satélite Landsat 8, del 26 de julio de 2016, se obtuvo una imagen en color verdadero con las bandas 4, 3 y 2 y una imagen con las bandas 7, 4 y 3, realizando corrección atmosférica en ambas. El trabajo final se complementó con Google Earth Pro, debido a la calidad de las imágenes y la posibilidad de ver fotografías del área de estudio en diferentes fechas, lo que permite ver contrastes en las rocas debido a las variaciones en la iluminación y en la vegetación, logrando identificar lineamientos y posibles contactos litológicos con mayor resolución. Los lineamientos y curvilineamientos del área de estudio se interpretaron en una imagen a escala 1:34,600 impresa en una hoja tamaño carta, obtenida de la imagen satelital Landsat 8 y Google Earth.

2.1.1.1 Interpretación de lineamientos rectilíneos

Un lineamiento rectilíneo se define como un rasgo morfológico recto particularmente evidente en los arroyos y en manifestaciones de la vegetación. Su valor interpretativo radica en que los lineamientos de este tipo comúnmente se asocian a contactos litológicos y fallas. Los diferentes patrones de dirección de los lineamientos se analizaron dividiendo el área de estudio en cuatro sectores, a través de rosetas de lineamientos que permitieron discriminar las principales tendencias. El último análisis en los lineamientos consistió en determinar la frecuencia con que los rasgos rectilíneos se presentan en áreas de 1 km², con lo que se pudo ponderar las dimensiones de los lineamientos. Adicionalmente, se hizo el ejercicio de sobreponer a los lineamientos la localización de epicentros de la microsismicidad del área de Ensenada registrada por la RESNOM del CICESE.

2.1.1.2-Interpretación de curvilineamientos

Un curvilineamiento se definió en este trabajo como un rasgo lineal del relieve cuyo aspecto tiene una tendencia circular o elíptica vista en planta. Su mejor definición se observa en los drenajes y, en menor medida, en parteaguas. Se identificaron de manera general tres dimensiones de curvilineamientos. En primer lugar los menores de 500 m que en ocasiones se asocian a cuerpos subvolcánicos como diques, sills o *plugs*. Los segundos varían entre 500 m y 5 km y, por sus dimensiones pueden ser estructuras como lacolitos, conos volcánicos erosionados o domos volcánicos. Finalmente, los más grandes son los curvilineamientos que pueden asociarse con estructuras plutónicas como los *stocks* cuyo emplazamiento se refleja en las rocas encajonantes que se encuentran en sus bordes. Es muy frecuente que las estructuras de origen ígneo presenten discontinuidades debidas a sistemas de fallas más jóvenes.

2.1.1.3-Interpretación litológica

Para la interpretación litológica se utilizó la imagen satelital Landsat 8 y se refinó por medio de las imágenes de Google Earth. Al igual que para la interpretación de lineamientos, se tomaron en cuenta rasgos geomorfológicos debido a que las rocas presentan diferentes formas como respuesta a los efectos del intemperismo. Por ejemplo, el tipo de mineralogía y su tamaño influyen en el modo que las rocas

responden a los agentes erosivos y geoquímicos. El color del suelo también es útil para discriminar la litología pues la reflectividad está en función de la composición química y textura de los minerales. Por ejemplo, las tonalidades rojas, ocre oscuro, marrón y violácea, se interpretan como resultado de la oxidación de los minerales ricos en Fe, que se asocian a rocas ígneas volcánicas intermedias como la andesita o dacita. Las tonalidades gris claro se asocian con posibles rocas detríticas ricas en cuarzo y feldespato, como las areniscas.

2.2 Trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó en el Libramiento Ensenada donde se tienen afloramientos en los cortes carreteros, así como en áreas cercanas al poblado San Antonio de la Minas. Se realizaron 20 salidas al campo entre los meses de octubre y noviembre de 2016 y enero a marzo de 2017. Los rasgos de planos y líneas estructurales como las fallas y estrías, respectivamente, se midieron con brújula tipo Brunton y una aplicación de Smartphone denominada Fieldmove Clino (Allmendinger, 2016). En la medición con ambos instrumentos se aplicó la regla de la mano derecha. Con este procedimiento se obtuvieron datos de estratificación de rocas volcanoclásticas y sedimentarias. Se midieron planos de cizalla obteniendo datos de rumbo, echado, *rake*, *pitch* y *trend*. Datos de foliación mineral, magmática y eutaxítica, en la fábrica de rocas ígneas intrusivas y metamórficas.

La medición de la susceptibilidad magnética se efectuó en el tramo del Libramiento Ensenada a partir del arroyo Cuatro Milpas hasta el sur de la Cañón La Cascada con el instrumento portátil KT-10 Plus S/C (Terraplus Inc). Se realizaron 10 mediciones como mínimo en cada uno de los 30 sitios elegidos. Para la localización de los sitios de medición se utilizó un GPS portátil y en el caso de la aplicación Fieldmove se utilizó el sistema de GPS que posee el celular (Samsung Gran prime 10).

2.3 Análisis estructural

El análisis estructural consiste en la descripción de las estructuras, así como las relaciones de corte entre las capas y las fallas. Los datos obtenidos en el campo, se capturaron en el software Stereonet (Allmendinger et al., 2013) con el que se pudieron analizar los planos y líneas en estereogramas.

Con los datos de estratificación, fallas y cizallas obtenidos en el campo se procedió a realizar secciones estructurales. Para realizar las secciones estructurales se usó un modelo de elevación digital DEM (por sus siglas en inglés: Digital Elevation Model) de la página del INEGI, y posteriormente en un GIS se realizó un perfil en donde se plasmaron los datos.

2.4 Petrografía

Se obtuvieron 40 muestras representativas de las unidades de roca para su análisis petrográfico, así como de algunas unidades difíciles de clasificar en el campo por su tamaño de grano pequeño. La elaboración de las láminas delgadas se hizo en el Laboratorio de Preparación de Muestras y Separación de Minerales (PMSM) de la División de Ciencias de la Tierra (DCT) del CICESE, siguiendo el criterio de Rendón (1991). Las láminas delgadas obtenidas fueron analizadas con un microscopio petrográfico OLYMPUS® BX60 en el Laboratorio de Petrografía de la DCT. Para muestras holocristalinas se determinó la composición modal, granularidad, forma de los cristales y características texturales siguiendo los criterios de Mackenzie et al. (1982). La moda se determinó con un conteo de 363 puntos sobre una rejilla de 1.1 x 3.3mm. Con la composición modal se clasificaron las rocas en el diagrama QAP para rocas ígneas intrusivas (Le Maitre, 2002). Para las rocas con textura hipocristalinas se realizó una breve descripción de contenido de cristales y matriz. Para las rocas volcánicas, se utilizó el diagrama de Schmidt (1981, en Le Maitre, 2002). Para la identificación del feldespatos potásico en algunas láminas, se tiñó parte de la galleta con la que se obtuvo la lámina delgada con cobaltinitrito de sodio.

2.5 Datos de susceptibilidad y aeromagnetometría

2.5.1 Datos de susceptibilidad magnética

Los datos de susceptibilidad magnética obtenidos en cada estación en campo fueron promediados y después comparados con los datos aeromagnéticos del mapa de Norteamérica. Se realizó un histograma para observar las diferencias de susceptibilidad magnética en diferentes rocas.

2.5.2 Datos de aeromagnetometría.

Los datos de aeromagnetometría fueron obtenidos de la base de rejillas de datos digitales de anomalía magnética de Norteamérica, que es una recopilación de datos de magnetometría aérea y marina de tres instituciones, siendo el USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos por sus siglas en inglés), CGS (Servicio Geológico de Canadá, por sus siglas en inglés) y Consejo de Recursos Minerales (ahora Servicio Geológico Mexicano, SGM). Los datos son de acceso público a través de la liga del USGS (<https://mrdata.usgs.gov/magnetic/>), mayor detalle acerca de la forma de obtención y procesado de estos datos es explicado en el enlace anterior y en Bankey, et al, 2002; Ravat et al, 2002; Maus et al, 2002. Estos datos son presentados en una rejilla rectangular con separación entre nodos de 1 km, con el efecto del campo magnético de la tierra removido, continuados a una altura constante de ~300 m y anomalías con longitudes de onda mayores a 500 km removidas. Las especificaciones de la proyección de la rejilla de datos son las siguientes: Proyección Conforme Cónica de Lambert; Meridiano Central 117°W; Datum horizontal NAD27; Elipsoide Clarke 1866.

Para propósito de su análisis e interpretación, a los datos del área de estudio y sus alrededores, se les redujo al polo y se les aplicaron los filtros de gradiente horizontal y señal analítica utilizando el software Oasis Montaj. Estos procesos permiten eliminar el efecto de inclinación magnética y separar anomalías magnéticas de diferentes longitudes de onda.

Los datos se presentan en la proyección UTM zona 11 (Meridiano Central 117°) con elipsoide WGS84 y coordenada geográficas o geodésicas. Cabe mencionar que se cubrió un área mayor que la zona de estudio para visualizar las posibles relaciones de las anomalías magnéticas del área de estudio con los rasgos magnéticos regionales. Posteriormente, se reconocieron visualmente alineaciones magnéticas, constituidas por zonas de intenso gradiente y series de dipolos magnéticos, del mapa de anomalías magnéticas y de los de gradiente horizontal y señal analítica, que conforman tendencias rectilíneas. Finalmente, para su interpretación cualitativa, los lineamientos magnéticos inferidos del conjunto de mapas, se correlacionaron con rasgos litológicos y estructurales con el programa Global Mapper 18.

En este estudio se realizó una interpretación cualitativa de los mapas obtenidos de los datos aeromagnéticos que, de acuerdo Hinze et al. (2012), el enfoque implica clasificar las anomalías residuales en formato de contornos o de imágenes en términos de variaciones en: (1) amplitudes que reflejan la distribución de los cambios de magnetización asociados con variaciones litológicas y estructurales; (2) longitudes de onda, principalmente para discriminar los efectos del número de onda alta del cuerpo más

superficial de los efectos de fuente más profunda y de bajo nivel de onda, pero que también pueden incluir cambios de textura en la distribución de rocas de polarización magnética variable; (3) gradientes pronunciados que mapean contactos geológicos, lineamientos, fallas y otros límites geológicos; y (4) tendencias direccionales que distinguen el rumbo de unidades y estructuras geológicas. En este enfoque simplificado, es necesario tener cuidado al separar las anomalías negativas causadas por el efecto de fondo de una fuente de magnetización positiva de los mínimos asociados con la polarización magnética negativa que contrasta con las rocas circundantes.

Capítulo 3. Litología del área de estudio

Con relación al Cinturón Batolítico Peninsular (CBP), la litología observada en el área de estudio se puede separar de manera general en tres grupos: rocas prebatolíticas, rocas plutónicas del CBP y depósitos posbatolíticos. El rango de edades de las unidades varía desde el Cretácico Temprano hasta el Mioceno Medio, según se sintetiza en la columna estratigráfica de la Figura 6.

3.1 Rocas prebatolíticas.

En este grupo se encuentran las rocas volcánicas, volcanoclásticas y subvolcánicas que son parte de la secuencia de arco de la Formación Santiago Peak. En el área de estudio afloran ocho unidades, las cuales se identificaron inicialmente a partir de imágenes satelitales y que posteriormente fueron verificadas en campo. Las rocas volcánicas se clasificaron como andesita, basalto andesítico, dacita y, en menor volumen, riolita. Las rocas volcanoclásticas comprenden desde tobas a brechas piroclásticas. En la zona sur del área de estudio predominan los derrames de lava y auto brechas de composición andesítica, mientras que en la parte norte abundan los depósitos volcanoclásticos de posible composición andesítica-dacítica, cortados por diques, sills y lacolitos de composición andesítica (Figuras 6 y 7). Todas estas unidades están metamorfozadas en la facies de esquistos verdes baja y las rocas que se encuentran en contacto con el plutón Ensenada (pE), de manera selectiva alcanzan las facies de esquistos y hornfels cuarzofeldespáticos.

3.1.1. Tobas, ignimbritas y lavas andesíticas (Unidad Kan)

Esta unidad se observó en la carretera Tecate-Ensenada al sur de San Antonio de las Minas (SAM). En la imagen satelital se interpreta que la serranía que bordea el sur de SAM está compuesta por esta unidad. En el área norte de la ciudad de Ensenada aflora desde el Cañón La Cascada hasta el borde oriental de la zona de estudio (Figura 7).

En el área de la carretera Tecate-Ensenada al sur del SAM, dicha unidad se conforma principalmente por tobas soldadas de color ocre-verde con estratificación delgada entre 5 y 15 cm, intensamente

Columna estratigráfica compuesta

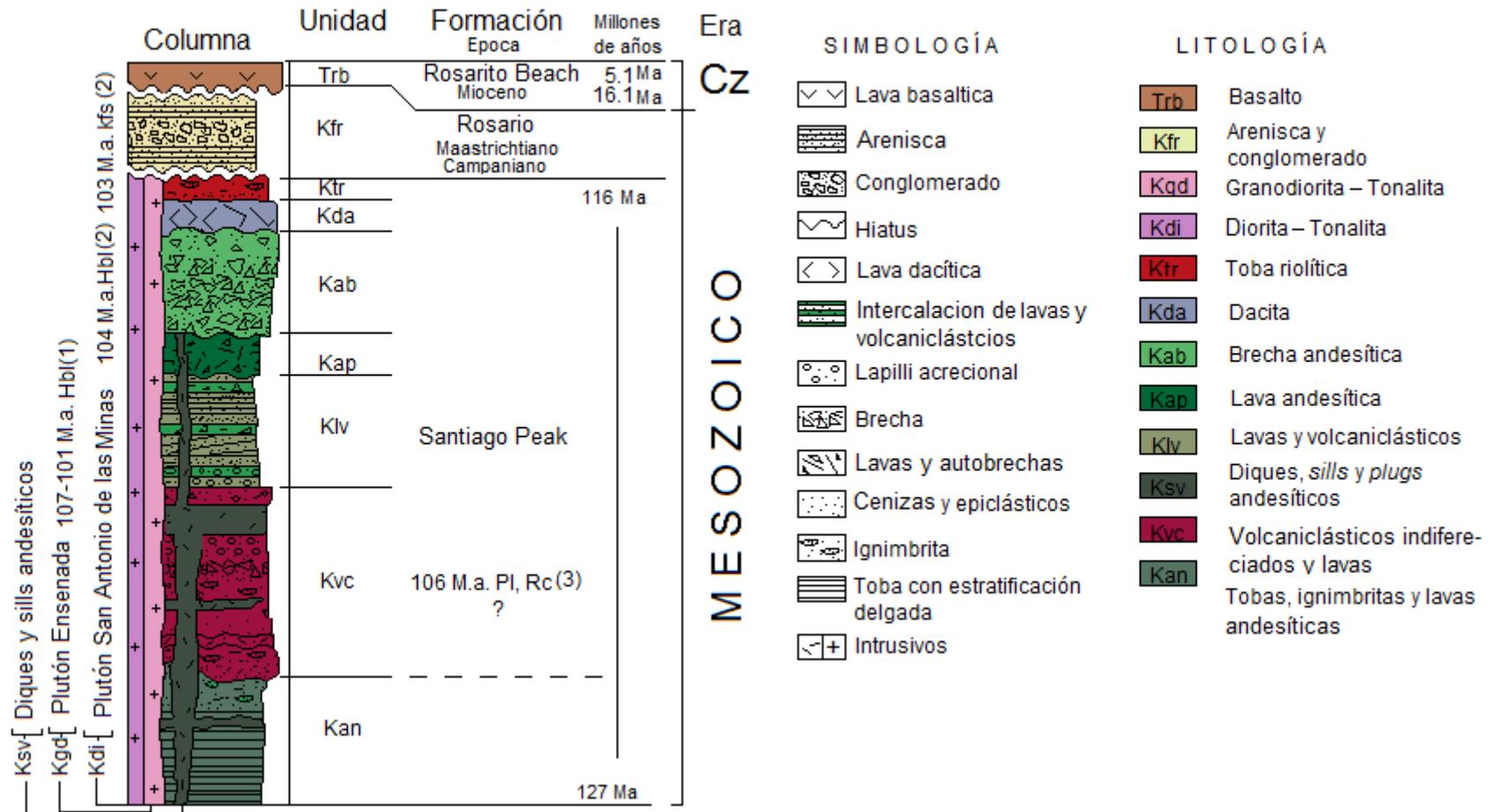


Figura 6. Columna estratigráfica compuesta del área de estudio. Cz: Cenozoico. Las edades isotópicas de los plutones Ensenada (1) y San Antonio de las Minas (2) y la edad de la unidad Kvc (3) son las que se muestran en la Tabla 2. El límite inferior de la Fm. Santiago Peak se tomó con base en edades U-Pb en zircones de Herzig y Kimbrough (2014) y el superior de Meeth (1993). Las edades de la Fm. Rosario (Kfr) son con base en nanofósiles y macrofósiles obtenidas por Kenneth (1982) y las de la Fm. Rosarito Beach (Trb) son de K-Ar de Gastil et al. (1975).

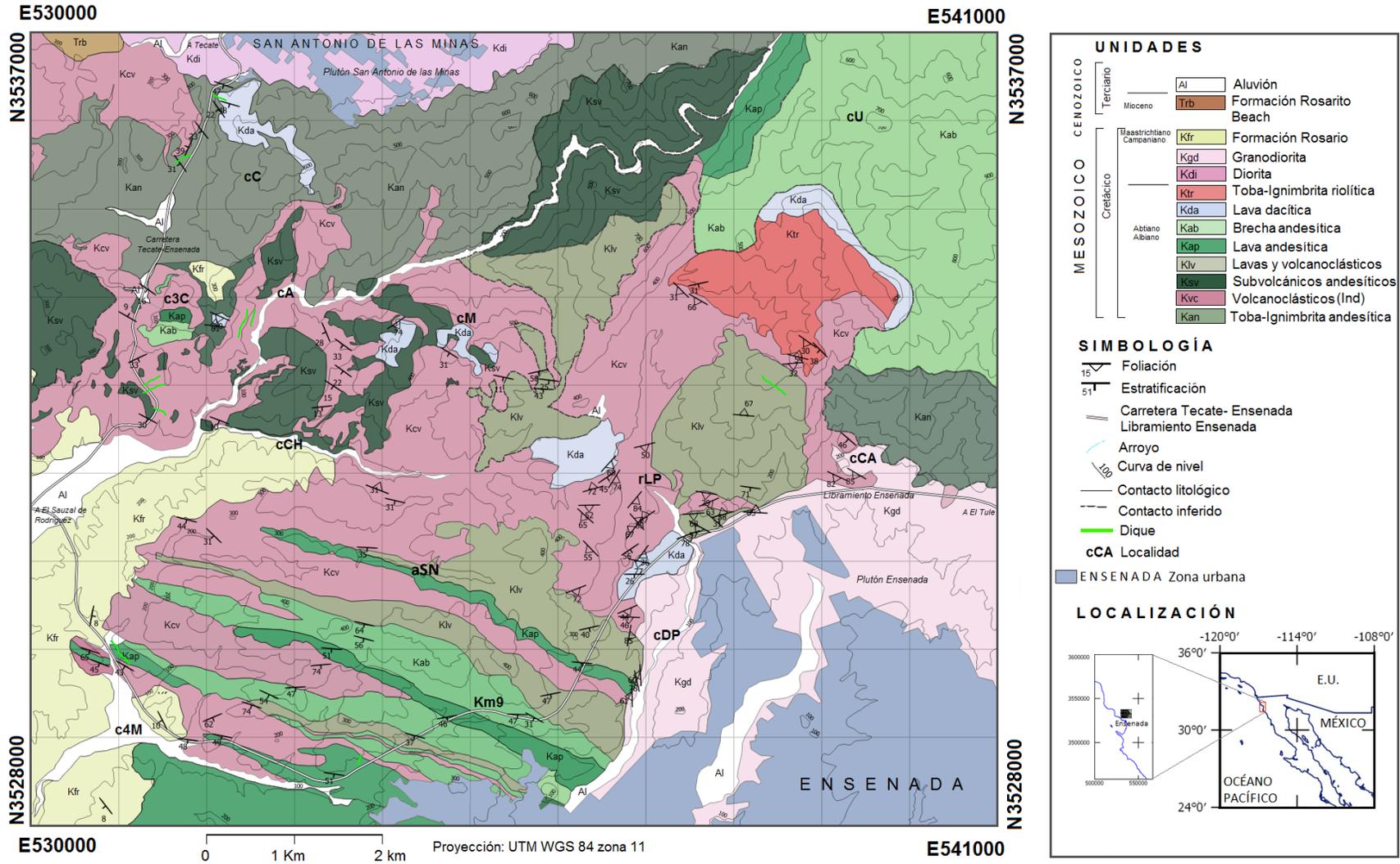


Figura 7. Mapa geológico de la zona de estudio. Las abreviaturas significan: cC, cerro Cantil; c3C, cerro Tres Cuchillas; cA, cañón Arce; cCH, cañada Chavira; cM, cerro Miracielo; aSN, arroyo sin nombre; c4M, cañón Cuatro Milpas; Km9, kilómetro 9; rLP, rancho Los Pinales; cDP, cañón Doña Petra; cCA, cañón La Cascada; cU, cerro de Ulloa; Ind, indiferenciado.

fracturadas, no se distinguen fragmentos líticos y fenocristales (Figura 8a). En el oriente de la parte central de la zona de estudio, la litología está compuesta por ignimbritas soldadas con fragmentos líticos <1 cm y litofisas de 0.25 a 1.5 cm. También se observan lavas andesíticas afaníticas de color negro. Es común observar silicificación y pirita diseminada por alteración hidrotermal cerca de los contactos entre la unidad Kan y la granodiorita de la unidad Kgd.

La posición estratigráfica de Kan se interpreta a partir de imágenes satelitales en donde aparecen por debajo de la unidad Kvc, la cual cambia de rumbo y echado de estratificación al sur del pSAM (plutón San Antonio de las Minas). Al norte del plutón Ensenada Kan y Kvc son concordantes. Al sur de SAM, esta unidad está intrusionada por una brecha posiblemente de la unidad Kda de color gris oscuro, diques, así como sills andesíticos de la unidad Ksv (Figura 8a).

A partir de las observaciones de campo, se infiere que el ambiente de depósito de las tobas tiene correspondencia con facies proximales hasta distales en ambiente subacuático pues, según las descripciones de Yamada (1984), las principales características de los depósitos de este ambiente son el adelgazamiento de las capas más lejanas de la fuente y la ausencia de clastos gruesos, además de una mejor laminación y clasificación. De la presencia de litofisas en las ignimbritas se definen facies proximales a los depósitos del norte del plutón Ensenada.

3.1.2 Rocas volcánicas y lavas (Unidad Kvc)

La unidad Kvc aflora en la parte central y noroeste del área de estudio. Es una secuencia volcánicoclástica generalmente de color morado que tiene tonalidades rosa, rosa grisáceo, marrón o gris azulado. Está compuesta por tobas líticas soldadas, lapillis acrecionales, brechas piroclásticas, brechas tobáceas, lavas, ignimbritas alteradas y, en la zona en contacto con el plutón Ensenada (pE), por esquistos y hornfels cuarzo feldespáticos.

En el área del cañón Cuatro Milpas las ignimbritas, cuyo porcentaje de líticos y cristales es <10%, están fuertemente silicificadas con epidota en vetillas. En la zona centro del cañón Cuatro Milpas se observó una secuencia de brechas de color marrón con fragmentos de tamaño promedio de 6 cm y bloques hasta de 35 cm, con un porcentaje de líticos y fenocristales de 15-20%. En las inmediaciones del Km 9 del Libramiento Ensenada aflora una secuencia de color morado de brechas con fragmentos que, en general, promedian 5 cm en una matriz arcillosa con epidota nodular producto de alteración hidrotermal (Figura

8b). Hacia el noreste del cañón Cuatro Milpas, sobre el Libramiento Ensenada, se observa una secuencia con apariencia ignimbrítica lítica con fuerte silicificación que se encuentra en contacto por falla con la brecha andesítica (Kab) con fragmentos desde 30 cm y el porcentaje de matriz es de ~25%. En la carretera Tecate-Ensenada, al suroeste del cerro Tres Cuchillas se observó una toba lítica con clastos menores a 5 cm y matriz en ~80%. En la cima de ese lugar una secuencia de brecha piroclástica muestra fragmentos de hasta 40 cm de longitud y ~20% de matriz. Hacia el norte se observa la intercalación de piroclastos con escasas lavas autobrechadas con vesículas de entre 2 y 8 cm de diámetro (Figura 8d). En el área del cerro Tres Cuchillas, cañón Arce y cañón Chavira la mayor potencia de la unidad de volcániclasticos (Kvc), donde se distinguen intercalaciones de brechas, tobas lapilli, tobas líticas, todas ellas soldadas rítmicamente en estratos de 0.4 a 0.5 m y un porcentaje de fragmentos líticos varía desde 5 a 35%. Los fenocristales se concentran en una proporción del orden del 2 al 5%. Pueden estar interestratificadas con lavas autobrechadas con espesores de 0.3 m en promedio entre los estratos volcániclasticos (Figura 10a). En algunas partes se distinguen sills andesíticos de la unidad Ksv atravesando estas rocas (Figura 8f). Al norte del cañón Chavira, se observan tobas soldadas con fragmentos angulosos menores a 1.5 cm de color verde con silicificación o argilitización en aproximadamente 6 al 4% de su volumen. Al sur del rancho Los Pinales brechas tobáceas cristalinas están posiblemente sobreyacidas por tobas con lapilli acrecional <1.5 cm y con 55% de matriz fuertemente alterada a epidota y, en menor medida, con precipitación de especularita (?) en cristales que rellenan las fracturas. Esta secuencia de tobas con lapilli acrecional aflora en los cerros Miracielo y Tres Cuchillas. Al sur del plutón San Antonio de Las Minas se diferencia la unidad Kvc de las intercalaciones de tobas andesíticas de la unidad Kan por el cambio en el rumbo de las capas. Al sur del Cañón La Cascada, la unidad Kvc está en contacto con el pE, en donde se observa gradualmente la recristalización con una textura foliada gris oscura con lentes de cuarzo blanco menores de 1.5 cm de longitud y <0.5 cm de espesor cambiando a una textura bandeada granular del tamaño de arenas y conglomerado elongados entre 2 y 5 cm (Figura 8c). La mineralogía está formada por cuarzo gris con vetillas de cuarzo blanco que presentan crenulación, los minerales que se observan en menor proporción son muscovita, biotita y magnetita. Al oeste del cañón Doña Petra las rocas también están afectadas por el plutón Ensenada formando texturas bandeadas desarrollando foliación con delgados lentes de cuarzo (<1 mm de espesor), fragmentos líticos elongados <2 cm de espesor y magnetita amorfa <1.5 cm. Son comunes las vetillas de cuarzo con menor cantidad óxidos debidas a hidrofracturamiento.

La unidad Kvc sobreyace discordantemente a la unidad andesítica Kan al sur del Plutón San Antonio de Las Minas. Es atravesado por diques y sill de la unidad Ksv que se observan a lo largo de la carretera Tecate-Ensenada (Figuras 7d,e y f), en el área del norte del Libramiento Ensenada se puede observar que esta

unidad está en pantallas hasta de 4.5 m de diámetro y atravesada por diques de 0.5 m del pE, (Figura 8e y f).

La unidad Kvc se puede asociar a facies volcánicas proximales pues la presencia de lapillis acrecionales son indicativas de condiciones freatomagmáticas o de humedad durante las explosiones volcánicas (Brown et al., 2010). También las secuencias de brechas piroclásticas y derrames de lavas delgados se pueden asociar a facies proximales. Se estima que las rocas de esta unidad cubren aproximadamente 23.5 km² en el área de estudio, con un espesor calculado en el cañón Arce de 205 m desde la base del cerro Tres Cuchillas hasta su cima.

3.1.3 Lavas y depósitos volcaniclásticos (Unidad Klv)

La unidad Klv se encuentra al noreste del cañón Cuatro Milpas, entre el cerro Miracielo, cañón Doña Petra y norte del plutón Ensenada. En el área norte del cañón Cuatro Milpas está formada por derrames finos de 2 a 5 cm intercalados con depósitos volcaniclásticos de tobas cristalinas con <5% de fenocristales y litarenitas volcánicas (areniscas volcánicas), de colores gris oscuro a gris claro cuando está intemperizada (Figura 8g), en estas rocas se observó estratificación cruzada de láminas y estratos delgados de <5 cm antes del W del Km 9 del Libramiento Ensenada.

En el cerro Miracielo se observan afloramientos de litarenitas volcánicas que pueden contener lapilli acrecional y tobas fuertemente soldadas con texturas brechadas que contienen fragmentos líticos en su matriz menores de 2 mm y una matriz cuyo volumen varía entre 70 y 98%. Todas estas unidades están intercaladas en estratos de 0.3 a 4.0 m de espesor. Estas rocas están afectadas por alteración hidrotermal manifiesta por fuerte silicificación. Al este del rancho Los Pinales se observa una secuencia de litarenitas volcánicas de color negro con alteración de epidota formando nódulos de hasta 15 cm de diámetro. Al norte del plutón Ensenada, sobre el Libramiento Ensenada, afloran derrames de lavas andesíticas afaníticas verde gris oscuro con fragmentos elongados alterados por epidota, posiblemente autobrechadas (fragmentos juveniles de la misma lava) y tobas soldadas (clastos accesorios o regionales) de color ocre-verde. Estas lavas se encuentran en capas de 0.25 a 0.35 m de espesor. Estratigráficamente están debajo de ignimbritas líticas que presentan fragmentos de rocas volcánicas de ~40 cm cerca del cañón Doña Petra. Estas dos últimas litologías (lavas e ignimbritas líticas), están intrusionadas por el pE que, en consecuencia puede producir metamorfismo de contacto. Localmente están plegadas con echados casi verticales (71° en promedio).

La unidad Klv sobreyace a la unidad de depósitos volcánico-lávicos y lavas (Kvc) y está cubierta por las lavas andesíticas de la unidad Kap. Su espesor no se puede estimar con certeza. Esta unidad se considera de carácter heterogéneo debido a la presencia de lapilli acrecional que se asocia con volcanismo freatomagmático, a lavas delgadas y a depósitos de litarenitas volcánicas con y sin trabajo por agua. Se considera que se asocia con facies proximales cercas a las centrales.

3.1.4. Lavas andesíticas (Unidad Kap)

Estas unidades lávicas se ubican principalmente en la zona del cañón Cuatro Milpas y norte del Km 9 del LE. Se componen de lavas andesíticas masivas de textura porfídica de color verde oscuro y ocre-naranja cuando están intemperizadas. En el área del cañón Cuatro Milpas presenta litofacies de lavas autobrechadas de color verde a verde ocre con fragmentos menores de 15 cm y lavas porfídicas (Figura 8h). Al noreste del Km 9 contiene esferulitas de < 3 mm de diámetro y fenocristales de plagioclasa. En la zona noreste del área de estudio entre el cañón Doña Petra y el cerro de Ulloa se distinguen derrames aislados de lava basáltico-andesítica de color negro y textura afanítica.

Se infiere que es discordante con respecto a Kan y, en el área del cañón Cuatro Milpas, le subyace una secuencia de brechas de la unidad Kvc. Al norte del km 4 del Libramiento Ensenada, una capa concordante de brechas de 50 m de espesor está intrusionada por diques andesíticos de la unidad Ksv en el oeste del cañón Cuatro Milpas.

3.1.5. Rocas subvolcánicas (Unidad Ksv)

La unidad Ksv aflora entre el sur de San Antonio de las Minas, el este del LE y la carretera Tecate-Ensenada. Está compuesta por diques, sills y se infiere que que hacia el oriente los cuerpos son más grandes y se parecen a lacolitos, todos ellos de composición andesítica (Figura 8d,e y f,). Las unidades subvolcánicas son de color verde, verde gris oscuro y, debido al intemperismo, varía a ocre-naranja. Su textura es afanítica y en ocasiones porfirítica. El espesor de los diques varía de 0.3 m a 15 m, mientras que en los sills varía desde 20 cm en la carretera Tecate-Ensenada, a espesores de >100 m, como en el sill del norte del cerro Tres Cuchillas (Figura 10d). Los cuerpos mayores identificados en imágenes satelitales

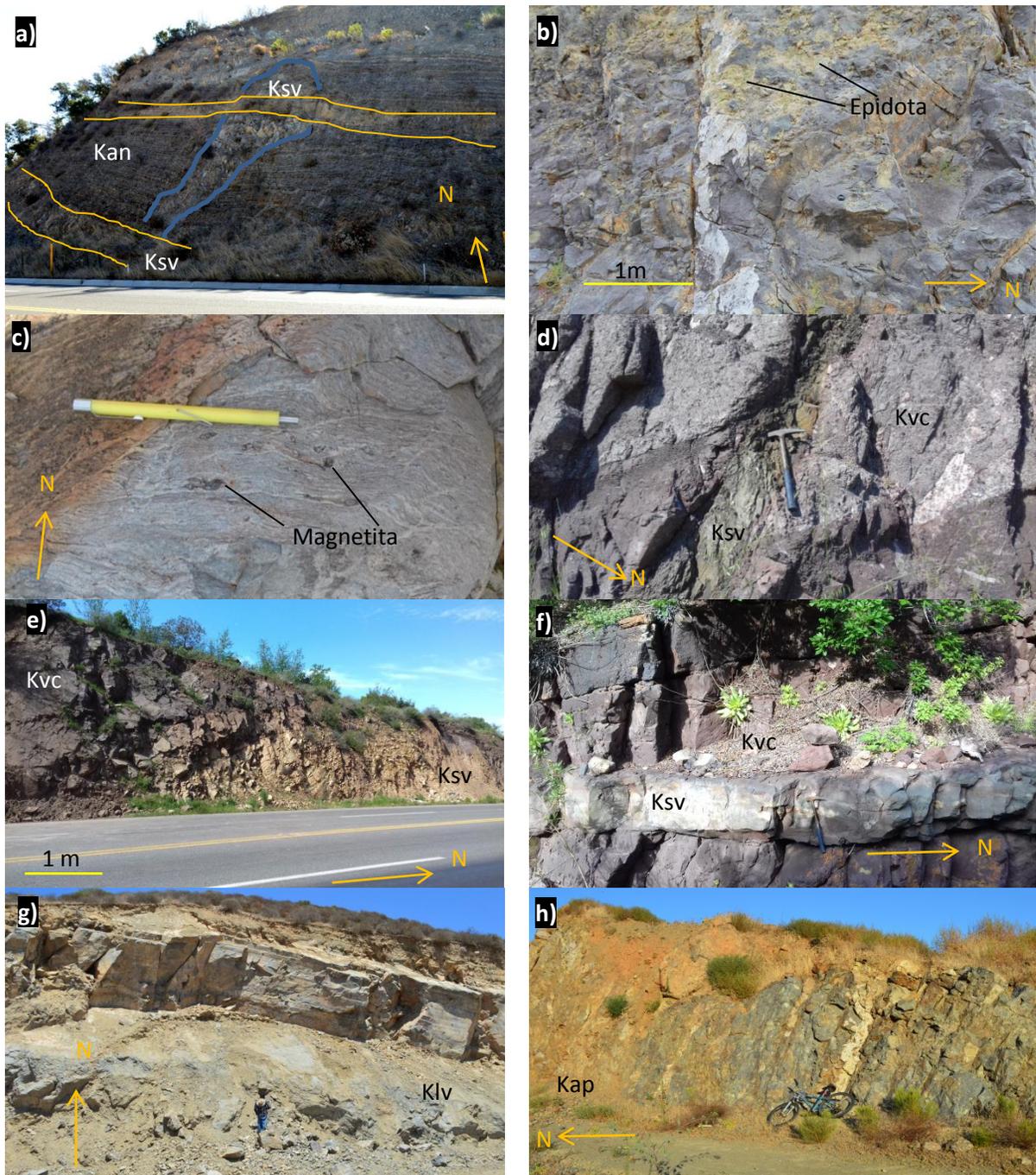


Figura 8. Litología característica en afloramientos. a) El dique en líneas azules y los sills en líneas naranja cortan la unidad Kan al sur de San Antonio de las Minas; b) unidad Kvc al noreste del cañón Cuatro Milpas; c) roca encajonante (Kvc metamorfizada) del plutón Ensenada al sur del cañón la Cascada; d) dique andesítico de la unidad Ksv en la carretera Tecate-Ensenada al sur del cerro Tres Cuchillas; e) dique andesítico al oeste del cerro Tres Cuchillas; f) sill en la unidad Kvc al este de la cañada Chavira; g) estratos de la unidad Klv al norte del Km 9 del Libramiento Ensenada; h) lava andesítica de la unidad Kap al este del cañón Cuatro Milpas.

prestan tamaños mayores a 1 km² y menores a 5 km². El rumbo de los diques observados en el área del cañón Cuatro Milpas y Libramiento Ensenada es NW-SE y sus echados verticales. En el área de la carretera Tecate-Ensenada los diques se orientan NE-SW, son verticales en el área de sur del Cerro Tres Cuchillas y casi concordantes con las rocas volcánicas por sus echados de bajo ángulo al sur de SAM. Los sills se observan de mayor espesor hacia el norte y se adelgazan hacia al SW, también se observa que los sills cortan a diques de la misma unidad (Figura 9a). En la carretera Tecate-Ensenada los diques intrusionan a las unidades Kan y Kvc.

Este tipo de cuerpos de la parte norte se asocian con facies proximales y centrales y son más frecuentes que en la parte sur.

3.1.6 Brechas andesíticas (Unidad Kab)

Esta unidad volcánica aflora en las inmediaciones del Km 9 del LE, al suroeste del cerro de Ulloa y sur del cerro Tres Cuchillas. De manera general son brechas piroclásticas masivas con un tamaño de clastos entre 16 y 0.5 cm de andesita de color negro y dacita de color rojo en menor cantidad. La matriz contiene cristales de plagioclasa de <2mm, es verde gris oscuro a claro y varía en volumen de 30 a 55%.

En el área del Km 9 se observan brechas andesíticas gris verdoso oscuro con fragmentos de andesita color negro, verde y rosa-gris menores a 10 cm. Los clastos están orientados por el flujo, la matriz representa el 55% del volumen total. En el área del cerro de Ulloa afloran brechas con silicificación intensa compuesta por una matriz fina de color verde claro y fragmentos angulosos de lava de color negro menores a 16 cm y cristales de plagioclasa menores a 2 mm en una matriz que alcanza el 30% (Figura 9c). En algunas partes la matriz puede estar compuesta por lapilli soldado. En el área del cerro Tres Cuchillas, las brechas tienen una matriz gruesa de lapilli y clastos de andesita de color negro y rojo. Se observan fenocristales de cuarzo <4 mm posiblemente de origen hidrotermal. Prácticamente todas las brechas son masivas.

En el Libramiento Ensenada la unidad Kab está pseudoestratificada, sobreyaciendo a la secuencia volcanoclástica Kvc e infrayacida por las lavas y volcanoclásticos de Klv al norte del Km 9. En el Cerro Tres Cuchillas le sobryace la unidad Kvc donde se infiere que está en contacto por falla. En el cerro de Ulloa

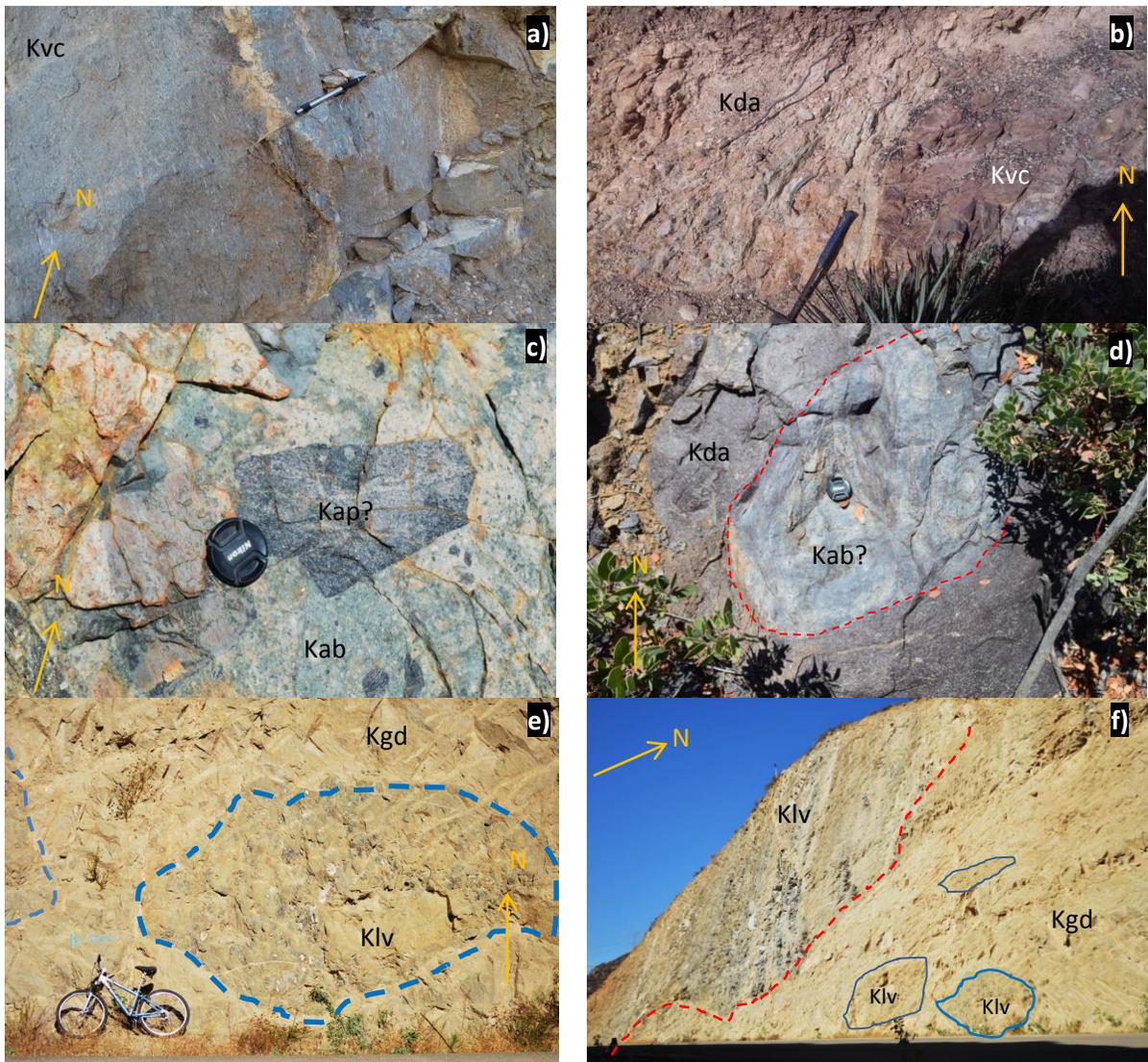


Figura 9. a) Roca encajonante al norte del plutón Ensenada con foliación perpendicular al lapicero en el norte del Libramiento Ensenada; b) dique dacítico cortando a la unidad Kvc en el cerro Miracielo; c) detalle de la unidad Kab al sur del cerro de Ulloa; d) bloque de la unidad Kab rodeado por lava de la unidad Kda al suroeste del cerro de Ulloa; e) relicto de la unidad Kvc dentro del plutón Ensenada al norte del mismo plutón; f) relicto en línea discontinua de la Figura 6e suspendido en la masa granodiorítica (Kgd). Las rocas volcánicas de la unidad Kvc encima de la unidad Kgd muestran estratificación vertical.

se infiere que sobreyace a las unidades de tobas e ignimbritas de Kan y a las lavas andesíticas de Kap, donde está subyacida por las unidades dacíticas Kda y tobáceas de Krt.

Se interpreta que cerca del Km 9 y el cerro de Ulloa las brechas son una secuencia piroclástica andesítica que se asocia a un evento explosivo, aunque incluye fragmentos de la unidad Kap por efecto de erosión. Se consideran depósitos de facies proximales.

3.1.7 Lavas dacíticas (Unidad Kda)

Esta unidad aflora en las cimas y los flancos de los cerros Miracielo, de Ulloa, Cantil y al sur del rancho Los Pinales. Se compone de lavas porfídicas y afaníticas de color gris oscuro y café. Los fenocristales de 1 a 4 mm son de plagioclasa y cuarzo.

Al sur del rancho Los Pinales las lavas tienen una textura afanítica con bandeamiento de flujo. En el cerro de Ulloa las lavas son porfídicas y están autobrechadas y se observan bloques integrados de la unidad de brechas andesíticas Kab de hasta 1 m de ancho (Figura 9d). Al sur de San Antonio de las Minas, afloran lavas con alteración hidrotermal, textura fluidal con fenocristales de cuarzo de tamaño <4 mm y plagioclasa en menor cantidad. Estratigráficamente la unidad Kda corta en forma de diques y domos a la unidad volcánicoclástica Kvc en el cerro Miracielo (Figura 9b). Al suroeste del cerro de Ulloa las lavas sobreyacen a la unidad de brechas andesíticas Kab y está infrayacida por tobas riolíticas e ignimbrita de la unidad Krt.

El espesor de la unidad dacítica Kda se estima tentativamente que varía entre 70 y 100 m en el suroeste del cerro de Ulloa. Se considera que esta unidad representa los restos de domos y cuellos volcánicos de facies volcánicas centrales.

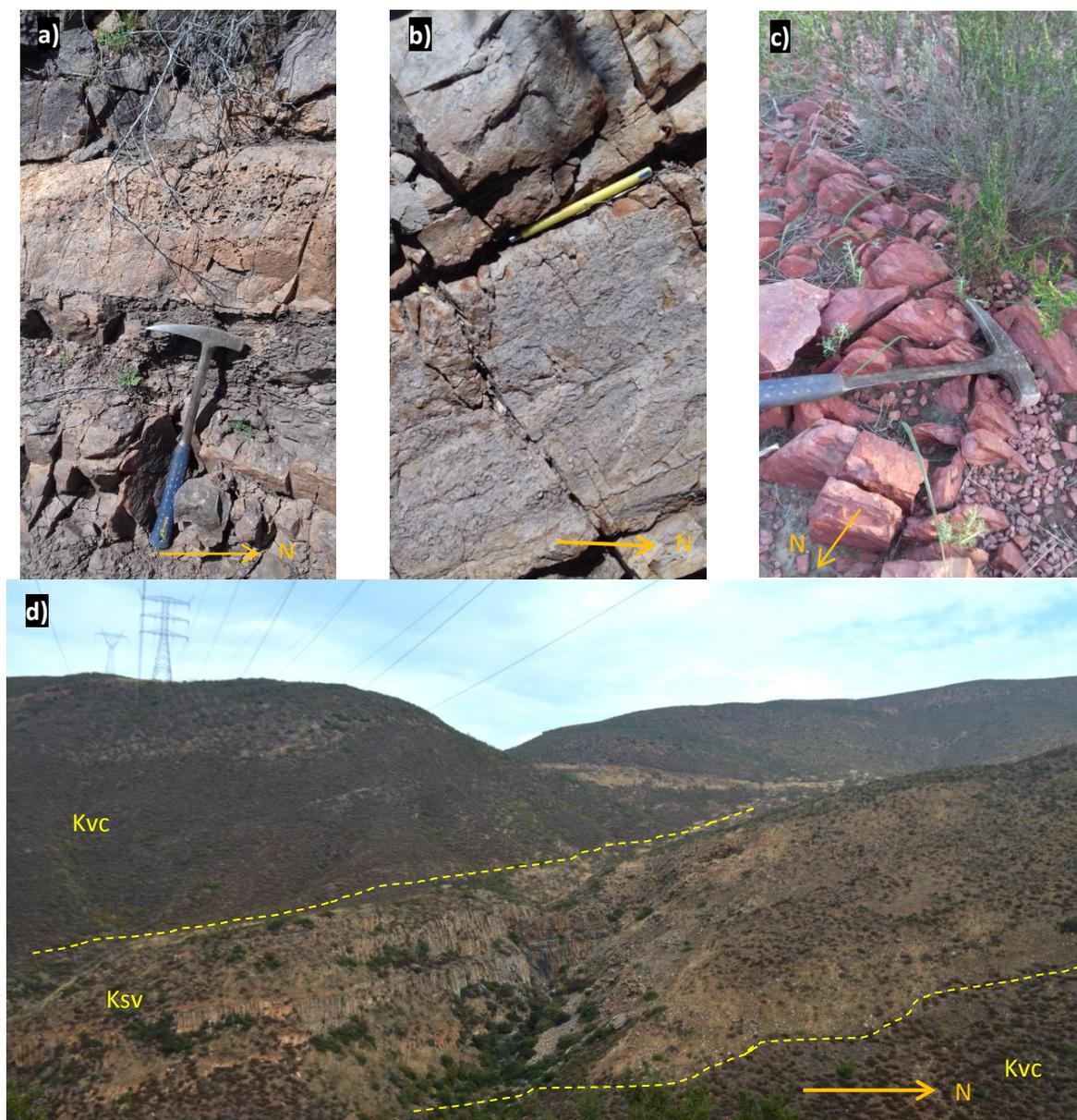


Figura.10 Litología característica en afloramientos. a) Depósitos volcániclasticos y capa de lava vesicular de la unidad Kvc al norte de la cañada Chavira; b) capas de lapilli acrecional; c) tobas riolíticas de la unidad Krt al noreste del rancho Los Pinales; d) andesita de la unidad Ksv con estructura columnar de la unidad Ksv en el cañón Arce.

3.1.8 Volcaniclasticas riolíticas (Unidad Krt)

De la unidad Krt se observó un solo afloramiento de 2.5 km² al NE del rancho Los Pinales. La unidad está compuesta por tobas principalmente e ignimbritas de posible composición riolítica, cuyo porcentaje de líticos es <10% (Figura 9c).

Las ignimbritas son rojo oscuro con fiammes de 2 cm de longitud, mientras que las tobas presentan una variedad de texturas que van desde laminación delgada de 4 mm a estratos cuasi masivos compuestos por tobas soldadas con fragmentos líticos escasos <5 mm.

En el área de estudio, esta unidad se considera la cima de la Formación Santiago Peak. Al norte del rancho Los Pinales está en contacto por falla transcurrente con rocas de la unidad Kvc, mientras que al noreste del mismo rancho se infiere que sobreyacen a las capas de la misma unidad Kvc. Esta unidad puede representar fases distales debido a que se interpreta que las tobas riolíticas se asocian a un depósito de caída.

3.2 Secuencia plutónica Cretácica

El segundo grupo litológico corresponde a granitoides de la secuencia plutónica cretácica de Cinturón Batolítico Peninsular. En la zona de estudio está representado por el plutón Ensenada (pE) y el plutón San Antonio de las Minas (pSAM).

3.2.1. Plutón San Antonio de las Minas (Unidad Kdi)

El plutón San Antonio de las Minas se ubica en la parte NW del área de estudio, en el poblado del mismo nombre. Se observa argilitización selectiva que le imprime un color naranja a ocre pálido. Se distinguen a simple vista plagioclasa, hornblenda, magnetita y clorita. Se obtuvo una sola muestra para análisis petrográfico clasificándose como diorita. El plutón San Antonio de las Minas tiene una extensión en la zona de estudio de aproximadamente 4 km².

3.2.2. Plutón Ensenada (Unidad Kgd)

El plutón Ensenada se localiza al SE de la zona de estudio. Se distinguen a simple vista minerales de cuarzo, hornblenda y biotita y el feldespatos potásico es visible con tinción de cobalnitrito de potasio. En el plutón Ensenada se observa argilitización selectiva que le imprime un color ocre pálido. Se obtuvieron tres muestras que petrográficamente se clasificaron como granodiorita y tonalita (muestras EN-8-X-16 y EN-7-III-17, respectivamente, Tabla 3), se observan enclaves de posible composición diorítica

En el área de estudio el plutón Ensenada tiene un área de afloramiento aproximada de 14 km². El plutón Ensenada intrusión en forma de diques de 0.4 m a las capas volcánicas de la Formación Santiago Peak, las cuales muestran también efectos de rebaje magmático, como en el norte del plutón Ensenada en el Libramiento Ensenada. (Figura 9e y f).

3.3 Rocas postbatolíticas

El último grupo de rocas depositadas después del batolito peninsular son las rocas sedimentarias de la Formación Rosario de finales del Cretácico. Esta formación está conformada por una secuencia detrítica transicional marina a la que le sobreyacen las rocas volcánicas y clásticas de la Formación Rosarito Beach del Mioceno. En este trabajo sólo se da una breve descripción de ellos pues no afloran de manera importante en el área de estudio.

3.3.1 Formación Rosario (Kfr)

Esta formación ha sido definida por Beal (1924, 1948), Santillán y Barrera (1930) y Kilmer (1963) en la localidad de El Rosario, Baja California. Por correlación con la descripción del trabajo de Kilmer (1963), los depósitos sedimentarios que afloran en la esquina inferior izquierda de la zona de estudio corresponden a la Fm. Rosario. Es una secuencia de areniscas y conglomerados polimícticos en capas delgadas <1 m que presentan ocasionalmente láminas de 1 cm de yeso. Esta unidad está en posición casi horizontal, con echado promedio de 9° hacia el SW. En el área de estudio se estima que tiene un espesor aproximado de 200 m. Descansa de manera discordante sobre las rocas de la Formación Santiago Peak. Hacia el sur del área de estudio le sobreyace la secuencia de lavas andesíticas, areniscas y conglomerados de la Formación Rosarito Beach.

3.4 Petrografía.

En esta sección se presentan los resultados del análisis petrográfico a muestras representativas de las unidades litológicas del área de estudio. Se obtuvieron un total de 44 láminas delgadas (Tabla 3), las cuales se dividieron en tres grupos. El primero corresponde a lavas y diques de la Fm Santiago Peak y plutones del CBP (Tabla 4). El segundo grupo corresponde a las rocas volcánicas y volcánico-epiclásticas de la Formación Santiago Peak (Tabla 5) y el tercer grupo corresponde a las rocas en contacto con el plutón Ensenada (Tabla 6). Debido a que las texturas observadas en lámina delgada en los dos primeros grupos metamorfizados han preservado los rasgos que definen al tipo de roca, en este trabajo no se utiliza el prefijo meta.

3.4.1. Lavas y diques de la Fm. Santiago Peak y plutones del CBP

Las láminas obtenidas de este grupo corresponden a las unidades litológicas: Ksv, Kap, Kda y Kgd de los cuerpos plutónicos. Estas fueron agrupadas por ser rocas ígneas.

Las láminas obtenidas de las lavas y diques de las unidades Ksv y Kap, se clasificaron petrográficamente como andesitas. Se caracterizan por tener textura porfídica con matriz traquítica y pilotaxítica para lavas e intergranular para el dique de la Figura 11a y b. Algunas muestras se observaron con fragmentos autobrechados de la misma lava (EN-2-II-17).

La mineralogía en general está compuesta por plagioclasa, clinopiroxeno, hornblenda y minerales opacos. Volumétricamente, los principales cristales son las plagioclasas (andesina>labradorita). Particularmente, los cristales de 2 a 3 mm están de fuerte a moderadamente fracturados, en comparación con los de tamaño menor a 0.25 mm. Los minerales ferromagnesianos son clinopiroxeno y hornblenda, los cuales son abundantes en la matriz, en cristales menores a 1 mm. Estos minerales suelen estar parcialmente alterados en los bordes tornándose más oscuros. Los minerales opacos predominan

Tabla 3. Ubicación de las muestras petrográficas. LEN, libramiento Ensenada Norte; LES, libramiento Ensenada Sur; SAM, San Antonio de las Minas; LEC, libramiento Ensenada Centro; LEC, LPN, Los Pinales Norte; CM, Cerro Miracielo; LPS, Los Pinales Sur; C3C, Cerro Tres Cuchillas; Cañon Doña Petra.

Muestra	Nombre de campo	Zona	Este	Norte	Muestra	Nombre de campo	Zona	Este	Norte
EN-1-X-16	Dacita	LEN	536845	3530828	EN-13-II-17	Intercalación de volcánoclasticos y lavas	LEC	534334	3528964
EN-2-X-16	Andesita	LEN	537769	3531354	EN-14-II-17	Brecha andesítica	LEC	534822	3529252
EN-3-X-16	Andesita	LEN	537769	3531335	EN-15-II-17	Intercalación de volcánoclasticos y lavas	LEC	536130	3529442
EN-4-X-16	Meta volcánica	LEN	538243	3531585	EN-1-III-17	Lapilli acrecional	LPN	538680	3533241
EN-5-X-16	Andesita	LEN	538247	3531742	EN-2-III-17	Intercalación de volcánoclasticos y lavas	LEC	536086	3529388
EN-6-X-16	Andesita	LEN	538273	3531600	EN-3-III-17	Intercalación de volcánoclasticos y lavas	LEC	536135	3529496
EN-7-X-16	Diorita	LEN	538276	3531631	EN-4-III-17	Meta Volcánica	LEN	539154	3531191
EN-8-X-16	Granitoide (Tonalita)	LEN	538276	3531570	EN-5-III-17	Meta sedimentario	LEN	539445	3531901
EN-1-XI-16	Ignimbrita lítica	LEN	537588	3531324	EN-6-III-17	Meta sedimentario	LEN	539505	3531941
EN-2-XI-16	Andesita porfídica	LEN	537630	3531332	EN-7-III-17	Granitoide (Tonalita)	LEN	539699	3531921
EN-1-II-17	Lava andesítica	LES	531020	3529831	EN-8-III-17	Dacita	CM	534201	3533706
EN-2-II-17	Brecha andesítica	LES	532114	3529015	EN-9-III-18	Toba Riolítica	LPN	538955	3533380
EN-3-II-17	Andesita porfídica	LES	532110	3529010	EN-1-V-17	Andesita	CM	535821	3533144
EN-4-II-17	Andesita con facies de brecha	LES	533532	3528566	EN-2-V-17	Intercalación de volcánoclasticos y lavas	CM	535866	3532936
EN-5-II-17	Andesita afanítica	SAM	532100	3536420	EN-3-V-17	Toba lítica	CM	535821	3533144
EN-6-II-17	Brecha intrusiva	SAM	532085	3536415	EN-4-V-17	Andesita	LPN	536973	3531559
EN-7-II-17	Ignimbrita riolítica	SAM	532244	3536124	EN-5-V-17	Toba lítica	LPS	537841	3532181
EN-8-II-17	Dique andesítico porfirítico	LEC	533787	3528781	EN-6-V-17	Lapilli acrecional	LPS	536882	3531375
EN-9-II-17	Volcánoclastica Arenisca y brechas	LEC	533866	3528760	EN-1-VIII-17	Granitoide (Tonalita)	LEN	540304	3531763
EN-10-II-17	Brecha andesítica	LEC	534072	3528846	EN-2-VIII-17	Brecha piroclástica	C3C	531218	3533895
EN-11-II-17	Ignimbrita dacítica	LEC	534093	3528872	EN-3-VIII-17	Diorita	SAM	532413	3536567
EN-12-II-17	Derrame andesítico	LEC	534341	3528950	EN-4-VIII-17	Meta andesita	CDP	536851	3529562

Tabla 4. Muestras petrográficas de lavas y diques de la Fm. Santiago Peak y plutones del CBP. Abreviaciones: ac, accesorio; Ap, apatito; Bt, biotita; Cl, clorita; Cpx, clinopiroxeno; Clz, clinzoisita; Ep, epidota; Fl, fragmento lítico; Hbl, hornblenda; Kfs, feldespato potásico; M, matriz; NA, no aplica; Op, opacos; Pl, plagioclasa; plutón Ensenada; pSAM, plutón San Antonio de las Minas. Qtz, cuarzo; Rt, Rutilio; Ser, sericita; Tn, titanita; Tpl, tipo de plagioclasa donde: A andesina, Ab albita, L labradorita, O oligoclasa, Zr, zircón.

Lavas e intrusivos																				
Muestra	Textura	Clasificación petrográfica	M	Pl	Tpl	Qtz	Kfs	Hbl	Bt	Fl	Cpx	Op	Cl	Ep	Clz	Ap	Rt	Zr	Ser	Tn
EN-1-X-16	Pilotaxítica	Dacita	70	15	O	-	5	-		ac	-	6	1	-	-	ac	-	-	3	-
EN-2-II-17	Porfirítica - traquítica	Lava auto brechada	NA	15	A	5	-	-	1	36	-	6	10	10	12	-	-	-	5	ac
EN-3-II-17	Porfirítica	Andesita porfídica	32	25	A	5	-	-		-	-	8	10	13	-	-	-	-	7	ac
EN-4-II-17	Porfirítica - traquítica	Andesita porfídica	NA	35	A-L	-	-	-	2	-	38	10	10	5	-	-	-	-	ac	ac
EN-7-II-17	Pilotaxítica	Dacita	39	20	O-Ab	38	2	-		-	-	1	ac		-	-	-	-	ac	-
EN-8-II-17	Porfirítica - traquítica	Dique andesítico	NA	48	A	-	-	-	2	-	28	5	5	2	10	-	-	-	ac	-
EN-12-II-17	Pilotaxítica	Andesita porfídica	30	40	A-L	-	-	-		-	-	9	3	10	8	-	-	-	ac	-
EN-8-III-17	Porfirítica	Dacita	60	18	O-Ab-A	20	-	-		-	-	2	-	-	-	-	-	-	ac	-
EN-8-X-16	Hipidiomórfica equigranular	Granodiorita (pE)	NA	36	O-A	32	14	12	4	-	-	2	-	-	ac	ac	-	-	ac	ac
EN-7-III-17	Inter granular	Tonalita (pE)	NA	50	O-A	20	4	10		-	-	4	8	4	-	ac	ac	ac	ac	ac
EN-1-VIII-17	Hipidiomórfica equigranular	Tonalita (pE)	NA	28	A-L	18	9	16	10	-	8	4	3	ac	1	ac	ac	ac	1	2
EN-4-VIII-17	Hipidiomórfica equigranular	Diorita de cpx (pSAM)	NA	45	A-L	2	-	20	5	-	5	10	10	-	-	-	-	-	2	1

en la matriz y en menor medida como inclusiones en plagioclasas y clinopiroxenos. También se observan como producto de alteración en cristales de clinopiroxeno, hornblenda y biotita. El mineral secundario más común es la epidota seguido por la clinozoisita de hábito anhedral y clorita azul rica en hierro.

Los minerales de alteración típicos de las plagioclasas son epidota, clinozoisita y clorita, en algunas plagioclasas están parcialmente albitizadas o sericitizadas (EN-3-II-17).

Las lavas de la unidad Kda tienen texturas porfídicas con una matriz desvitrificada (Figura 11c y d). El rasgo más característico de la muestra analizada son los cristales de cuarzo subhedral a euhedral con textura de bahía (engolfados) <2 mm. La plagioclasa es subhedral, oligoclasa>andesina en cristales <1mm. Se observaron pocos de feldespato los cuales están normalmente sercitizados. Los minerales opacos se observan mayormente en la matriz y son menores de 0.25mm. Los minerales secundarios son calcedonia, clorita y hematita. En la lámina EN-6-II-17 se observan minerales de alteración hidrotermal, en particular, calcedonia en bandas paralelas a la dirección de flujo, además que se observan esferulitas rellenas de calcedonia, mica blanca y minerales opacos. Las plagioclasas y los pocos cristales de feldespato potásico están sercitizados. Los minerales accesorios son biotita de color café y titanita.

Se obtuvieron tres muestras del plutón Ensenada (pE) y una del plutón San Antonio de las Minas (pSAM). El plutón Ensenada se clasifica como una granodiorita de hornblenda y biotita de textura equigranular (Figura 11e y f). La plagioclasa (oligoclasa-andesina) es subhedral a euhedral, pudiendo estar zonados. El cuarzo es de tamaño medio <3 mm y comúnmente presenta extensión ondulada. Se observan cristales de clinopiroxeno tremolitizados en EN-7-III-17. El feldespato potásico se distingue difícilmente en lámina delgada, pero se diferencia bien del cuarzo por la extinción ondulada y en muestra de mano después de la tinción. Los minerales accesorios son apatito, zircón, titanita y rutilo. Los minerales secundarios son epidota, sercita en los núcleos de plagioclasas y clorita con colores de interferencia azul a morado intercalada con biotita. La única lámina del plutón San Antonio de las Minas se clasificó como diorita de hornblenda y clinopiroxeno con textura hipidiomórfica de grano medio equigranular y su mineralogía está compuesta por plagioclasa (andesina>labradorita) núcleos de clinopiroxeno alterado con bordes de hornblenda, biotita y opacos. Los opacos son menores a 1.5 mm y se observan relleno de espacios intercrystalinos. Los minerales secundarios son epidota, sercita y clorita con colores de interferencia azul a morado intercalada con biotita. Los accesorios en las láminas son comúnmente apatito y titanita.

3.4.2. Volcaniclásticas y epiclásticas volcánicas de la Fm. Santiago Peak.

El segundo grupo de láminas delgadas corresponde a rocas volcaniclásticas y epiclásticas que conforman las unidades Kan, Kvc, Klv, Kab y Krt. Las brechas y las tobas cristalinas-líticas son las muestras más abundantes (Kvc y Kab), seguidas por litarenitas volcánicas y tobas con lapilli acrecional (Kvc, Klv y Krt). Todas las muestras obtenidas de este grupo están soldadas.

Las brechas se pueden dividir en brechas tobáceas andesíticas enriquecidas con epidota y clorita (Figura 12a y b) y brechas tobáceas dacíticas más ricas en cuarzo, plagioclasa y feldespato que las brechas anteriores. Se caracterizan por tener un matriz micriolítica con fragmentos líticos volcánicos de lavas de textura traquítica y pilotaxítica, tobas con textura microlítica con tamaños menores a 1.5 cm. Los minerales secundarios más comunes en lámina delgada son epidota, clinozoisita y hematita. Se observa clorita con colores de interferencia café, indicativa de que es más rica en magnesio observándose de manera común en las brechas andesíticas, las plagioclasas son prismáticas y se identifican como oligoclasa-andesina alteradas parcialmente a albita, epidota, clinozoisita, micas blancas. Su tamaño es <1.5 mm.

Las tobas cristalinas presentan una matriz microlítica con fragmentos subangulosos de plagioclasa y cuarzo de tamaños <1.5 mm. El tipo de plagioclasa es oligoclasa y en menor medida andesina. Los fragmentos líticos tienen textura micriolítica y pilotaxítica, en ese orden de abundancia, con tamaños <2 mm. El porcentaje de líticos y cristales es <5%. Como minerales secundarios presenta hornblenda en cristales aislados, biotita <0.25 mm y, en menor cantidad, epidota.

Las litarenitas se identifican fácilmente en lámina delgada por presentar detritos entre subangulosos a subredondeados de fragmentos líticos (Figura 12c y d), donde el tipo de fragmento lítico más abundante es volcánico <0.5 mm. Son más frecuentes los que presentan textura pilotaxítica en los gránulos y en menor medida felsítica. Otros fragmentos que componen estas rocas son de cuarzo monocristalino y plagioclasa subangulosos <0.3 mm. El tipo de plagioclasa es comúnmente oligoclasa y andesina. Los granos en estas láminas suelen tener el cementante alterado a epidota, clinozoisita, cuarzo, opacos y, en menor medida, clorita.

Las láminas delgadas en las que se identificaron lapillis acrecionales se caracterizan por presentar pisolitas volcánicas (lapillis acrecionales) en una matriz micriolítica (Figura 12e y f), donde se observa una concentración de minerales <0.1 mm y opacos en los bordes de los lapillis. Su tamaño es más grande que al campo de visión de los objetivos del microscopio (< 1cm) y algunos lapillis están fragmentados. Se

analizaron dos muestras. En EN-1-III-17 se observa fuerte silicificación debido a que sólo se encuentran lapillis y la matriz microlítica, mientras que EN-6-V-17 presenta fuerte alteración por epidota, que forman pseudomorfos de los lapillis. Los fragmentos líticos son volcánicos y la matriz es microlítica con abundantes opacos finos

.

Tabla 5. Muestras petrográficas de rocas volcánicas y volcánicas epiclásticas de la Fm. Santiago Peak. Abreviaciones: Abreviaciones: ac, accesorio; Ap, apatito; Bt, biotita; Cal, calcita Cl, clorita; Cpx, clinopiroxeno; Clz, clinozoisita; Ep, epidota; Fl, fragmento lítico; Hbl, hornblenda; Hem, hematita; Kfs, feldespato potásico; M, matriz NA, no aplica; Op, opacos; Pl, plagioclasa; plutón Ensenada; pSAM, plutón San Antonio de las Minas. Qtz, cuarzo; Rt, Rutilio; Ser, sericita; Tn, titanita; Tpl, tipo de plagioclasa donde: A andesina, Ab albita, L labradorita, O oligoclasa, Zc, zoisita Zr, zircón.

Rocas volcánicas y volcánicas epiclásticas																		
Muestra	Textura	Clasificación petrográfica	M	Pl	T pl	Qz	Flk	Fl	Cl	Ep	Clz	Ser	Op	Hem	Cal	Zc	Hbl	Bt
EN-5-II-17	Microlítica	Meta toba	93	-	-	2	-	-	-	-	-	ac	3	-	-	-	-	2
EN-6-II-17	Brechada	Brecha intrusiva	38	5	A	10	3	20	2	3	-	4	15	-	-	-	-	-
EN-9-II-17	Brechada	Brecha tobácea	15	10	A	-	-	25	-	5	10	5	4	26	-	-	-	-
EN-10-II-17	Brechada	Brecha tobácea	10	5	A	3	-	50	3	8	8	5	8	-	-	-	-	-
EN-11-II-17	Microlítica con fragmentos líticos	Brecha tobácea	20	8	A-O	10	5	37	3	8	2	4	3	-	-	-	-	-
EN-13-II-17	Granoblástica de líticos	Litarenita volcánica	4	4	A	6	-	56	5	8	5	2	10	-	-	-	-	-
EN-14-II-17	Brechada con matriz microlítica	Brecha tobácea	25	5	A	3	2	40	3	5	-	ac	16	-	-	-	1	ac
EN-15-II-17	Microlítica con frag. de cristales	Toba soldada cristalina	64	15	A	5	2	ac	2	ac	ac	2	7	-	-	-	1	2
EN-1-III-17	Microlítica con lapilli acrecional	Lapilli acrecional soldado	93	-	-	2	-	-	1	ac	ac	ac	4	-	-	-	-	-
EN-2-III-17	Microlítica	Toba soldada cristalina	70	12	O	-	2	8	2	ac	-	ac	2	-	-	-	2	2
EN-3-III-17	Microlítica con frag. Cristalinos	Toba soldada cristalina	65	14	O-A-L	0	5	5	2	-	-	2	3	-	-	-	1	3
EN-9-III-1	Microlítica en bandas	Toba soldada cristalina	73	1	O	3	1	2	1	-	1	ac	1	15	-	2	-	-
EN-3-V-17	Granoblástica de líticos	Litarenita volcánica	3	8	O	17	-	50	5	5	-	-	12	-	-	-	-	-
EN-4-V-17	Brechada porfirítica	Brecha tobácea cristalina	18	7	O-A	8	-	50	-	2	-	-	15	-	-	-	-	-
EN-5-V-17	Granoblástica de líticos	Litarenita volcánica	2	10	A	10	-	55	ac	5	-	-	18	-	-	-	-	-
EN-6-V-17	Microlítica con lapilli acrecional	Lapilli acrecional	20	2	Ab-O	15	2	28	5	20	-	-	8	-	-	-	-	-
EN-1-V-17	Microlítica con líticos	Toba lítica	38	9	A	10	2	25	6	6	-	-	4	-	-	-	-	-
EN-1-II-17	Bandeada-Eutaxítica	Ignimbrita	38	-	-	5	20	-	4	7	-	10	8	8	-	-	-	-
EN-2-V-17	Vitroclástica	Toba vítrea	64	3	A	15	-	3	4	6	-	ac	3	2	-	-	-	-
EN-2-VIII-17	Brechada	Brecha tobácea	20	5	A	5	-	28	5	1	1	15	6	4	10	-	-	-

3.4.3. Rocas en contacto con el plutón Ensenada.

Las láminas obtenidas de las rocas encajonantes que se encuentran en contacto al norte y oeste del plutón Ensenada pertenecen a las unidades Kvc, Klv, Kda y Kap. Se clasificaron en dos grupos que son hornfels de hornblenda y esquistos cuarzofeldespáticos. Cuando el protolito se infiere que son lavas y lavas autobrechadas (rocas máficas andesíticas), se clasificó como hornfels de hornblenda; cuando se infiere que el protolito corresponde a las rocas volcánicas de composición dacítica, se clasificó como esquistos cuarzofeldespático. Otra característica es la preservación de algunos rasgos de su textura original, como fenocristales de plagioclasa que han preservado su forma grande (0.5 a 1 mm). En la lámina EN-1-X-16 se observa la preservación parcial de pseudomorfos de fragmentos líticos, definido por zonas de minerales con fronteras definidas por mayor concentración de hornblenda.

Las texturas de las láminas obtenidas en las rocas de protolito andesítico son generalmente granoporfidoblástica caracterizadas por cristales de plagioclasa, cuarzo, hornblenda, clinopiroxeno, opacos, biotita y, en menor medida, feldespato potásico (Figura 13a y b). Los contactos entre los cristales se observan como una mezcla de bordes irregulares, poligonales y suturados, en algunas partes se observan juntas triples. La plagioclasa se observa en cristales de 0.5 a 1 mm que definen porfidoblastos que presentan inclusiones de cuarzo y hornblenda, mientras que los otros cristales tienen un tamaño <0.15 mm ubicados en la matriz. La es andesina-oligoclasa. Los opacos se observan en la mesostasis como inclusiones dentro de cuarzo y hornblenda. Los clinopiroxenos se observan como gránulos xenomórficos, en contacto con hornblenda y en algunas partes se observa rodeando cristales de cuarzo. La biotita generalmente aparece intercrecida entre los bordes del cuarzo, y es común encontrarla junto a la hornblenda y los opacos. Epidota, clorita, sericita y calcedonia aparecen escasamente y la titanita, apatito, rutilo y granate (?) como accesorios.

Las texturas en las rocas de protolito volcánicas son granoporfidoblástica y granonematoblástica. Su mineralogía está compuesta por minerales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, observándose porfidoblastos de cuarzo y hornblenda. En menor medida se observó actinolita de hábito tabular y prismático sin orientación preferencial (Figura 13c y d). En las muestras granoblásticas se identifican bordes suturados y en algunos se identifica de manera selectiva biotita entre los bordes como señal de compactación y recristalización de restos de arcilla. Los opacos se muestran como inclusiones en los granoblastos y en otras zonas bordean los porfidoblastos de hornblenda y cuarzo. La muestra EN-X-6-16 se clasificó como metatoba, su textura es granoblástica seriada compuesta por cristales de plagioclasa, cuarzo, feldespato y ortoanfíbol (ferroantofilita?). Los minerales secundarios,

clorita y epidota, son escasos. Los accesorios son titanita y apatito. De las muestras obtenidas del cañón La Cascada (EN-5-II-17 y EN-6-II-17) presentan una textura granonematoblástica. El principal mineral de estas láminas es cuarzo (>60%) y los minerales que componen estas láminas en menor medida son muscovita, hornblenda, opacos, biotita y ortopiroxeno (Figura 13e y f). El espécimen se clasifica como esquisto cuarzo feldespático. Los opacos se observan en la matriz como inclusiones dentro de cuarzo y hornblenda. La lámina EN-5-III-17 presenta ortopiroxeno en forma de gránulos y porfidoblastos escasos que están en contacto con moscovita, feldespato potásico y biotita. Apatito, epidota, titanita y granate se encuentran como accesorios.

Tabla 6. Muestras petrográficas de las rocas en contacto con el plutón Ensenada. en contacto con el plutón Ensenada. ac, accesorio; Ap, apatito; Bt, biotita; Cal, calcita; Cl, clorita; Cpx, clinopiroxeno; Clz, clinozoisita; Ep, epidota; Fl, fragmento lítico; Gnem, granonematoblástica; Gprf, granoporfidoblástica; Hbl, hornblenda; Hem, hematita; Kfs, feldespato potásico; M, matriz NA, no aplica; Op, opacos; Pl, plagioclasa; plutón Ensenada; pSAM, plutón San Antonio de las Minas. Qtz, cuarzo; Rt, Rutilio; Ser, sericita; Tn, titanita; Tpl, tipo de plagioclasa donde: A andesina, Ab albita, L labradorita, O oligoclasa, Zc, zoisita Zr, zircón.

Rocas en contacto con el plutón Ensenada																						
Muestra	Clasificación petrográfica	Textura	Protólito	Pl	Tpl	Qtz	Kfs	Ms	Hbl	Oam	Cpx	Opx	Act	Bt	OP	Cl	Ep	Tn	Arg	Rt	Ap	Grt
EN-2-X-16	Hornfels de Hbl	Gnem	And	20	O-A	45	-	-	10	-	15	-	-	3	5	-	-	ac	2	ac	ac	-
EN-3-X-16	Hornfels QzFld	Gnem	Vcl	29	O-A	50	5	-	8	-	ac	-	-	2	4	1	-	ac	1	ac	ac	-
EN-4-X-16	Esquisto QtzFld	Gnem	Vcl	30	O-A	47	5	-	8	ac	ac	-	-	2	4	2	-	-	2	ac	ac	-
EN-5-X-16	Meta toba andesítica	Gnem	Vcl	40	A	40	-	-	5	10	-	-	-	-	5	-	-	ac	-	ac	ac	-
EN-6-X-16	Meta lava andesítica	Gpfb	And	25	A	25	-	-	23	-	8	-	-	4	8	-	ac	5	-	2	ac	-
EN-7-X-16	Hornfels de actinolita	Gpfb	Vcl	30	A	30	3	-	5	-	5	-	15	1	8	-	-	2	1	ac	ac	-
EN-1-XI-16	Meta ignimbrita (Esq Hbl)	Gnem	And?	30	A	45	-	-	16	-	4	-	-	-	4	-	1	-	-	ac	ac	-
EN-2-XI-16	Meta andesita	Gpfb	And	40	A-O	7	-	-	36	-	2	-	-	1	10	3	-	ac	1	-	-	-
EN-4-III-17	Esquisto QzFld	Gpfb	Vcl	20	O-A	60	4	-	5	-	-	-	-	-	6	5	-	-	-	ac	ac	-
EN-5-III-17	Esquisto QzFld	Gnem	Vcl	4	O-A	74	8	5	ac	-	-	4	-	2	3	-	-	-	-	-	ac	ac
EN-6-III-17	Esquisto QzFld	Gnem	Vcl	10	O-A	75	8	1	ac	-	-	ac	-	3	3	-	-	-	-	-	ac	ac
EN-3-VIII-17	Hornfels de Hbl	Gpfb	And	40	A	15	4	-	20	-	10	-	-	5	6	-	-	ac	ac	ac	ac	-

Capítulo 4. Geología estructural

En este capítulo se presenta la interpretación de los lineamientos, así como datos de planos de estratificación, foliación, de falla y líneas de cizalla del área de estudio.

4.1 Análisis regional a partir de lineamientos Landsat rectilíneos

El total de lineamientos rectilíneos interpretados en la zona de estudio es de 1448 a escala 1:10,000 (Figura 14).

El mapa se dividió en cuatro Sectores para facilitar la observación en las variaciones de las tendencias de las orientaciones. El sector A se encuentra en la esquina superior izquierda (NW) de la Figura 14. Destacan morfológicamente el margen de las rocas volcánicas de la Fm. Santiago Peak con el plutón San Antonio de las Minas en el extremo norte del sector, los cañones Arce y Chavira que tienen forma semicircular, los cerros Cantil, Tres Cuchillas y Miracielo. Los lineamientos dominantes se orientan 280° - 320° y 40° - 80° , seguidos por las tendencias hacia 0° - 40° . Los lineamientos 280° - 320° son paralelos a los planos de estratificación y a fallas en las rocas volcánicas de las unidades Kvc (volcanoclásticos), Klv (lavas y volcanoclásticos), Kan (toba andesítica) y Kda (dacita).

Los rasgos morfológicos principales en el sector B de la esquina inferior izquierda (SW) de la Figura 14 son el cañón Cuatro Milpas y el arroyo Sin Nombre. En esta zona domina la tendencia 280° - 320° , donde los lineamientos cortan rocas de las unidades Kvc (volcanoclásticos), Kab (brechas andesíticas), Klv (lavas y volcanoclásticos), Kap (andesitas) y Kfr (arenas y conglomerados). A este grupo de lineamientos están asociados los planos de estratificación y zonas de falla.

En el sector C del NE, esquina superior derecha de la Figura 14, los rasgos morfológicos principales son el cañón Doña Petra, que separa a los sectores A y C y el cerro de Ulloa que tiene una forma de herradura. Las elevaciones en los cerros del NE de este sector alcanzan los 1,000 msnmm y los principales arroyos intermitentes tienen rumbo NE-SW, formando cañones casi rectos. Las tendencias de las orientaciones principales de lineamientos son 40° - 80° , 280° - 320° y 0° - 40° desarrollados en rocas volcánicas de las unidades Kab, Krt, Kap, Kan y Kda. Los lineamientos se asocian con fallas y zonas de cizalla.

En el sector D del SE (Figura 14) la erosión intensa del plutón con respecto a las rocas volcánicas de la Fm. Santiago Peak desarrolla un valle. En este sector el cañón Dona Petra divide a las rocas de los sectores B y D. En este sector el número de lineamientos es menor debido a la mancha urbana. Los rasgos 40° - 80° están asociados a fracturas en el oriente del plutón, mientras que en el oeste los lineamientos 280° - 320° del sector B que cortan rocas volcánicas también afectan al plutón Ensenada. Las tendencias dominantes son 40° - 80° y 280° - 320° .

4.2 Análisis regional de curvilineamientos

Se interpretaron 35 curvilineamientos en la zona de estudio (Figura 15). La parte norte de área de estudio presenta mayor número de curvilineamientos, mientras que en el área suroeste, donde afloran la Fm. Rosario y parte de la Fm. Santiago Peak disminuyen. También se observa que el número de curvilineamientos pequeños está más concentrado en el noreste. Hay tres curvilineamientos con diámetro aproximado de 3 km en la zona centro del área de estudio, correspondientes al cerro Miracielo, cerro de Ulloa y al NE del rancho Los Pinales, los cuales podrían representar las dimensiones de volcanes discretos. Los cuerpos menores a 1 km posiblemente representen *plugs*. Se observan tres curvilineamientos mayores de 3 km que están relacionados directamente con los plutones de la zona. En dos de ellos es evidente el contacto de los plutones con las rocas de la Fm. Santiago Peak y en el tercero, que se encuentra al sur de San Antonio de las Minas, se infiere que pueda ser un efecto del borde del plutón que se manifiesta como un bloque rígido. Dicho bloque trabaja como un cuerpo contra el que las tobas andesíticas de la unidad Kan que sobreyacen al plutón San Antonio de las Minas se deforman. En el plutón Ensenada los curvilineamientos interiores pueden representar pulsos discretos que se generaron dentro del sistema magmático. Algunos curvilineamientos están afectados por fallas recientes, por lo que la forma del plutón puede estar modificada.

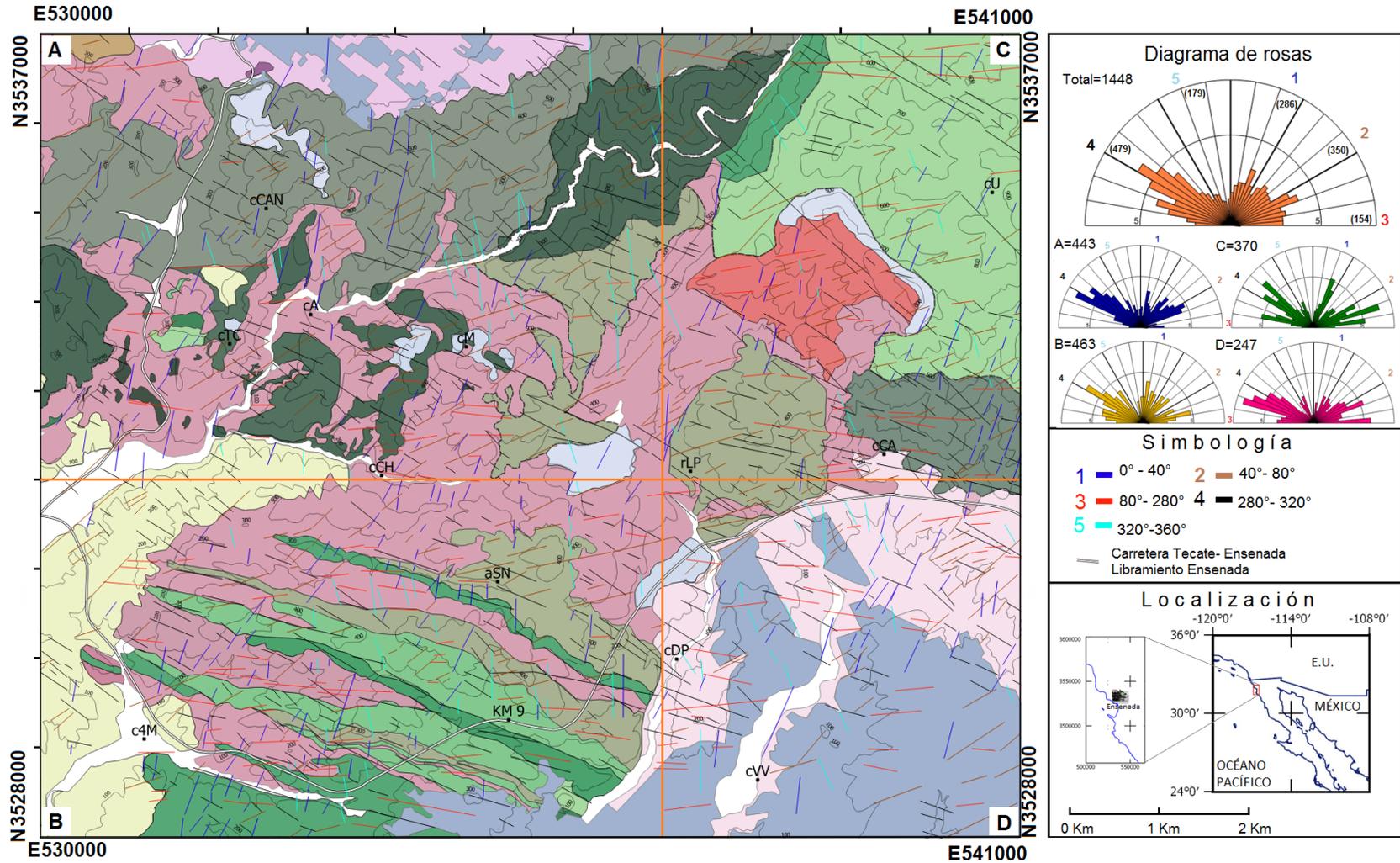


Figura 14. Lineamientos interpretados a partir de una imagen satelital Google Earth. Los colores 1 a 5 indican las diversas tendencias de lineamientos rectilíneos. Las líneas rectas naranjas marcan las divisiones entre los sectores analizados. Las abreviaturas significan: cC, cerro Cantil; c3C, cerro Tres Cuchillas; cA, cañón Arce; cCH, cañada Chavira; cM, cerro Miracielo; aSN, arroyo sin nombre; c4M, cañón Cuatro Milpas; KM 9, kilómetro 9; rLP, rancho Los Pinales; cDP, cañón Doña Petra; cCA, cañón La Cascada; cU, cerro de Ulloa; cVV, Cañón Valle Verde. En azul marino se representa una tendencia con orientación 0°-40°; en café 40°-80°, en rojo 80°-280°, en negro 280°-320° y cian 320°-0°. Los números dentro del semicírculo con todos los lineamientos son el número de rasgos en cada sector de 30°.

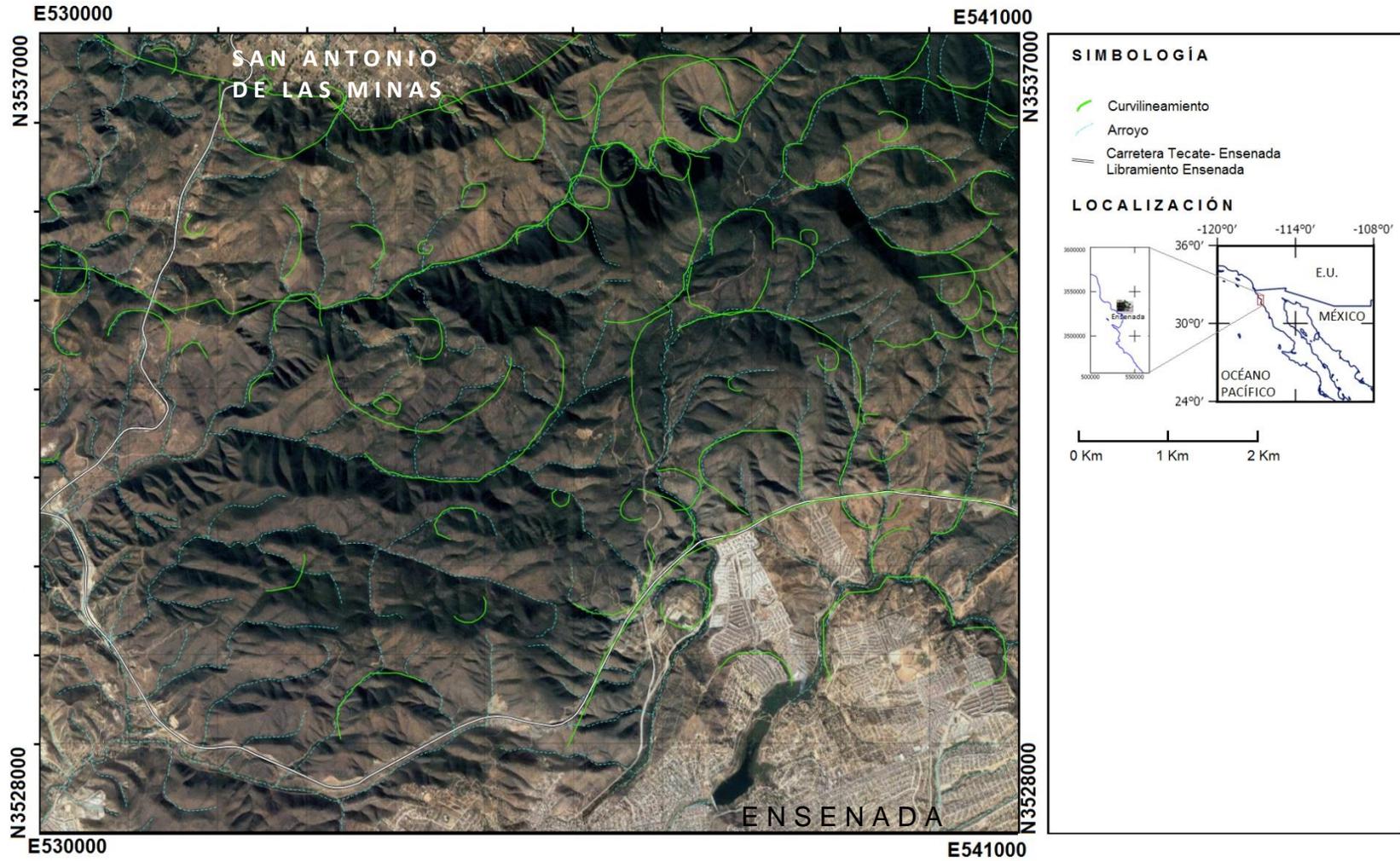


Figura 15. Curvilineamientos que pueden asociarse con cuerpos magmáticos subvolcánicos

4.3 Datos de estratificación y foliación

Se obtuvieron 62 datos representativos de estratificación en el campo (Figura 16). Los datos de estratificación se dividieron en dos estereogramas. El primero corresponde a los datos de la zona al sur del cañada Chavira, cuyo promedio obtenido de 34 datos es de 96° de rumbo y 45° de echado (Figura 16A). El segundo estereograma tiene datos de la parte norte de la misma cañada. Con un promedio de 28 datos se obtuvo un actitud de 106° de rumbo y 27° de echado (Figura 16B). De manera general la disposición de las rocas estratificadas en el área de estudio forman un monoclinal con un rumbo promedio 100° y echado 38° con buzamiento hacia el SW.

De los datos de foliación se obtuvieron 70 datos, principalmente de las rocas encajonantes de plutón Ensenada, en las unidades Kvc, Klv y Kap. Los datos de foliación se ordenaron en cuatro estereogramas que se muestran en la Figura 16 C-F.

El estereograma C) corresponde a los datos del oeste del Cañón Doña Petra. Esta zona se caracteriza por la tendencia general de $167^\circ/57^\circ$. Esta foliación muestra un contraste con la tendencia de estratificación cuya orientación es casi N-S.

El estereograma D) corresponde al sur del rancho los Pinales y al oeste del cañón Doña Petra. Presenta un promedio de $61^\circ/33^\circ$ de echado. La foliación observada en este diagrama es paralela a la tendencia de lineamientos orientados 40° - 60° .

El estereograma E) corresponde a la zona norte del plutón Ensenada. Las rocas de esta zona se orientan $103^\circ/39^\circ$ en promedio. Los datos de foliación se acercan a los de estratificación del inciso C).

Los datos del estereograma F) fueron obtenidos al NE del rancho Los Pinales. Los datos promedian $96^\circ/8^\circ$. En el mapa geológico de la Figura 16 se observa que los datos de esta zona se encuentran mayormente sobre el borde SW de la unidad Ktr, lo que puede estar asociado con una zona de cizalla.

De los datos de foliación en los estereogramas A), B) y C), se pueden definir que reflejan la deformación producida por el emplazamiento del plutón Ensenada. Mientras que los datos de foliación en el estereograma D) son consecuencia de zonas de cizalla, según se infiere al encontrarse la foliación entre el límite de las unidades Ktr y Kvc.

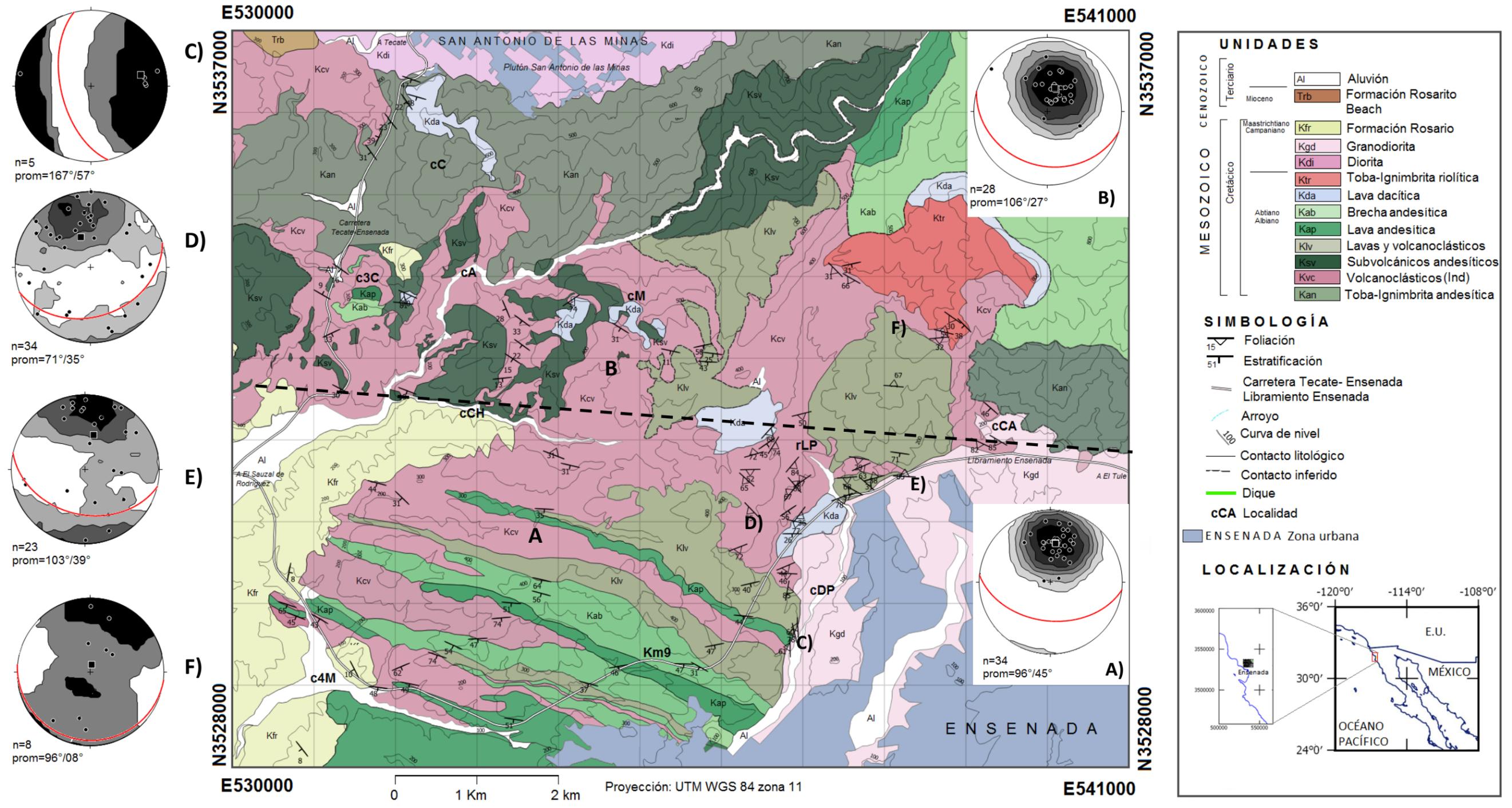


Figura 16. Mapa geológico de la zona de estudio. A) Estereograma de 28 polos de estratificación de la zona norte, cuyo plano promedio es 106°/27°, similar al de la zona sur B) de 96°/45°. El cambio en el buzamiento puede deberse a esfuerzos compresivos antes de la intrusión del plutón Ensenada. C) a F) muestran la foliación metamórfica de las rocas encajonantes del plutón Ensenada. En C) la foliación está influenciada por el emplazamiento del plutón Ensenada, en D) la foliación tiende a ser paralela a lineamientos estructurales, así como a la periferia del plutón Ensenada, mientras que en E) es notable el paralelismo entre la estratificación de la zona sur con la foliación por deformación y en F) el promedio de la orientación de los estratos de la zona norte es paralela a la foliación, ambas casi E-W buzando hacia el sur.

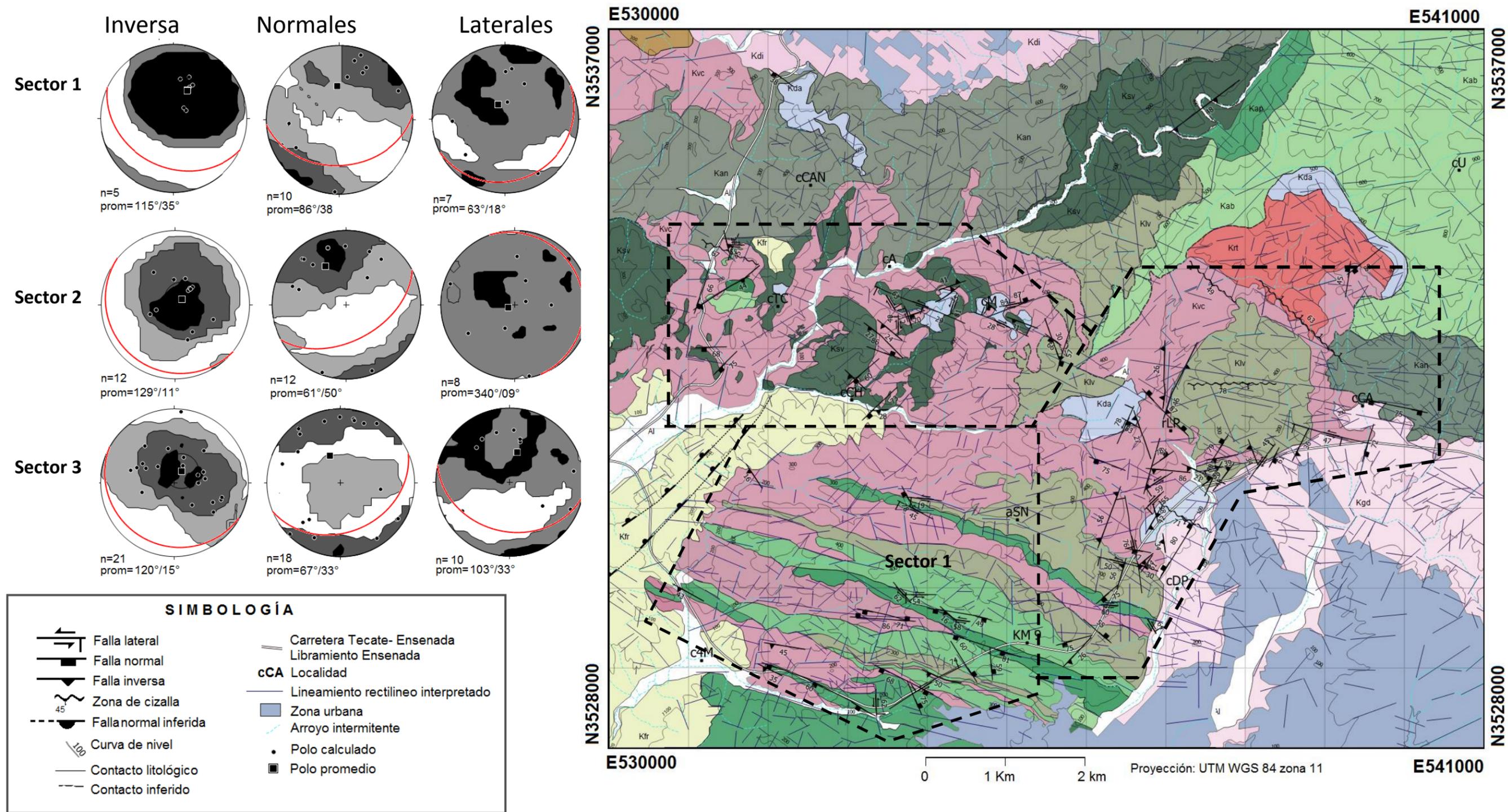


Figura 17. Mapa de fallas cartografiadas en el campo analizadas por sector y lineamientos de la Fig. 14. En cada sector se separan las fallas por su naturaleza según criterios de Ragan (1985). Los estereogramas muestran densidad de polos en contornos de Kamb y su plano promedio. Las abreviaturas significan: cC, cerro Cantil; c3C, cerro Tres Cuchillas; cA, cañón Arce; cCH, cañada Chavira; cM, cerro Miracielo; aSN, arroyo sin nombre; c4M, cañón Cuatro Milpas; KM 9, kilómetro nueve; rLP, rancho Los Pinales; cDP, cañón Doña Petra; cCA, cañón La Cascada; cU, cerro de Ulloa.

4.4 Descripción de fallas y zonas de cizalla

Las fallas cartografiadas desarrollan estrías, brechas de falla, salbanda (arcilla de falla) y pliegues de arrastre que son utilizados como indicadores cinemáticos. Algunas de estas estructuras muestran desarrollo de epidota en forma de cristales, vetillas y masas amorfas.

Se tomaron dos criterios para identificar el sentido de desplazamiento de las fallas: el primero define como inversas o normales según el echado del plano de las fallas con respecto al plano horizontal, de forma que aquellas con ángulos $<55^\circ$ se consideraron inversas, y las que tienen planos $>55^\circ$ normales. El segundo criterio se tomó de Ragan (1985), donde las estructuras fueron separadas en fallas inversas y normales si el *rake* de las estrías está entre 45° y 90° , y laterales si el *rake* varía de 0° a 45° . Estos criterios no se tomaron en cuenta para las fallas de aspecto lístrico donde es posible identificar el tipo de deslizamiento de la falla, así como en fallas con relleno de brecha que no tienen lineaciones. Las zonas de cizalla se caracterizan por una intensa foliación que se distingue por el fuerte clivaje de la roca y pueden o no poner en contacto diferentes unidades litológicas. En la mayoría de las fallas no se observó desplazamiento considerable. De los planos de falla y cizalla se tomaron 335 datos, los cuales tienen buena correlación con respecto a los lineamientos rectilíneos interpretados. Para simplificar la descripción geométrica de las fallas se dividió el área de estudio en tres sectores (Figura 17): sector 1 cañón Cuatro Milpas-Km9, sector 2 cañón Chaviracero Miracielo y sector 3 Km 9-cañón La Cascada.

El sector 1 se encuentra al SW de la zona de estudio, entre la cañón Cuatro Milpas y sur del Km 9. El rasgo más característico del sector son las fallas normales e inversas con rumbo 95° - 150° paralelos a la estratificación de las rocas volcánicas de la zona, cuyo buzamiento es hacia el SW y correlacionan con los lineamientos 280° - 320° . En la parte SE del sector, en el Libramiento Ensenada, se observan planos de falla normal buzando hacia el SW (Figura 18a y b), además que las rocas en el bloque del piso están brechadas. Las fallas inversas se pueden observar en el cañón Cuatro Milpas hasta el trayecto del Km 9, donde pueden manifestarse brechas de fallas desarrolladas sobre planos de estratificación de las rocas volcanoclásticas (Figura 18c). En la parte central del sector se observan brechas de falla de hasta 1.5 m de ancho y foliación en los bordes. En la parte norte del mismo sector, al sur del arroyo Sin Nombre, se observó una falla inversa con relleno de hasta 20 cm de espesor y pliegues de arrastre (Figura 18d), con fuerte argilitización y fracturas rellenas de cuarzo. Otras fallas identificadas como laterales tanto izquierdas como derechas con rumbos 330° - 350° buzando hacia NE se observan al NE del cañón Cuatro Milpas. En estas fallas se generó epidota y es más común la salbanda hacia el norte y coinciden en orientación con los lineamientos 320° - 0° . Otra tendencia de fallas normales y laterales izquierdas en esta zona tiene rumbos hacia el Este. Otras

estructuras asociadas a los lineamientos 0° - 40° corresponden a deslizamientos rotacionales y fallas normales que se observan en la Fm. Rosario de la parte central y occidental del cañón Cuatro Milpas. De las relaciones de corte se infiere que las fallas inversas fueron cortadas por las normales y éstas, a su vez, están cortadas por laterales.

El plano resultante de polos de fallas inversas del sector 1 (Figura 17) tiene un promedio de $115^{\circ}/35^{\circ}$. Los planos de fallas normales muestran tendencia parecida a las fallas inversas, promediando $86^{\circ}/38^{\circ}$. El plano resultante de los polos de fallas laterales tienen un promedio de $63^{\circ}/38^{\circ}$. Los resultados de los estereogramas de fallas inversas y normales son similares a los correspondientes de estratificación (A y B). Esta similitud puede sugerir que los esfuerzos que produjeron estas fallas actuaron de manera perpendicular a los planos de estratificación de las rocas del sector 1, interpretándose que estas fallas se desarrollaron preferentemente en los planos de estratificación.

En el sector 2 se encuentran los cañones Arce y Chavira que bordean al cerro Miracielo. Las fallas de bajo ángulo son predominantes en este sector, siendo más comunes las inversas o laterales. Las fallas laterales derechas con rumbo NW-SW están asociadas a los lineamientos 320° - 0° . Se observaron fallas laterales derechas en la parte norte del sector 2 (Figura 18e). Las fallas clasificadas como inversas tienen rumbos entre 130° y 180° , parecidos a los lineamientos 280° - 320° , que son paralelas a la estratificación de las unidades Kvc y Klv. Estas fallas son más abundantes en el sur del sector 2. Hacia el NW de esta zona se observan fallas inversas con rumbos promedio 50° que también se encuentran en la carretera Tecate-Ensenada. Se correlacionan con los lineamientos 40° - 80° , algunas son laterales y posiblemente cortan a las fallas inversas. Las fallas normales son poco frecuentes y la mayoría desarrollan brechas de (Figura 18f).

En el Sector 2 (Figura 17) los planos de falla obtenidos de los polos son de manera general: $129^{\circ}/11^{\circ}$ para fallas inversas; $61^{\circ}/50^{\circ}$ en fallas normales; $340^{\circ}/09^{\circ}$ en fallas laterales. El

estereograma de fallas laterales presenta un grado de dispersión alto y su tendencia preferencial, definida por el polo casi N-S, se caracteriza por ser el único orientado casi N-S.

El Sector 3 se encuentra entre el Km 9 y el cañón La Cascada. Esta zona se distingue porque las rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Fm. Santiago Peak están en contacto con el plutón Ensenada. Este sector presenta tres tendencias principales de fallas que se intersectan al este del cañón Doña Petra. La primera corresponde a fallas paralelas al rumbo promedio de la estratificación 130° - 180° o 220° (Figura

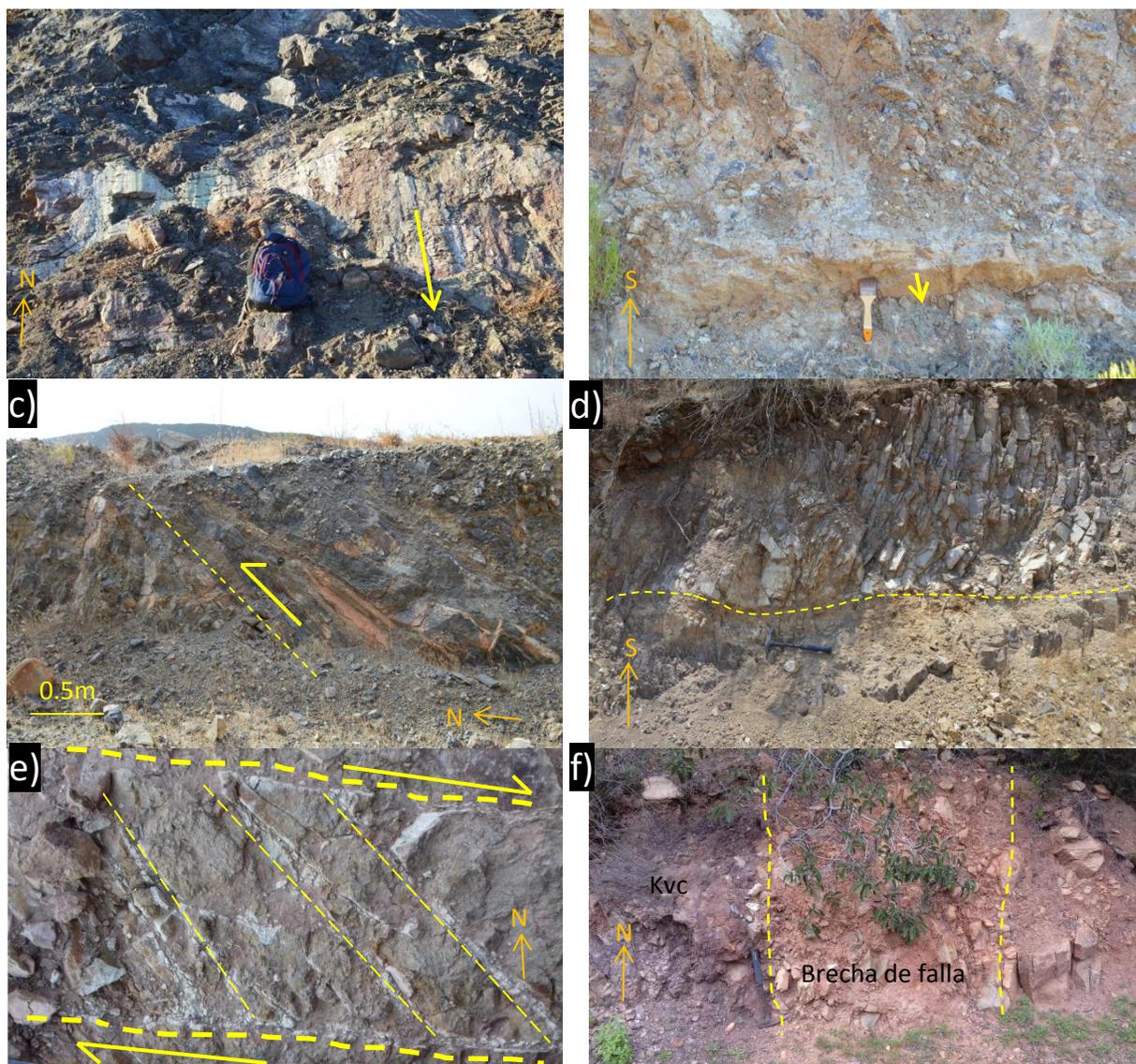


Figura 18. a) Falla normal en área del cañón Cuatro Milpas con una mochila de referencia; b) falla normal bajo una brecha andesítica formada por una falla inversa al este del cañón Cuatro Milpas; c) falla inversa paralela a los planos de estratificación en la zona del cañón Cuatro Milpas-KM 9; d) falla lateral de bajo ángulo al oeste del arroyo Sin Nombre; e) falla lateral derecha al norte del cerro Tres Cuchillas; f) brecha de falla en la cañada Chavira. Las flechas amarillas indican el sentido del desplazamiento y las naranjas indican el punto cardinal norte (N) o sur (S).

19a). El sistema de fallas, principalmente inversas y transcurrentes, atraviesa todo el sector y corta rocas volcanoclásticas, volcánicas y al plutón Ensenada. Estas fallas son correlacionables con los lineamientos 280° - 320° y 80° - 280° , en la parte central del cañón Doña Petra la zona de falla desarrolla brechas con bloques de hasta 0.5 m y *gauche* epidotizado con espesores entre 15 y 20 cm (Figura 19b). Esta última zona de falla continúa hasta el arroyo Sin Nombre, y se infiere que estas estructuras prosiguen hasta el norte del sector 1. La segunda tendencia en el sector 3 corresponde a una dirección general 20° - 45° , clasificándose como fallas inversas y laterales derechas, buzando la mayoría hacia el SE. Correlacionan con los lineamientos 0° - 40° (Figura 19c y d). El tercer grupo corresponde a una zona de fallas y cizallas del norte del puente Doña Petra y a un sistema de fallas al NE del Km 9. Su dirección es 45° - 80° , en él se desarrollan fallas laterales derechas e izquierdas que en su mayoría tienen echados altos. Se correlacionan con los lineamientos 40° - 80° . En esta zona se observa que el cizallamiento deja bloques redondeados no cizallados de hasta 3m (Figura 19e). Un rasgo característico en los bordes de la zona de estas cizallas y fallas es la precipitación de epidota y especularita (?) en lapillis acrecionales, además de estar en vetillas y en nódulos de hasta 30 cm de diámetro. El desplazamiento de fallas es perceptible después del puente Doña Petra, en aplitas que cortan a la roca encajonate del pE. Al sur del cañón La Cascada se observa una falla inversa que corta al plutón Ensenada y a las rocas volcánicas. Esta falla es parte de una zona de falla que se observa en la zona de Chavira-Miracielo (Figura 19f). También se pueden observar fallas normales con desplazamiento <0.5 m, asociadas al relajamiento de esfuerzos compresivos cortando a fallas inversas o dos eventos de deformación.

Los datos en los estereogramas del sector 3 están más dispersos. Los promedios generales de los polos de las fallas del sector 3 son: $120^{\circ}/15^{\circ}$ en fallas inversas, $67^{\circ}/33^{\circ}$ en fallas normales y $103^{\circ}/3^{\circ}$ en las fallas laterales. Este sector tiene el mayor número de datos de polos. Los contornos generados por las fallas inversas muestran dos áreas de concentración, lo que podría indicar la existencia posible de dos grupos de fallas inversas.

De manera general, se observa que los estereogramas de fallas inversas tienen una tendencia parecida en los planos resultantes, por lo que se puede sugerir que la mayoría de las fallas inversas están asociadas a un evento compresivo. En las fallas normales se observa una tendencia comparable sólo en los sectores 2 y 3. Los estereogramas de fallas laterales son los únicos que son distintos en cada uno de los estereogramas.

Otras fallas y cizallas observadas y no agrupadas en algún sistema son las fallas casi E-W del oriente del cañón La Cascada. Estas fallas son de ángulo alto, interpretadas como normales en los lineamientos. Un

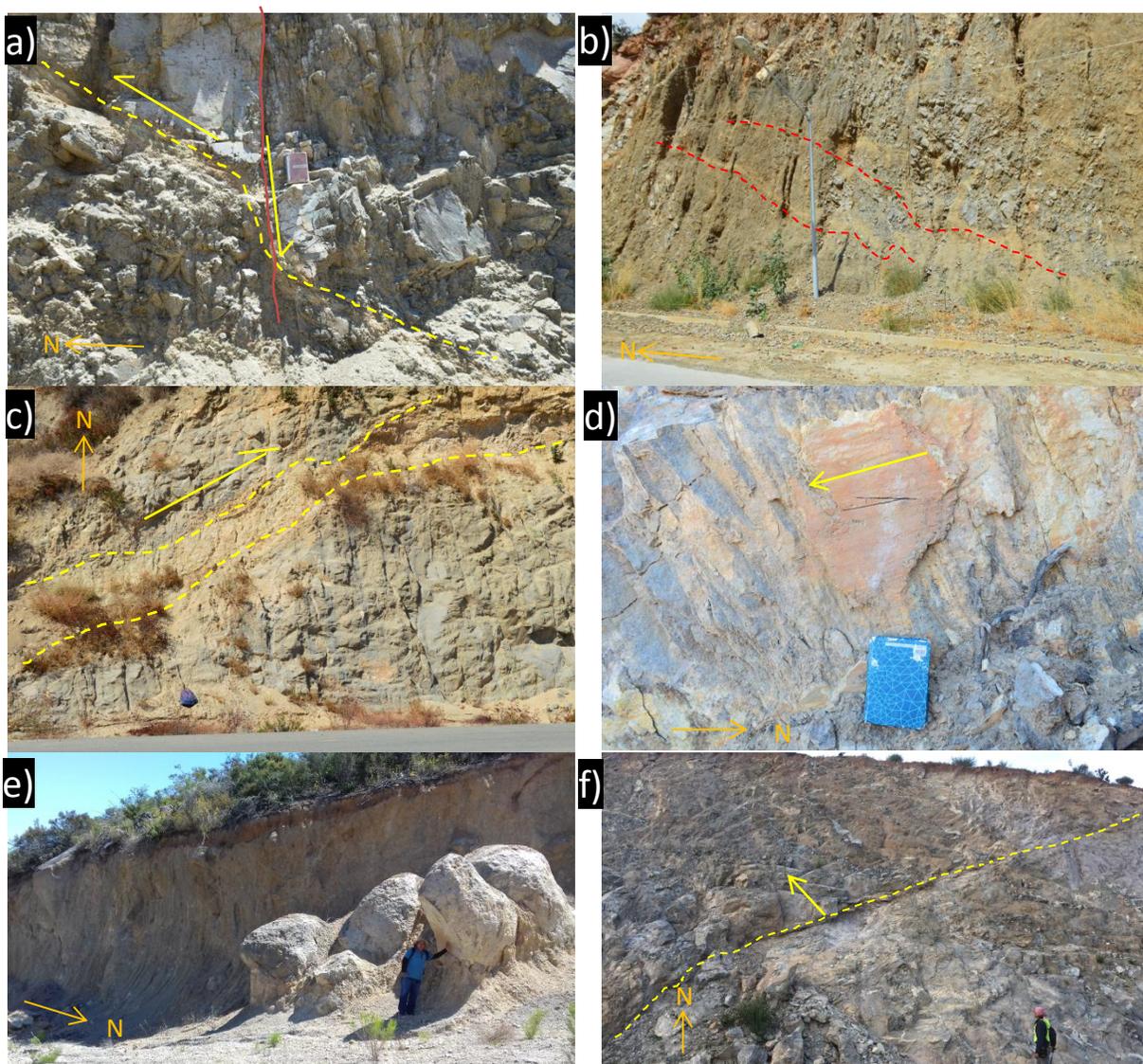


Figura 19. **a)** Falla inversa cortada por una falla normal asociada con relajación; **b)** falla inversa con brecha de falla al norte del cañón Doña Petra; **c)** falla inversa en el Libramiento Ensenada al E del cañón Doña Petra; **d)** espejo de falla lateral al W del cañón Doña Petra; **e)** zona de cizalla al NW del cañón Doña Petra que contiene bloques con menores rasgos de deformación frágil; **f)** falla de bajo ángulo con desplazamiento lateral derecho en el Libramiento Ensenada al sur del cañón La Cascada que corta a las unidades Kvc y Kgd(foto proporcionada por Jaziel Cambrón). Las flechas amarillas indican el sentido del desplazamiento y las naranjas indican el punto cardinal norte (N).

grupo de cizallas al N y NE del rancho Los Pinales tienen una dirección 30° - 60° y se infiere que son dominantes en la zona norte de la zona de estudio.

Los datos de los estereogramas del sector 3 muestran una dispersión variable. Los promedios generales de los polos de las fallas del sector 3 son: $120^{\circ}/15^{\circ}$ en fallas inversas, $67^{\circ}/33^{\circ}$ en fallas normales y $103^{\circ}/3^{\circ}$ en las fallas laterales. Este sector es el que tiene el mayor número de datos de polos. Los contornos generados por las fallas inversas muestran dos áreas de concentración, lo que podría indicar dos grupos de fallas inversas.

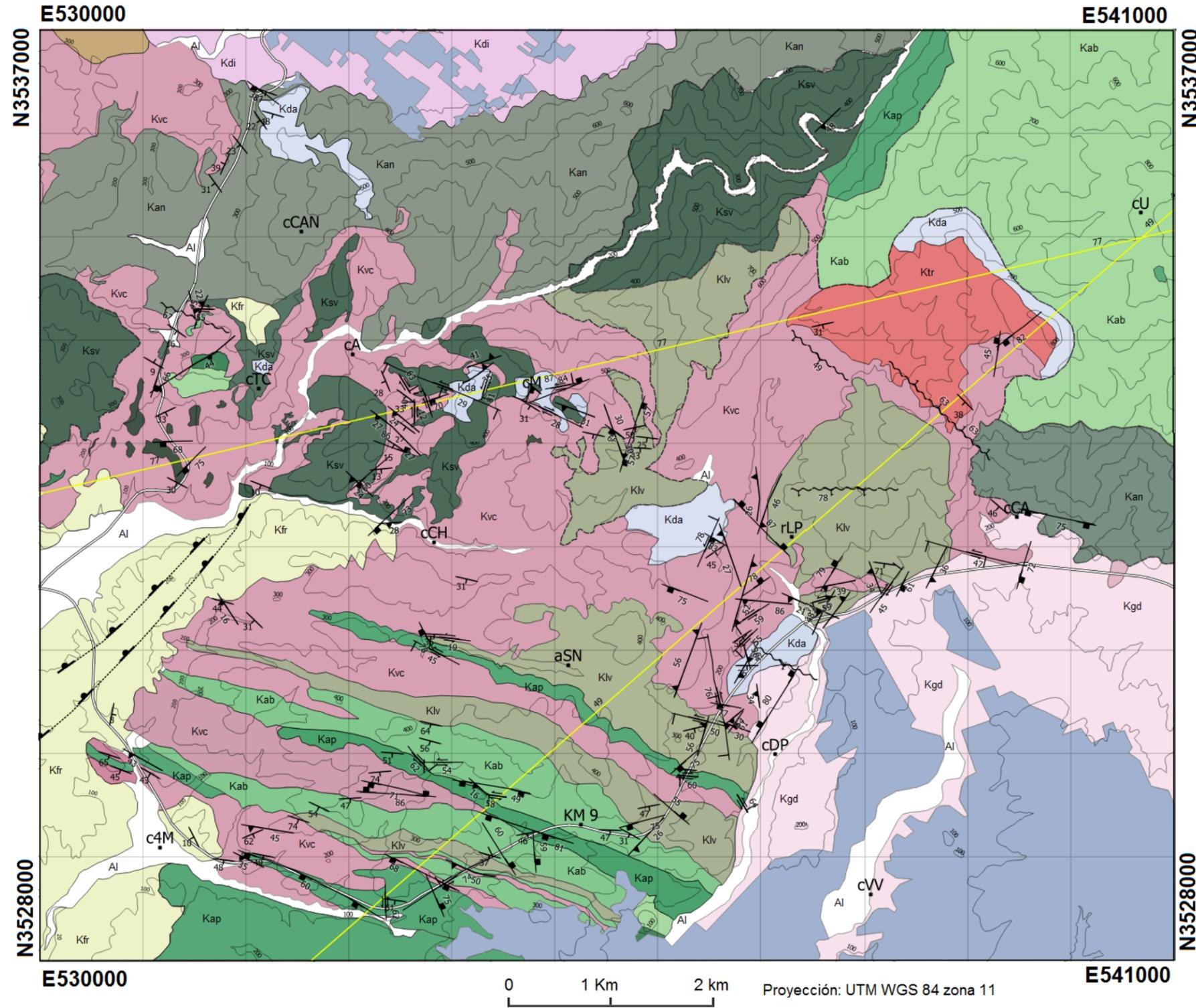
Otras fallas y cizallas observadas y no agrupadas en algún sistema corresponden a las fallas casi E-W, al oriente del cañón la Cascada. Estas fallas son de ángulo alto, interpretadas como normales en los lineamientos. Un grupo de cizallas al N y NE del rancho Los Pinales tienen una dirección 30° - 60° y se infiere que son dominantes en la zona norte de la zona de estudio.

De manera general, se observa que los estereogramas de fallas inversas presentan una tendencia similar de los planos resultantes, por lo que se puede sugerir que la mayoría de las fallas inversas están asociadas a un evento compresivo.

4.5 Secciones geológicas

Se hicieron dos secciones estructurales (Figura 20) en dirección casi perpendicular a la tendencia general de la estratificación de la unidad Kvc (volcanoclásticos y lavas).

En la sección A-A' (Figura 21a) se puede observar de SW a NE los rasgos estructurales principales del sector 1 desde el cañón Cuatro Milpas hasta el arroyo Sin Nombre. Las fallas normales e inversas tienen rumbos parecidos a la estratificación y se observan algunas fallas laterales con buzamiento contrario a la estratificación, las cuales llegan a y cortan a las fallas normales e inversas. En el sector 3, a partir del cañón Doña Petra, se infiere que la secuencia de la unidad Kvc está cortada por fallas con tendencia N-S. En la zona del cerro de Ulloa se interpreta la existencia de un volcán erosionado donde posiblemente los restos del flanco del estratovolcán corresponden al afloramiento de Kda (dacita) y Krt (tobas riolíticas). La última unidad en la parte sur está cortada por una zona de cizalla. La zona entre el sector 1 y 3 desde



UNIDADES

CENOZOICO	Terciario	Al	Aluvión	
	Mioceno	Trb	Formación Rosarito Beach	
MESOZOICO	Cretácico	Maastrichtiano	Kfr	Formación Rosario
		Campaniano	Kgd	Granodiorita
	Abtiano Albiano	Kdi	Diorita	
		Ktr	Toba-Ignimbrita riolítica	
		Kda	Lava dacítica	
		Kab	Brecha andesítica	
		Kap	Lava andesítica	
		Klv	Lavas y volcanoclásticos	
		Ksv	Subvolcánicos andesíticos	
		Kvc	Volcanoclásticos (Ind)	
Kan	Toba-Ignimbrita andesítica			

SIMBOLOGÍA

- Falla lateral
- Falla normal
- Falla inversa
- Zona de cizalla
- Falla normal inferida
- Curva de nivel
- Contacto litológico
- Contacto inferido
- Carretera Tecate- Ensenada
- Libramiento Ensenada
- cCA Localidad
- Lineamiento rectilíneo interpretado
- Zona urbana
- Arroyo intermitente
- A-A' Sección litológica estructural

LOCALIZACIÓN

36°0' 35°00' 3500000 500000 550000

-120°0' -114°0' -108°0'

E.U. MÉXICO OCEANO PACÍFICO

Figura 20. Líneas de referencia para las secciones geológicas de la Figura 26.

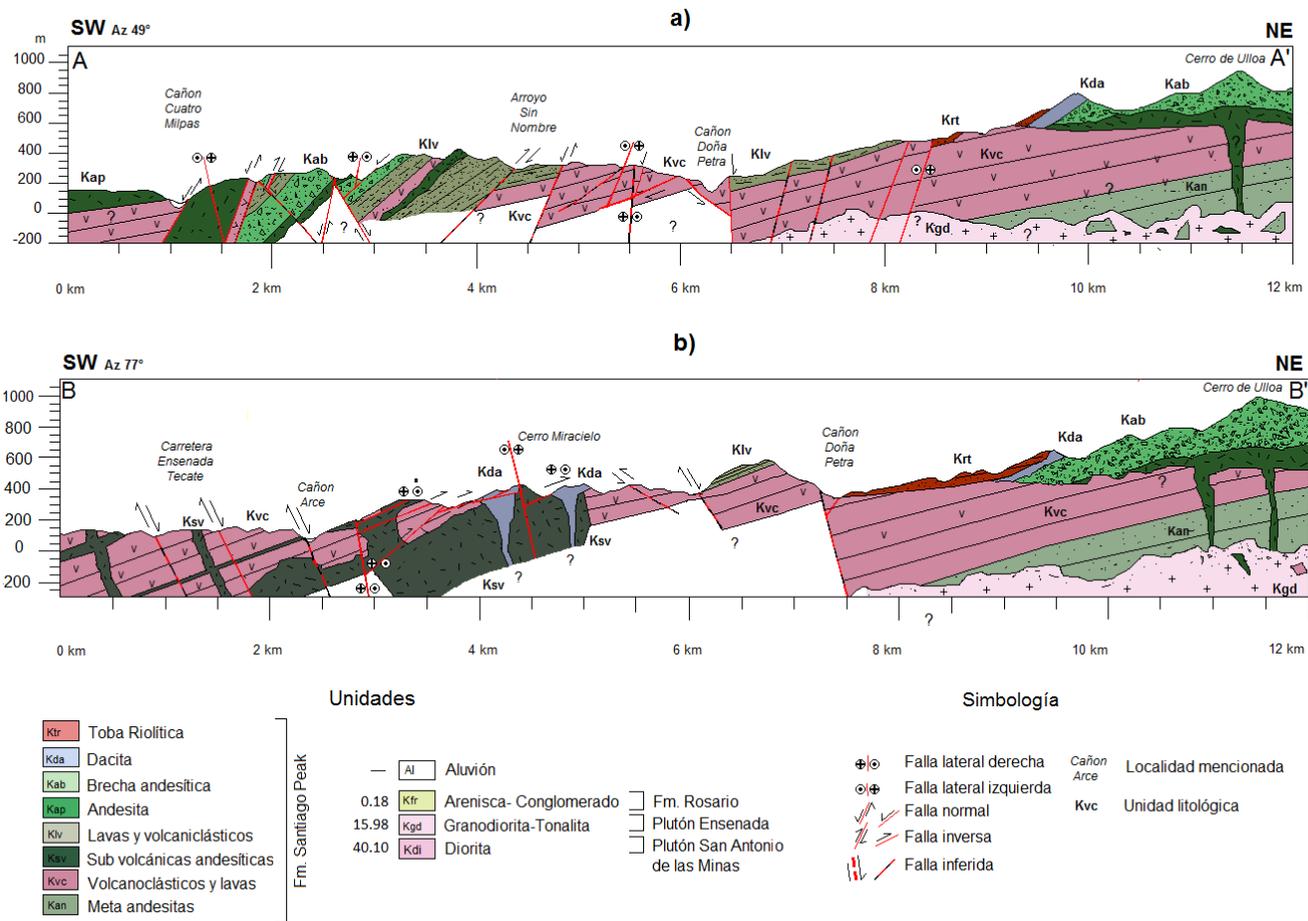


Figura 21. Secciones geológicas indicadas en la Figura 20. En A-A', la zona entre el Cañon Cuatro Milpas y el arroyo Sin Nombre destaca el echado más alto de los estratos con respecto al resto del área; en B-B', entre la carretera Ensenada y el cerro Miracielo se presentan los cuerpos subvolcánicos andesíticos y dacíticos de Kda. Debajo del cerro de Ulloa se infiere, a partir de observaciones al oriente de San Antonio de las Minas la presencia de cuerpos similares de Kap.

el arroyo Sin Nombre hasta el cañón Doña Petra corresponde a una zona estructural compleja en donde posiblemente existen fallas laterales derechas recientes.

En la sección B-B (Figura 21b) se observan unidades que corresponden al sector 2 desde la carretera Tecate-Ensenada hasta el sector 3 al este. La secuencia Kvc (volcanoclásticos) está intrusionada por cuerpos sub-volcánicos andesíticos de la unidad Ksv en la zona de la carretera Ensenada-Tecate hasta el cerro Miracielo, donde se observan fallas N-S. Se infiere que parte del cañón Arce corresponde a una de estas estructuras. En el cerro Miracielo en la parte central, se pueden observar domos dacíticos que cortan a las unidades Ksv y Kvc, así como fallas inversas de bajo ángulo con movimiento lateral. A partir del cañón Doña Petra se observa una secuencia de tobas riolíticas (Ktr) que descansa sobre los volcanoclásticos de la unidad Kvc. Se considera que la fuente probable de este depósito se localiza cerca del cerro de Ulloa y también que su posición actual es producto de fallas extensionales con orientación cuya tendencia es 20°-40°.

Capítulo 5. Análisis cualitativo geofísico

En este capítulo se muestra la interpretación cualitativa de los datos de susceptibilidad magnética y aeromagnéticos de la zona de estudio. El uso de datos geofísicos en este trabajo es para complementar zonas donde el acceso es restringido debido a la vegetación o a la topografía abrupta y como complemento para inferir la extensión de las litologías y fallas geológicas.

5.1 Datos de susceptibilidad magnética

Se obtuvieron un total de 685 datos de susceptibilidad magnética con un susceptibilímetro portátil, los cuales se presentan de cuatro maneras. En la primera se relaciona con las unidades litológicas (Figura 22). La segunda con el porcentaje de minerales opacos observados en las láminas delgadas (Figura 23). En la tercera se presentan las mediciones de susceptibilidad de un sill en la cañada Chavira (Figura 24). En la cuarta mediante una sección a lo largo del libramiento Ensenada (Figura 25 a, b).

En la Figura 22 se observa que los valores de susceptibilidad magnética promedio más altos corresponden a las unidades Kap ($29.84 \text{ SI} \times 10^{-3}$), Kdi ($27.75 \text{ SI} \times 10^{-3}$; Roberto Gómez Torres, comunicación personal, 2018) y Kgd ($25.42 \text{ SI} \times 10^{-3}$). La primera unidad está compuesta por lavas andesíticas, la segunda por diorita del plutón San Antonio de las Minas, mientras que la tercera por tonalita del plutón Ensenada. Los valores más bajos corresponden a las unidades Kan ($1.85 \text{ SI} \times 10^{-3}$), Krt ($0.22 \text{ SI} \times 10^{-3}$) y Kfr ($0.18 \text{ SI} \times 10^{-3}$), que corresponden a toba andesítica, toba riolítica y arenas y conglomerados de la Formación Rosario.

La gráfica de la Figura 23 se elaboró a partir de la Tabla 7 que presenta los resultados del porcentaje de óxidos obtenido del conteo en láminas delgadas de especímenes de las unidades litológicas. El porcentaje alto de hematita observado en la lámina EN-9-III-17, de la unidad Krt, ratifican los bajos niveles de susceptibilidad magnética en esa unidad, mientras que el porcentaje alto de óxidos en la lámina EN-4-VIII-17 ratifican los altos valores de susceptibilidad magnética en esa unidad. Se observa que la relación entre susceptibilidad magnética y óxidos opacos es dispersa, lo cual se atribuye a la presencia de zonas de alteración química y zonas de falla en la zona de estudio. Aun así, se puede observar que todas las unidades litológicas, salvo la de lavas y volcánicas de Klv y Kvc muestran un incremento en

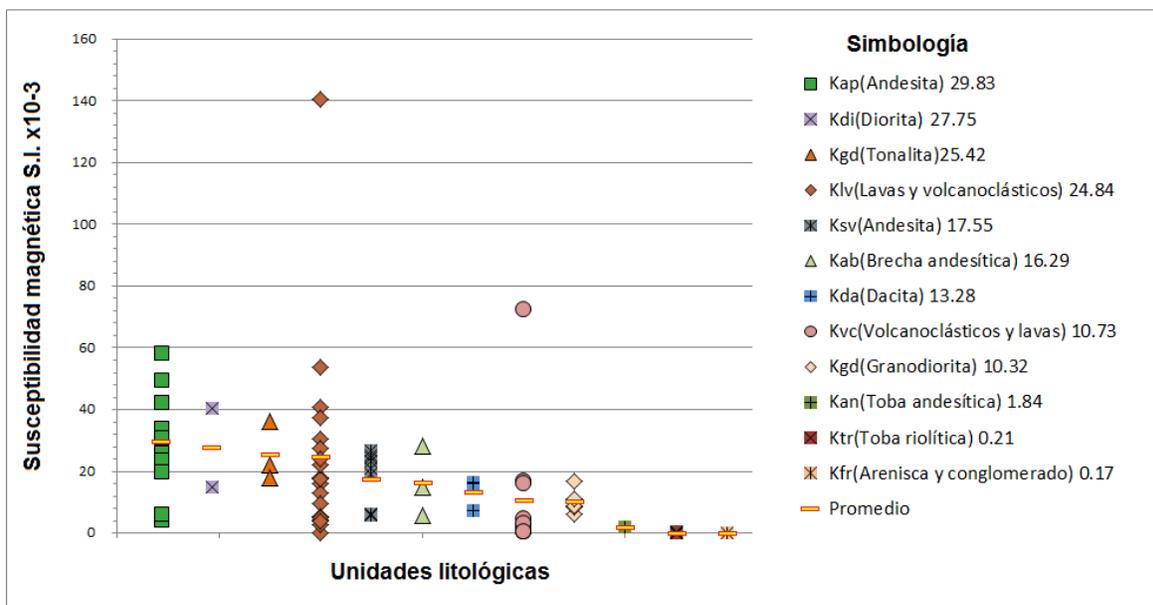


Figura 22. Variación de la susceptibilidad magnética medida en el campo en cada unidad litológica. Cada símbolo representa el promedio de diez o más datos en un sitio de muestreo. La barra amarilla en cada columna representa el promedio de cada unidad.

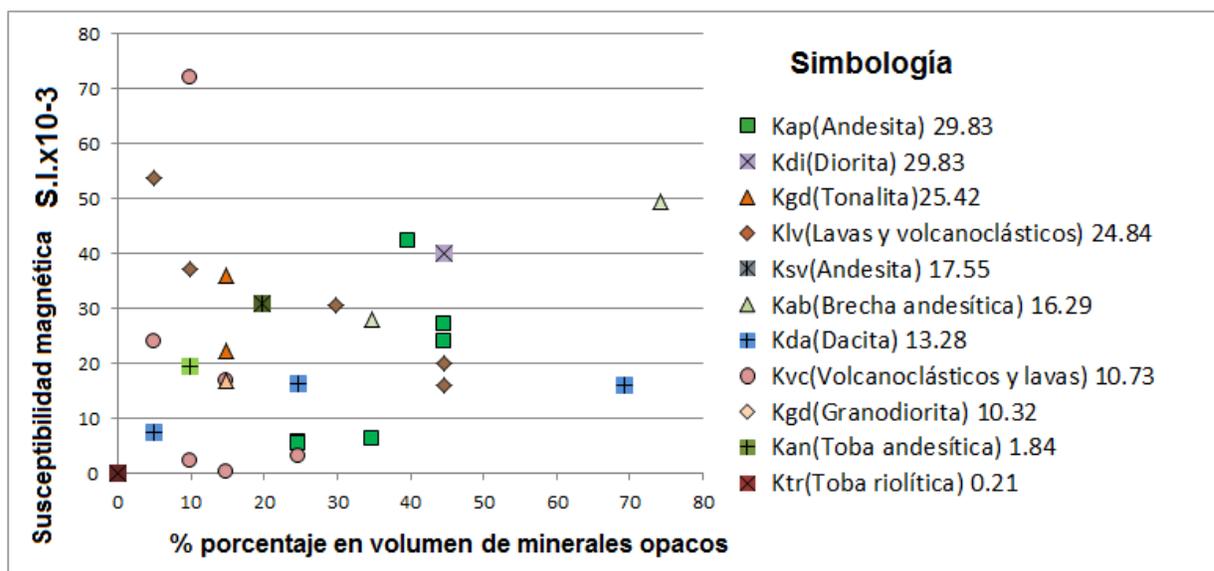


Figura 23. Relación entre susceptibilidad magnética medida en los afloramientos de las unidades litológicas *versus* porcentaje en volumen de óxidos (minerales opacos) en lámina delgada.

Tabla 7. Susceptibilidad magnética y volumen por ciento de minerales opacos identificados en láminas delgadas de muestras representativas de las distintas unidades litológicas.

Muestras (clave)	Clasificación petrográfica (unidad)	Coordenadas UTM WSG 84		Suscep. magnética (SI x10 ⁻³)	% Volumen de min. Opacos
		Este	Norte		
EN-1-X-16	Dacita (Kda)	536845	3530828	16.37	6
EN-6-II-17	Brecha intrusiva (Kda?)	532085	3536415	16.12	15
EN-8-III-17	Dacita (Kda)	534201	3533706	7.36	2
EN-2-XI-16	Andesita porfídica (Kap)	537630	3531332	27.33	10
EN-2-II-17	Brecha andesítica (Kap)	532114	3529015	5.73	6
EN-3-II-17	Andesita porfídica (Kap)	532110	3529010	6.22	8
EN-4-II-17	Andesita porfídica (Kap)	533532	3528566	24.08	10
EN-12-II-17	Andesita afanítica (Kap)	534341	3528950	42.21	9
EN-3-VIII-17	Hornfels de hornblenda (Kab)	529396	3528495	5.57	6
EN-8-X-16	Granodiorita (Kgd)	538276	3531570	16.85	4
EN-1-XI-16	Meta ignimbrita (Klv)	537588	3531324	19.91	10
EN-13-II-17	Litarenita volcánica (Klv)	534334	3228964	15.93	10
EN-15-II-17	Toba cristalina soldada (Klv)	536130	3529442	30.69	7
EN-2-III-17	Toba cristalina soldada (Klv)	536086	3529388	53.85	2
EN-3-III-17	Toba cristalina soldada (Klv)	536135	3529496	37.17	3
EN-1-II-17	Meta ignimbrita (Kvc)	531020	3529831	16.92	4
EN-9-II-17	Brecha piroclástica (Kvc)	533866	3528760	0.26	4
EN-11-II-17	Brecha tobácea (Kvc)	534093	3528872	2.35	3
EN-5-III-17	Esquisto qzfld (Kvc)	539445	3531901	72.22	3
EN-6-V-17	Lapilli acrecional (Kvc)	536882	3531375	24.13	2
EN-2-VIII-17	Brecha tobácea (Kvc)	531256	3534055	3.12	6
EN-5-II-17	Meta toba (Kan)	532100	3536420	19.43	3
EN-1-VIII-17	Tonalita (Kgd)	540304	3531763	22.3	4
EN-7-III-17	Tonalita (Kgd)	539699	3531921	36.08	4
EN-10-II-17	Brecha andesítica (Kab)	534072	3528846	28.13	8
EN-14-II-17	Brecha andesítica (Kab)	534822	3529252	49.62	16
EN-8-II-17	Dique andesítico porfirítico (Ksv)	533787	3528781	30.78	5
EN-9-III-18	Toba Riolítica (Ktr)	538955	3533380	0.16	1
EN-4-VIII-17	Diorita (Kdi)	536851	3529562	40.1	10

los valores de susceptibilidad magnética al aumentar el porcentaje de óxidos. Los valores bajos de K_{lv} y K_{vc} pueden deberse a la naturaleza clástica en algunos sitios de muestreo.

La Figura 24 muestra las mediciones de susceptibilidad magnética de un sill (19-25 $S_{10^{-3}}$) de 0.5 m de anchura y de la roca encajonante (0.27-0.73 $S_{10^{-3}}$) al oeste de la cañada Chavira. Estas unidades arrojan un contraste de susceptibilidad magnética positivo de un orden de magnitud entre ellas. Se observa que las rocas de arriba y abajo de sill tienen susceptibilidades similares, por lo que se interpreta que son la misma unidad litológica (K_{vc} ; brecha tobácea). El sill es un dique andesítico porfirítico (K_{sv}).

La sección de susceptibilidad magnética que se presenta en la Figura 25 a y b inicia al poniente del Libramiento Ensenada y termina al oriente del cañón La Cascada. La sección contiene 39 estaciones (marcadas con círculos rellenos en color rojo) en donde se tomaron diez o más datos en promedio. En la Figura 25b se muestra el perfil de susceptibilidad magnética promedio de las unidades litológicas a lo largo de las estaciones. Se observa que aunque los valores son dispersos, las variaciones laterales de susceptibilidad magnética concuerdan con los cambios litológicos. Esto se destaca en la sección de la Figura 25b, donde se observa que los valores de susceptibilidad magnética a partir de la estación 20 disminuye de forma brusca con respecto a la estación 19. Este cambio abrupto indica un contacto litológico o una falla que pone en contacto litologías contrastantes. La dispersión se atribuye a que varias unidades están intersectadas por fallas, así como por el grado de alteración o cercanía con el plutón. La formación de magnetita en algunos hornfels se sugiere que se formó como consecuencia del metamorfismo de contacto (Kotny y Dietl, 2002), como por ejemplo al norte del pE, donde los valores de susceptibilidad magnética promedian 72.22 $S_{10^{-3}}$ (lámina delgada EN-5-III-16, Tabla 7) en esquistos cuarzo feldespáticos y hornfels de protolito volcánico. Allí se observó magnetita amorfa de <1.5 cm. A su vez, algunas fallas presentan desarrollo y precipitación de arcillas y epidota, disminuyendo su susceptibilidad magnética por la argilitización debido al hidrotermalismo. La disminución de susceptibilidad magnética en las rocas volcánicas puede ser el reflejo de los efectos de alteración en minerales accesorios magnéticos, como la magnetita (Hrovda et al., 2009).

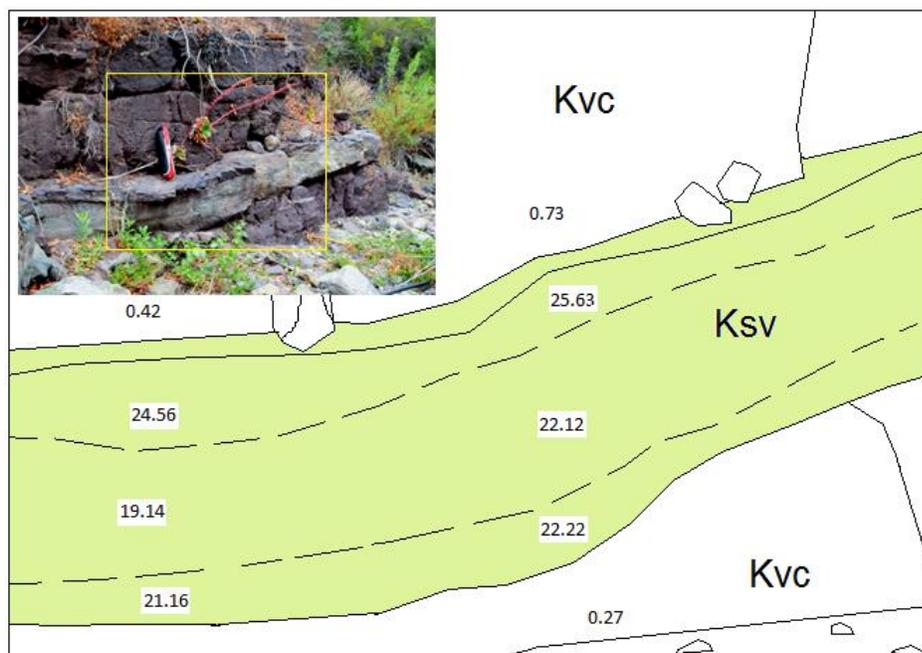


Figura 24. Datos de susceptibilidad tomados en un sill andesítico (Ksv) y las rocas volcanoclasticas encajonantes (Kvc). Nótese que el contraste de susceptibilidad magnética entre estas rocas es de un orden de magnitud. El objeto rojo tiene una longitud de 50 cm. Abreviaturas: Kvc; brecha tobácea, Ksv; dique andesítico.

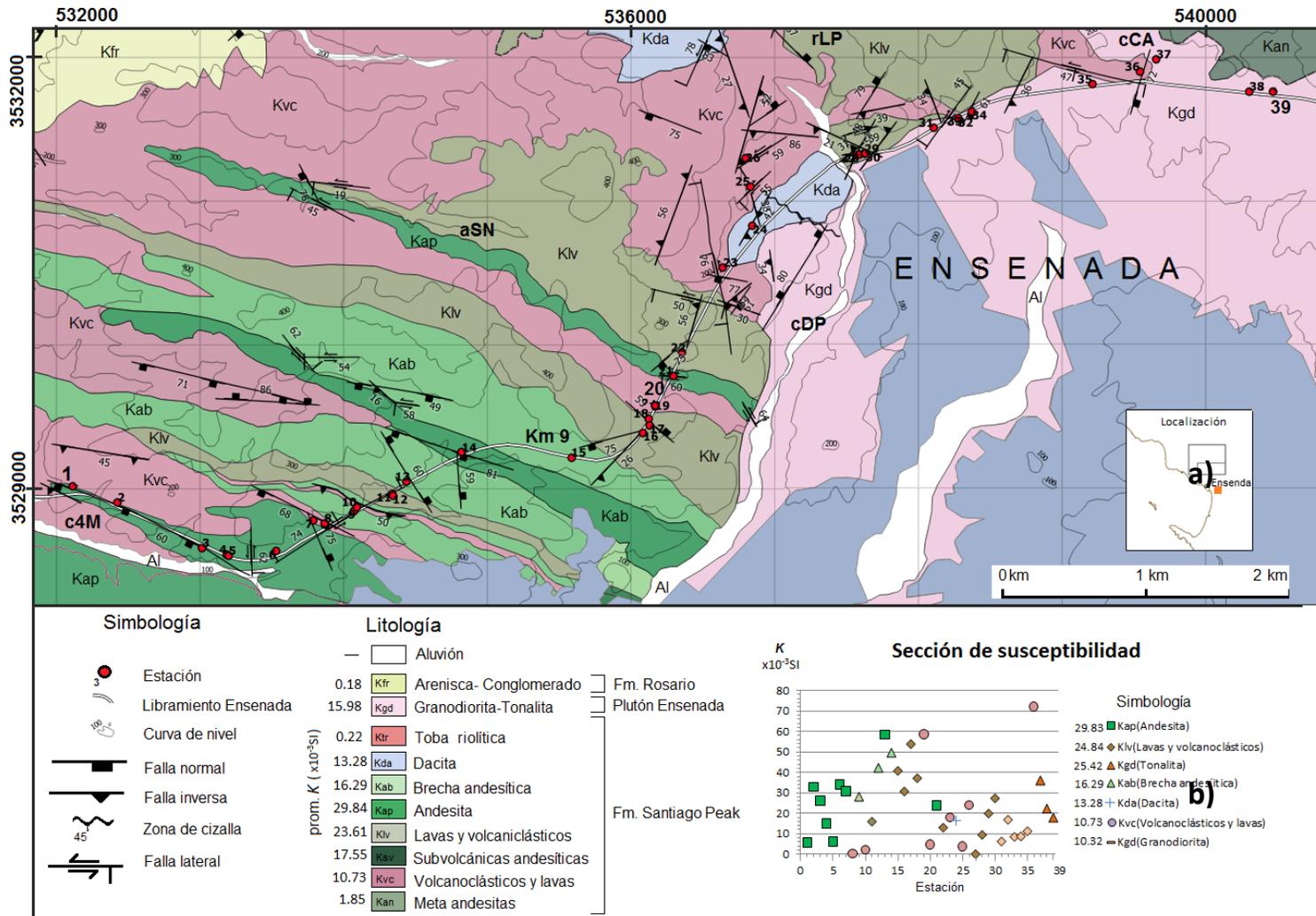


Figura 25. Mapa geológico (a) y sección de susceptibilidad magnética (b), a lo largo de un segmento del Libramiento Ensenada. Se puede observar una zona con mayor valor a partir de la estación 13 a la 18, que está asociada a la litología. Abreviaturas significan: aSN, arroyo sin nombre; c4M, cañ6n Cuatro Milpas; Km9, kil6metro nueve; rLP, rancho Los Pinales; cDP, cañ6n Doña Petra; cCA, cañ6n La Cascada.

5.2 Descripción del mapa de anomalía magnética residual

El mapa de anomalía magnética residual se muestra en la Figura 26, presenta el campo terrestre reducido más un filtro pasa altas de 500 Km. Esta figura es una porción del mapa magnético de Norteamérica (NAMAG), abarca un área más grande que la zona de estudio (cuadro central con litología). Este mapa se caracteriza por un bajo o mínimo magnético elipsoidal con su eje principal en dirección NW-SE. En los flancos Norte, Sur y Este de dicho bajo se forman anomalías dipolares (separadas por barras en color rojo) con sus ejes, también en dirección NW-S. Sus altos se asocian con afloramientos de rocas plutónicas. Los valores de intensidad magnética bajos coinciden con las rocas volcánicas de la Fm. Santiago Peak y con rocas estratificadas, que corresponden al área entre SAM y Ensenada. En cuanto a las anomalías dipolares, la que se observa al NW del área de estudio está relacionada con el plutón San Antonio de las Minas, el cual tiene susceptibilidades promedio $27.75 \times 10^{-3} \text{SI}$; una característica de esta anomalía es que el contorno cero (0 nT) coincide aparentemente con la separación entre las rocas del sur de San Antonio de las Minas, caracterizadas por la poca cantidad o volumen de rocas de la unidad Kvc (promedio de 10.73×10^{-3} unidades) y las rocas de la unidad Kan (1.85×10^{-3} promedio). Estos datos nos llevan a considerar que la señal del plutón SAM es intensa y ensombrece la respuesta de las unidades Kan. El plutón Ensenada, que aflora al SE del área de estudio, está conformado por altos magnéticos de intensidad magnética diferente, que se atribuyen a la variación litológica entre tonalita y granodiorita o se encuentra segmentado por fallas. Tanto los valores de intensidad magnética como los datos de susceptibilidad magnética indican que el contacto entre sus bordes (Kgd: $k_p = 15.08 \times 10^{-3}$) y las unidades volcánicas (Kvc: $k_p = 10.73 \times 10^{-3}$; Klv: $k_p = 23.61 \times 10^{-3}$) son difusos ya que presentan un débil contraste magnético a diferencia del contraste tan marcado en intensidad y susceptibilidad magnética que se observa entre el plutón SAM y las unidades volcánicas.

5.3 Descripción del mapa de anomalía magnética reducida al polo

La reducción a polo es un proceso aplicado a las anomalías magnéticas para fijar las fuentes magnéticas en su posición física verdadera. El mapa de anomalías magnéticas reducido al polo se muestra en la Figura 27. En este mapa se pueden observar cambios con respecto al mapa de anomalía magnética. El primer cambio corresponde al remplazo del dipolo ubicado al NE del plutón Ensenada de anomalía caracterizada por un alto magnético podría indicar un cuerpo más máfico que el plutón Ensenada. El dipolo observado en el área del plutón Ensenada continúa, pero se desplaza hacia el norte. El dipolo que se ubica en la parte norte de San Antonio de las Minas, se define más cercano al contacto del borde del plutón San Antonio de las Minas. El bajo magnético que antes del filtrado se encuentra entre el área de la localidad de El Sauzal y el plutón Ensenada se reduce en área, definiendo mejor el dipolo que se ubica sobre el plutón Ensenada y concordando mejor con el contacto entre rocas de la Fm. Santiago Peak y el plutón.

5.4 Descripción del mapa de señal analítica

La Figura 28 muestra el mapa de amplitud de señal analítica de las anomalías magnéticas reducidas al polo. Este mapa resalta anomalías producidas por discontinuidades geológicas de mediana a corta longitud de onda, caracterizados por lineamientos de máximos de amplitud de la señal analítica. Se observa que el carácter dipolar de las anomalías magnéticas reducidas al polo ha desaparecido, facilitando su interpretación. Y como el rango de valores de amplitud de la señal analítica va de 1nT/m a 0.05 nT/m, el mapa, para su interpretación, se separó en cuatro unidades magnéticas denominadas 1, 2, 3 y 4.

La unidad 1, se caracteriza por valores de amplitud bajos que van de 0.05 a 0.15nT/m, presenta anomalías alargadas con cierres semicirculares que sugieren cuerpos de geometrías tabulares con anchuras mayores a 6 km² y semiesféricos pequeños de 1-4 km². Esta unidad está asociada a rocas sedimentarias, volcánicas, volcanoclásticas o metamórficas en cuerpos estratificados. Las anomalías semicirculares pequeñas (<1 km²) podrían constituir unidades volcánicas con magnetización muy baja o nula.

La unidad 2 abarca la porción centro-oeste del área de estudio, tiene valores de amplitud moderados que van de 0.20 a 0.25nT/m. Se encuentra una anomalía cerrada alargada en dirección hacia el norte terminando al oeste del poblado de San Antonio de la Minas. Su porción sur delimita con una zona ancha de gradiente suave en dirección NW-SE que coincide con afloramientos de unidades volcánicas alargados

y fallas cartografiadas, ambas con la misma orientación, sugiriendo que existe control estructural. Los contactos litológicos entre las unidades volcánicas y los plutones, tanto el de San Antonio de las Minas como el de Ensenada, se asocian con zonas de gradiente intenso, que podrían deberse a fallas con dirección NE-SW que cortan a las unidades volcánicas alargadas.

La unidad 3, con valores intermedios que van de 0.30 a 0.35 nT/m, se caracteriza por anomalías elipsoidales localizadas al N y SW del área mapeada. A la primera se asocia una posible apófisis del plutón San Antonio de las Minas pues su forma semicircular y cercanía a éste. La segunda posiblemente represente un plutón de menor tamaño que el plutón Ensenada.

La unidad 4 corresponde a valores altos mayores a 0.35 nT/m, que está caracterizado por anomalías circulares de gradientes pronunciados con formas aisladas al oriente y compuestas al norte y sur del mapa, respectivamente. Las anomalías observadas al norte y al sur coinciden con afloramientos de los

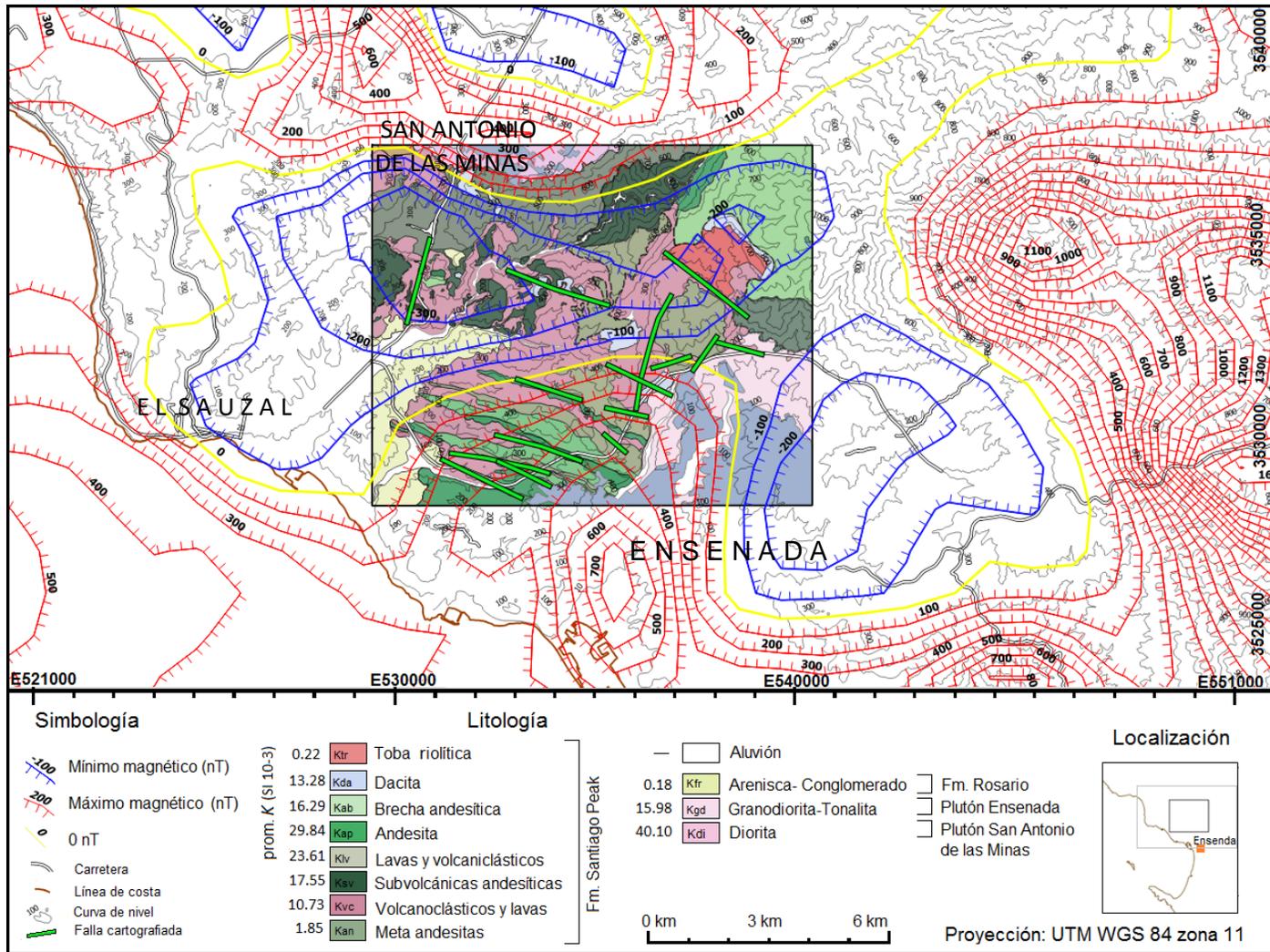


Figura 27. Mapa de anomalía magnética reducida al polo. Contornos cada 100 nT. Abreviatura: Prom. K, susceptibilidad magnética promedio.

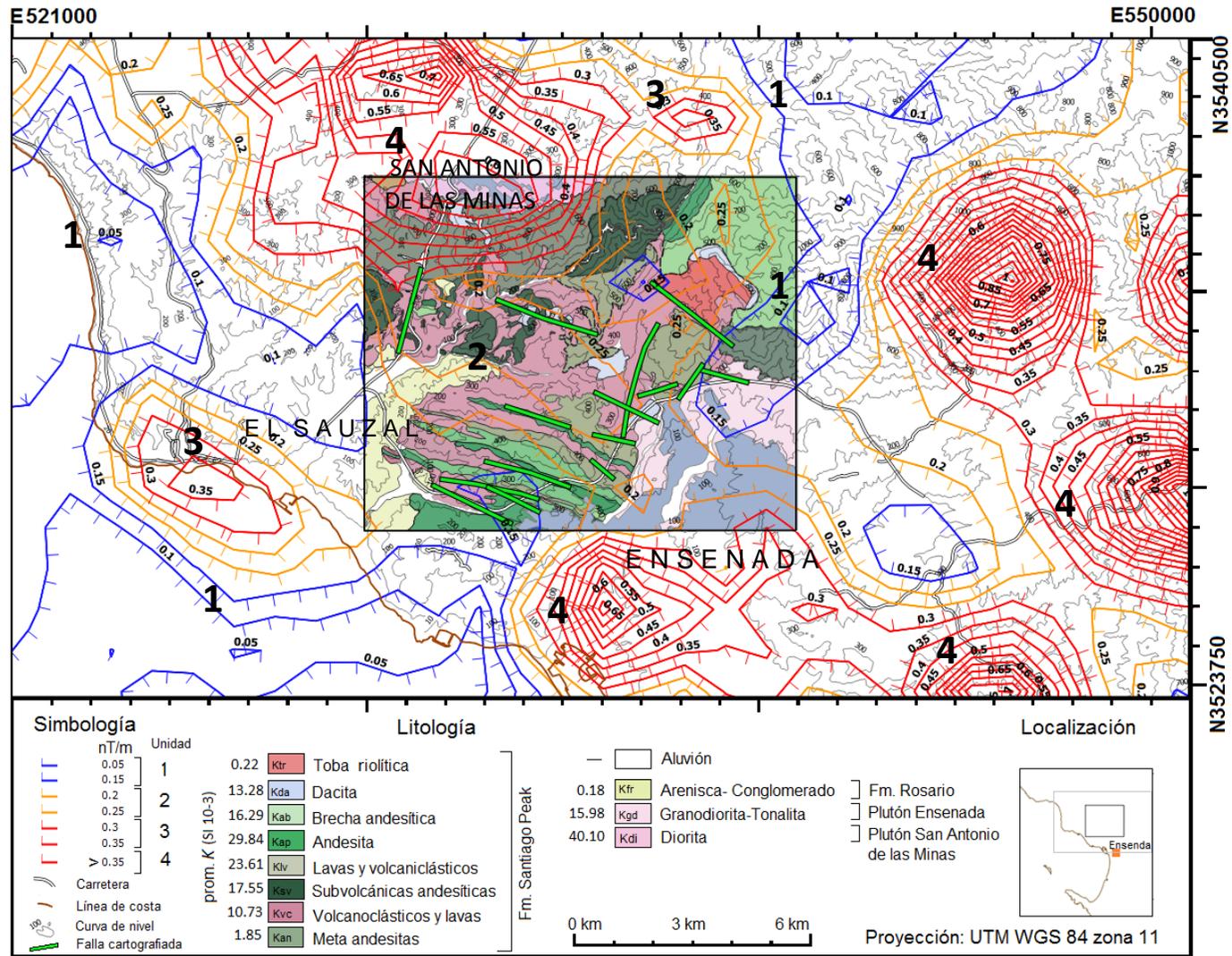


Figura 28. Mapa de amplitud de señal analítica Contornos cada 0.05 nT/m. Abreviaturas: Prom. K, susceptibilidad promedio 1-2-3-4, unidades magnéticas

plutones San Antonio de las Minas y Ensenada, por lo que se infiere que las otras anomalías observadas también se deben a cuerpos plutónicos.

5.5 Descripción del mapa de gradiente horizontal direccional

Los gradientes horizontales son útiles para la localización de los bordes de fuentes magnéticas ya que permiten registrar cambios en el campo magnético. Se calculan mediante la aplicación por convolución de un filtro de tres puntos a los datos magnéticos en una dirección específica mediante una aplicación de Geosoft. La finalidad de hacer este tipo de filtrado de datos fue para realzar lineamientos de anomalías magnéticas reducidas al polo en la dirección de los sistemas de fallas regionales y extrapolar sus rasgos al área de estudio. La dirección que se seleccionó para aplicar el filtro de gradiente horizontal fue N45°W, que es el rumbo promedio de las fallas regionales principales. La Figura 29 muestra los resultados. Una forma de evaluar que los lineamientos de gradiente horizontal tuvieran correlación con las estructuras conocidas, se ejemplifica en el caso de la falla Agua Blanca (1, en la Figura 29) donde zonas positivas y negativas (marcadas con líneas gruesas en color negro) de gradiente intenso se alínean con su trazo superficial (marcado con línea en color rojo, así como otras fallas indicadas con los números 2 al 4). A partir de esta correlación, se marcaron otros lineamientos magnéticos que podrían significar posibles rasgos estructurales que indicaran la continuación de las fallas regionales hacia el NW, como es el caso de la falla Tres Hermanos (2, en la Figura 29), que aparente converge hacia el área de estudio. Es comprometido indicar qué lineamiento magnético es la continuación de su trazo, ya que los lineamientos inferidos en conjunto forman una amplia zona de deformación o cizalla. La Figura 30 es una ampliación de la zona de estudio, en la cual se aprecia mejor la convergencia de los lineamientos magnéticos regionales inferidos. Se observa que éstos aparentemente están desplazados por fronteras lineales (líneas en color rosa) en dirección NE-SW, interpretadas como posibles fallas transcurrentes con desplazamiento derecho en el oeste, e izquierdo en el este. Es de interés la que cruza la porción suroriente del área de estudio pues, aparentemente, corta las estructuras cartografiadas (líneas color verde), sugiriendo que las fallas transcurrentes son recientes y pueden involucrar rotaciones.

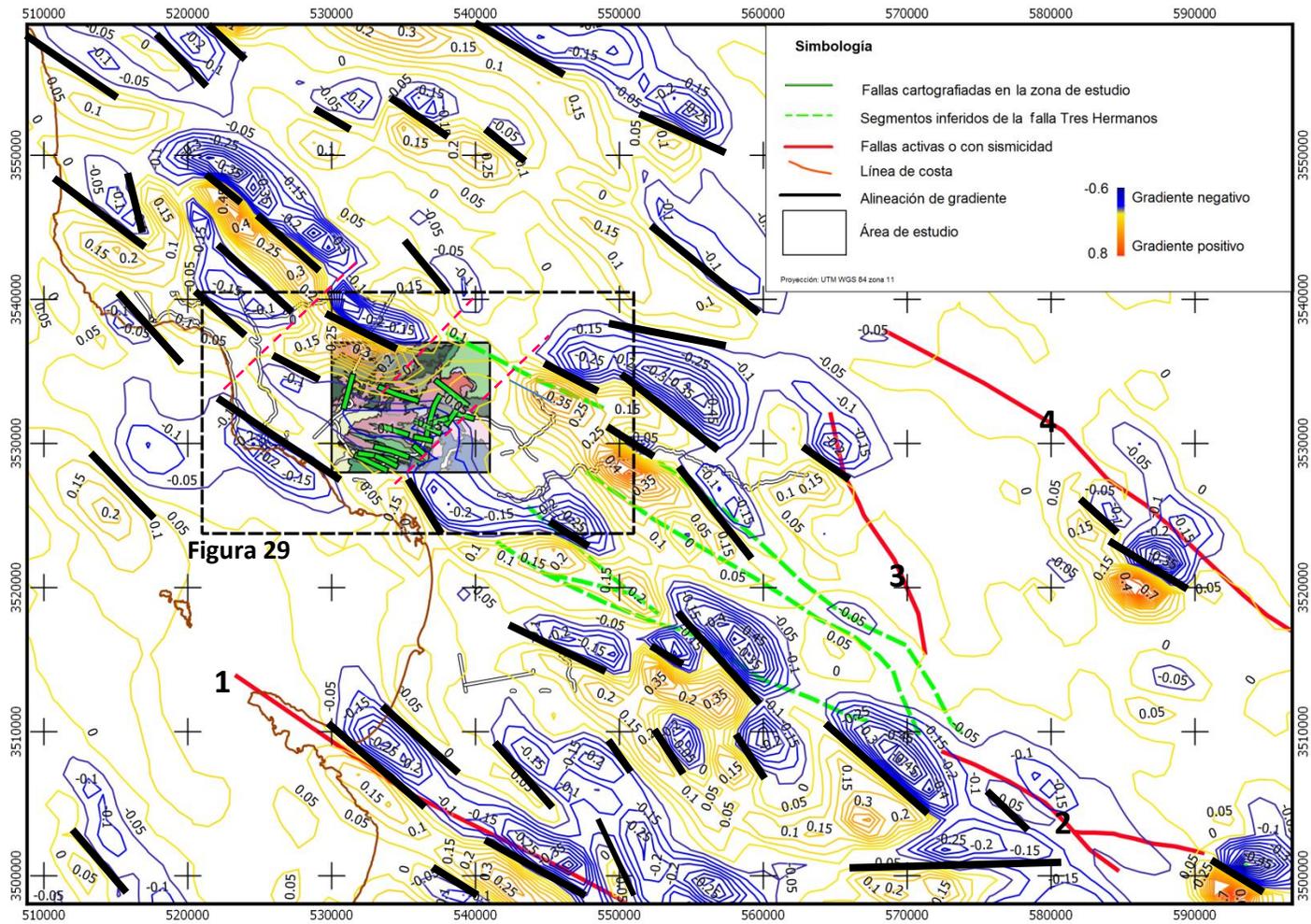


Figura 29 Mapa regional de gradiente horizontal realizado a $N45^{\circ}E$. Contornos cada 0.05 nT/m . El cuadro externo en línea discontinua es el área de los mapas de anomalías reducidas al polo y amplitud de la señal analítica de las figuras 22 y 23, respectivamente. Destaca la alineación de los gradientes magnéticos NW- SE posiblemente relacionados con fallas regionales y cuerpos plutónicos. Las líneas rojas discontinuas cortan a los lineamientos magnéticos. Fallas regionales: 1, Agua Blanca; 2, Tres Hermanos (Chadwick, 1978); 3, Ojos Negros (Cruz-Castillo, 2002); 4, San Miguel (Cruz-Castillo, 2002).

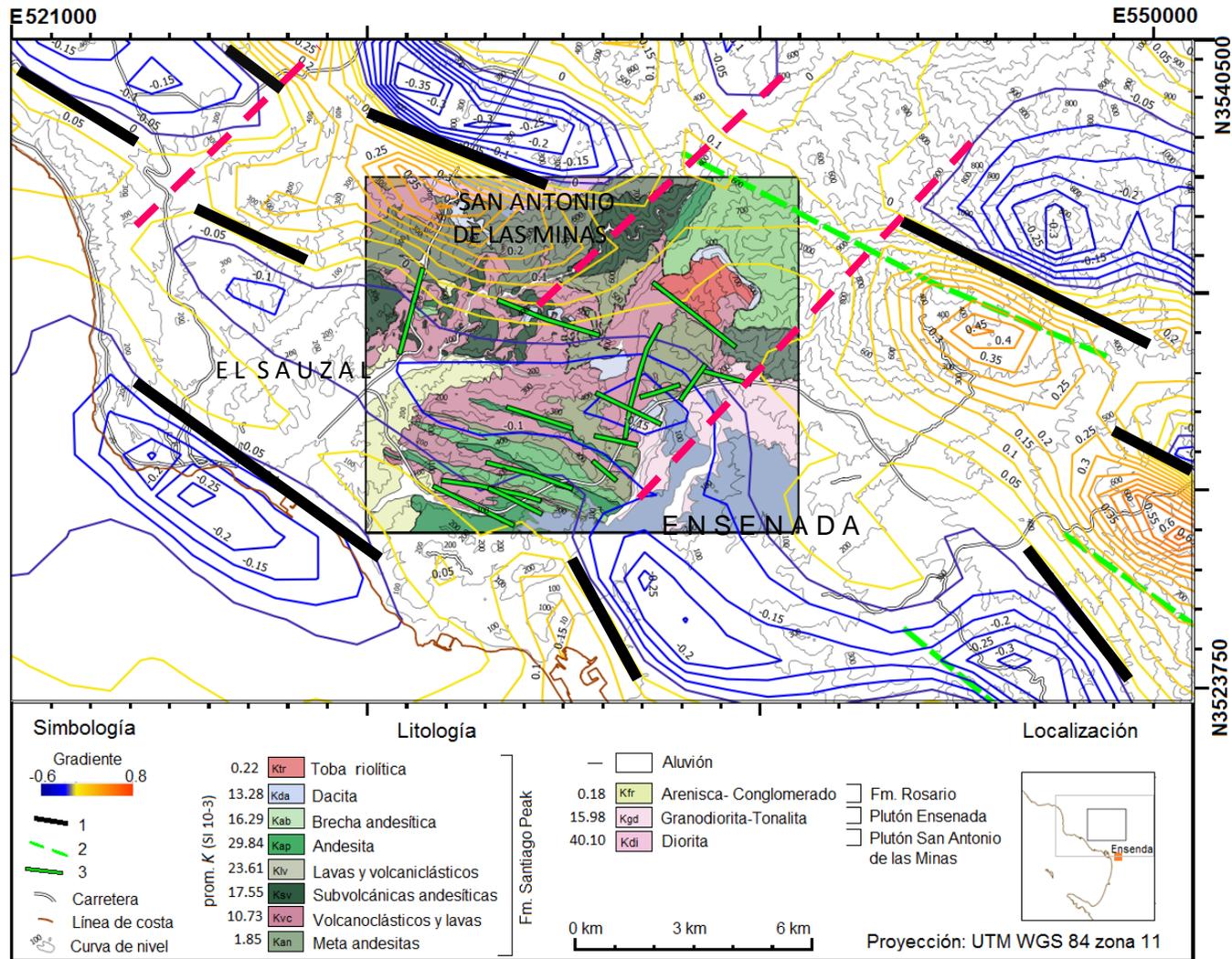


Figura 30. Ampliaci6n del mapa de gradiente horizontal direccional del 6rea de estudio (cuadro en color negro). El cuadro marcado con l6neas discontinuas corresponde al 6rea de datos de anomal6as reducidas al polo y amplitud de se6al anal6tica, figuras 26 y 27, respectivamente. 1, Alineaciones de gradiente; 2, trazas inferidas de la falla Tres Hermanos, interpretado de im6genes satelitales; 3, fallas cartografiadas en la zona de estudio, para mayor realce en el mapa se extendieron. En color rosa se muestran las l6neas que cortan a los lineamientos magn6ticos. Se observa que algunas de las fallas cartografiadas en la zona coinciden con la tendencia de la alineaci6n de gradientes regionales que se observa en la Figura 28.

Capítulo 6. Discusión

Los resultados de este trabajo se argumentan en cuatro apartados. Los primeros dos abordan las relaciones litológicas y petrográficas del área de estudio, interpretando el ambiente de una secuencia volcánica-volcanoclástica y el metamorfismo en ella. En el tercero se explican las relaciones estructurales de las fallas, discriminando cómo se generaron las del Mesozoico y las del Cenozoico. En el último se integra una historia geológica de la zona de estudio.

6.1 Relaciones litológicas

La zona de estudio puede dividirse en tres áreas según el tipo y distribución de la litología asociada con ambientes volcánicos. En estas tres áreas no está incluida el área de los plutones que intrusionan a la secuencia de asociación volcánica (Figura 30).

La primera área corresponde a la zona entre el cañón Cuatro Milpas y el arroyo Sin Nombre. La base de la secuencia en esta área está formada por rocas volcanoclásticas y la cima por lavas. Las rocas dominantes en este sector del área de estudio son, lavas andesíticas al sur y, en la parte norte, rocas volcanoclásticas con fragmentos cuyo tamaño fluctúa entre las arenas hasta las brechas con clastos menores a 20 cm. Ambos tipos de roca son equivalentes a facies proximales (Kap, Kab) y depósitos proximales-distales (Kvc, Klv). En el mapa de anomalía magnética residual la zona se encuentra en un bajo magnético con contornos relativamente separados desarrollados en rocas volcánicas con susceptibilidad magnética con un rango de valores promedio desde 10.7 hasta 29.8 S_{10}^{-3} (Figura 22).

La segunda área empieza a partir del norte del arroyo Sin Nombre hasta el sur del poblado de San Antonio de Las Minas (Figura 30). Las unidades dominantes son cuerpos subvolcánicos (diques y sills) andesíticos (Ksv) y, en menor medida, domos dacíticos (Kda). Se identifican unidades ricas en fragmentos volcanoclásticos, los cuales se caracterizan por tener brechas menores a 10 cm cambiando gradualmente hacia el norte a secuencias de tobas con un porcentaje de líticos <10% en la cima. Debido a la viscosidad alta de las rocas dacíticas de Kda, además de la presencia cercana de los sills y diques andesíticos de Ksv, el conjunto se interpreta que está asociado con facies proximales a centrales de un estratovolcán. Los depósitos de Kvc y Kan representarían facies proximales o la base de la secuencia volcánica de un campo

volcánico. La respuesta del mapa de anomalía magnética residual muestra un gradiente alto en dirección hacia el norte debido a la intensidad magnética producida por el plutón SAM, en el cual una muestra arrojó un valor promedio de susceptibilidad de $27.75 \text{ S} \times 10^{-3}$ que contrasta con la unidad de metaandesitas (Kan) que promedia $1.85 \text{ S} \times 10^{-3}$ ubicada hacia el sur.

La tercera área corresponde a la esquina superior derecha de la zona de estudio (Figura 30), la cual está separada de la segunda por el cañón Doña Petra. En ella son dominantes las facies proximales de brechas andesíticas (Kab) sobre las lavas andesíticas (Kap). El conjunto está cubierto por una secuencia de tobas de posible composición riolítica (Ktr). Las lavas dacíticas de esta zona representan facies proximales debido a que sólo se observa un afloramiento y los depósitos de Ktr representan facies distales. En este sector afloran depósitos gruesos y delgados de tobas que se interpreta que se deben a explosividad alta. La respuesta de los datos de aeromagnetometría muestra un dipolo que coincide con el plutón Ensenada y aparentemente define un límite entre las rocas de la Fm. Santiago Peak.

Poniendo en contexto litológico la primera área con respecto a las otras dos, se observa que la zona norte presenta un número considerable de unidades subvolcánicas. Los sectores del norte presentan diques, domos y *sills* asociados a facies centrales de una estructura volcánica mientras que la zona sur representa facies proximales, con depósitos volcánicos distales de fuentes que no se observan en el área. En el mapa de reducción al polo se observa un bajo magnético a lo largo de la segunda área y tercera asociado a las rocas volcánicas, mientras que la respuesta obtenida en el mapa de señal analítica muestra contornos aislados, que conforman parte de la unidad 2, observables en el cañón Doña Petra, el cual define el límite entre la primera y segunda áreas.

Es probable que la erosión de la Fm. Santiago Peak en el área de estudio sea menos profunda con respecto a la localidad tipo, pues la exposición de la secuencia metasedimentaria es mayor en la Formación Bedford Canyon en su localidad tipo ubicada al NE de las montañas Santa Ana (Herzig y Kimbrough, 2014). En la zona de estudio no se observó el basamento correspondiente a rocas metasedimentarias del Triásico-Jurásico que se reporta en California, E.U.A. por Herzig y Kimbrough (2014). La Formación Rosario formada por conglomerados entre las cimas de los cerros Tres Cuchillas y Cantil descansa discordantemente sobre la Fm. Santiago Peak.

6.2 Relaciones petrográficas

En la zona de estudio las rocas de las unidades de la Fm. Santiago Peak preservan sus texturas originales, particularmente en rocas volcánicas como dacitas y andesitas de Kap y Kda (EN-1-II-17 y EN-8-III-17, respectivamente; Tabla 4) y en rocas volcanoclásticas de las unidades Kvc y Klv (láminas EN-13-II-17 y EN-1-III-17, respectivamente; Tabla 5), con excepción de las rocas cercanas a los plutones y zonas de falla donde se observa fuerte alteración hidrotermal. Las rocas que están en contacto con el plutón Ensenada son parte de las mismas unidades anteriores, Kap, Kda, Kvc y Klv. Petrográficamente, las rocas de la Fm. Santiago Peak en la zona de estudio son andesitas y dacitas. Dos muestras correlacionables con Kvc analizadas geoquímicamente por Farquharson (2004) en rocas volcanoclásticas al sur de Ensenada arrojaron composiciones equivalentes a andesita. La mineralogía característica en los contactos con los intrusivos graníticos son cuarzo, plagioclasa, hornblenda y biotita. Como en EN-2-VIII-17 (Tabla 5), los minerales de alteración más abundantes en las rocas alejadas de los plutones entre 0.5 a 1 km son epidota, clinozoisita, sericita y clorita en rocas volcánicas. Minerales como la clorita y calcita, son más abundantes que la epidota en rocas que se encuentran a >3 km de distancia de los plutones. La mineralogía mencionada sugiere el desarrollo de ambientes hidrotermales generados por el emplazamiento de los plutones.

El conjunto de unidades de la Fm. Santiago Peak muestra diferentes grados de metamorfismo. De acuerdo con el análisis petrográfico, las rocas de composición andesítica pertenecen a la facies de subesquistos verdes y alcanzan la facies de esquistos verdes. En algunos sitios se identifica epidota, clorita, sericita y clinozoisita asociados con alteración hidrotermal producida durante la actividad volcánica, según se infiere porque los diques (unidad Ksv) cortan a las unidades Kap, Kab y Kvc (lavas, brechas andesíticas y cuerpos volcanoclásticos). Su mineralogía está poco alterada. En otros lugares del área de estudio, la epidota, clorita, sericita y clinozoisita en rocas volcánicas y volcanoclásticas posiblemente se asocian con fluidos hidrotermales en zonas de falla. En estos lugares, la epidota está en vetillas, nódulos y masas amorfas, acompañada por argilitización y silicificación selectiva.

Con respecto a la asociación entre las propiedades físicas de las rocas, estudios de petrología y de susceptibilidad magnética muestran variaciones de la susceptibilidad magnética por la formación o destrucción de minerales ferromagnéticos, principalmente magnetita y, en menor grado, al contenido de Fe de los silicatos de hierro y magnesio que son paramagnéticos (Kotny y Dietl, 2002). En el caso de esquistos cuarzofeldespáticos de la unidad Kvc (lavas y volcanoclásticos) en contacto con el plutón Ensenada (Figura 8c), la magnetita parece haberse formado por metamorfismo de contacto. En ese lugar

La susceptibilidad magnética promedio alcanza valores de 72.2×10^{-3} (Figura 25, estación 36). La aureola de metamorfismo más cercana al área de estudio está reportada por Schroeder (1968), quien define hornfels, esquistos cuarzo-feldespáticos y esquistos de hornblenda y biotita en una aureola de 1.5 km de ancho en la parte sur del plutón Ensenada.

Se puede deducir que el área es una zona donde se pueden asociar por lo menos dos eventos térmicos importantes. El primero fue producto de la actividad volcánica que generó alteración hidrotermal en las rocas andesíticas, definida por la asociación epidota-clinozoisita-prehnita-albita-clorita-sericita-opacos, de las facies metamórficas de subesquistos verdes (SEV) a esquistos verdes (EV). El segundo es de contacto asociado con la intrusión del plutón Ensenada. Los plutones pudieron generar una aureola máxima de 0.5 a 1 km.

6.3 Relaciones estructurales

La estratificación en las tres zonas tiene una orientación preferente $100^{\circ}/36^{\circ}$, con excepción de las zonas cercanas al oeste del plutón Ensenada. Se observa también que muchos de los rasgos de los lineamientos rectilíneos son paralelos a los planos de estratificación de las rocas de la Fm. Santiago Peak. La disposición de las rocas de la Fm. Santiago Peak es la de un monoclinial. En el sector A los echados son más pronunciados que en el sector B. La disposición de las rocas en la tercera zona es difícil de identificar en la parte central debido a que no hay afloramientos donde se pueda identificar la actitud de la estratificación, mientras que en la parte sur se identificó un cambio progresivo de la estratificación hasta ser casi vertical (70°), con echados hacia el SW. Las variaciones en los sectores A y B, se deben posiblemente a efectos tectónicos relacionados a un evento compresivo.

De manera general la mayoría de los datos de foliación son paralelos a los planos de estratificación (S_0), sin embargo la foliación S_1 solo sólo se observa en la periferia del plutón Ensenada y en algunas zonas de fallas. Debido a ello, la foliación está definida de manera local por este intrusivo. La foliación definida fuera de la periferia del plutón Ensenada está relacionada a zonas de fallas.

Las tendencias en la orientación de las fallas en la zona de estudio se pueden separar en tres. La primera, corresponde a fallas que en su mayoría se orientan paralelas al rumbo de la estratificación, que también coincide con la de los lineamientos rectilíneos y los lineamientos magnéticos obtenidos a partir del mapa

de gradiente horizontal. La segunda tendencia de orientaciones corresponde a fallas casi norte-sur y la tercera corresponde mayormente a fallas de desplazamiento lateral con dirección NW-SE. Las fallas normales e inversas predominan en la primera tendencia y las fallas transcurrentes son predominantemente norte-sur. De acuerdo con el análisis en los estereogramas, el sector B muestra la mayor complejidad estructural y no se observa una tendencia dominante. Una razón puede asociarse a la mayor rigidez del sector por estar cerca de un centro volcánico y el número de cuerpos intrusivos, donde las fallas posiblemente reactivadas es mayor. El sector A es estructuralmente más uniforme, la complejidad no es alta debido a que se comportó como un bloque homogéneo debido a la menor cantidad de intrusivos. El sector C es una zona en donde la deformación es menos acentuada por la presencia del plutón Ensenada y las fallas más jóvenes.

Con respecto a las fallas neogénicas y activas a nivel regional, se observa que las localizadas al norte de la zona de estudio están orientadas hacia el NW y son de desplazamiento lateral y normal (Cruz-Castillo y Delgado-Argote, 1999). Dichas estructuras se diferencian de las fallas ubicadas al SE de la zona de estudio, las cuales son fallas laterales derechas de fuerte ángulo que se propagan en dirección 320° en promedio, con buzamiento hacia el NE, como el sistema de fallas Tres Hermanos, o el sistema San Miguel-Vallecitos (Gastil et al., 1975; Chadwick, 1987; Suárez-Vidal et al., 1991; Lunceford, 2010). Esta tendencia a nivel regional también coincide con el mapa de gradiente magnético de la Figura 28.

En el área de estudio se pueden reconocer por lo menos tres eventos regionales de deformación y uno local. El primero de carácter compresivo (transpresivo?) posiblemente está asociado a la acreción del arco Alisitos con Norteamérica (Wetmore et al., 2003). El siguiente evento se asocia con la relajación de la compresión evidenciado por el desplazamiento por fallas normales de las estructuras de compresión como las fallas inversas. El último evento de deformación corresponde a las fallas asociadas al sistema San Andrés-Golfo de California. El evento local está asociado a la intrusión del plutón Ensenada que produjo en las rocas encajonantes foliación con tendencias similares a la estratificación en la zona norte, mientras que en la zona oeste es perpendicular al rumbo de la estratificación.

6.4 Historia geológica

La historia geológica de la Fm. Santiago Peak en la zona de estudio se explica en cinco episodios, iniciando con la formación de la primera unidad hasta el Cretácico Tardío. En la Tabla 8 se sintetizan los episodios con sus respectivos eventos.

El primer episodio corresponde a la depositación de la unidad Kan. Esta unidad está constituida por depósitos subacuáticos asociados a material fino (cenizas volcánicas) de fuentes volcánicas distales al lugar del depósito, de los cuales se desconoce su fuente. Posteriormente, prevalecería un ambiente subaéreo donde se depositarían ignimbritas y lavas andesíticas. Estos depósitos se consideran anteriores al volcanismo sobre las que se forman las rocas volcánicas del segundo episodio.

El segundo episodio corresponde al origen de un conjunto de edificios volcánicos, formándose las unidades restantes de la Fm. Santiago Peak: Kvc, Klv, Kap, Kab, Ksv, Kda y Ktr. Estas unidades fueron originadas por series de eventos explosivos, efusivos e intrusivos que conformarían los flancos y la parte profunda de un estratovolcán. Las rocas de este episodio se dividen en dos grupos: a) las que formaron los flancos de un conjunto de edificios volcánicos, Kvc, Kap, Kab, Klv y Ktr, asociado con eventos explosivos y efusivos y b) el grupo de rocas que conforman los conductos y reservorios volcánicos, Ksv y Kda, asociados con eventos intrusivos y efusivos.

La unidad Kvc representa un conjunto de materiales explosivos y aglomerados originados por actividad posiblemente estromboliana a subpliniana, intercalada con lavas de Kap y areniscas volcánicas de Klv. Estas unidades en la parte centro-sur de la zona de estudio corresponderían a los flancos de un edificio volcánico, mientras que las lavas andesíticas más alejadas en la parte al sur, fueron originadas por eventos efusivos voluminosos. En la parte norte la unidad, Kvc forma la base del edificio volcánico y Klv forma los flancos de edificios volcánicos. Las brechas andesíticas son, en parte, resultado de la erosión de los depósitos principalmente de lavas andesíticas y eventos estrombolianos. El evento final en este episodio está conformado por las rocas correspondientes a la unidad Ktr, que están asociadas a un evento explosivo de otras fuentes volcánicas no visibles en la zona de estudio. Esta unidad corresponde al último depósito volcánico durante el Cretácico Temprano que aflora en la zona de estudio.

En el segundo grupo de rocas, la unidad Ksv representa conductos y reservorios andesíticos: cuellos volcánicos, diques y *sills*, y posiblemente pequeñas cámaras magmáticas cercanas a la superficie representados por *plugs*. Varios de estos *sills* cortan a diques de la misma unidad y otros diques cortan a

la unidad Kap sugiriendo una actividad volcánica constante. Posiblemente algunas lavas de la unidad Kap al sur de la zona de estudio fueron extrudidas de reservorios de Ksv de la zona norte. Posteriormente, la unidad Ksv fue cortada por conductos dacíticos de la unidad Kda. Las dacitas de Kda en la parte occidental norte forman cuellos y domos y, los que se encuentran en la parte central y oriental corresponden a derrames dacíticos. Los cuellos dacíticos en este episodio representan centros volcánicos. Durante este periodo la actividad volcánica generó fluidos hidrotermales que propiciaron un metamorfismo de la facies de subesquistos verdes en la Fm. Santiago Peak.

El tercer episodio ocurre con un evento de deformación compresivo y posteriormente uno de relajamiento (extensional). El proceso que generó fallas inversas en la zona de estudio, se atribuye a la acreción de arco Alisitos al borde continental (Wetmore et al., 2003). Posiblemente durante este periodo se definió el monoclinal que se tiene en la parte central de la zona de estudio, seguido después de un periodo de relajamiento representado por fallas normales que cortan a las fallas inversas principalmente en la parte sur de la zona de estudio.

En el cuarto episodio, la intrusión del plutón Ensenada metamorfizó las rocas de la Fm. Santiago Peak formando una aureola de <0.5 a 1 km. Las rocas >1 km están en la frontera de la facies de esquistos verdes y subesquistos verdes. Se desarrolló en este periodo una foliación local en las rocas encajonantes del plutón Ensenada.

El último episodio corresponde a la exhumación del CBP a finales del Cretácico es responsable de la erosión intensa y el depósito de la Fm. Rosario.

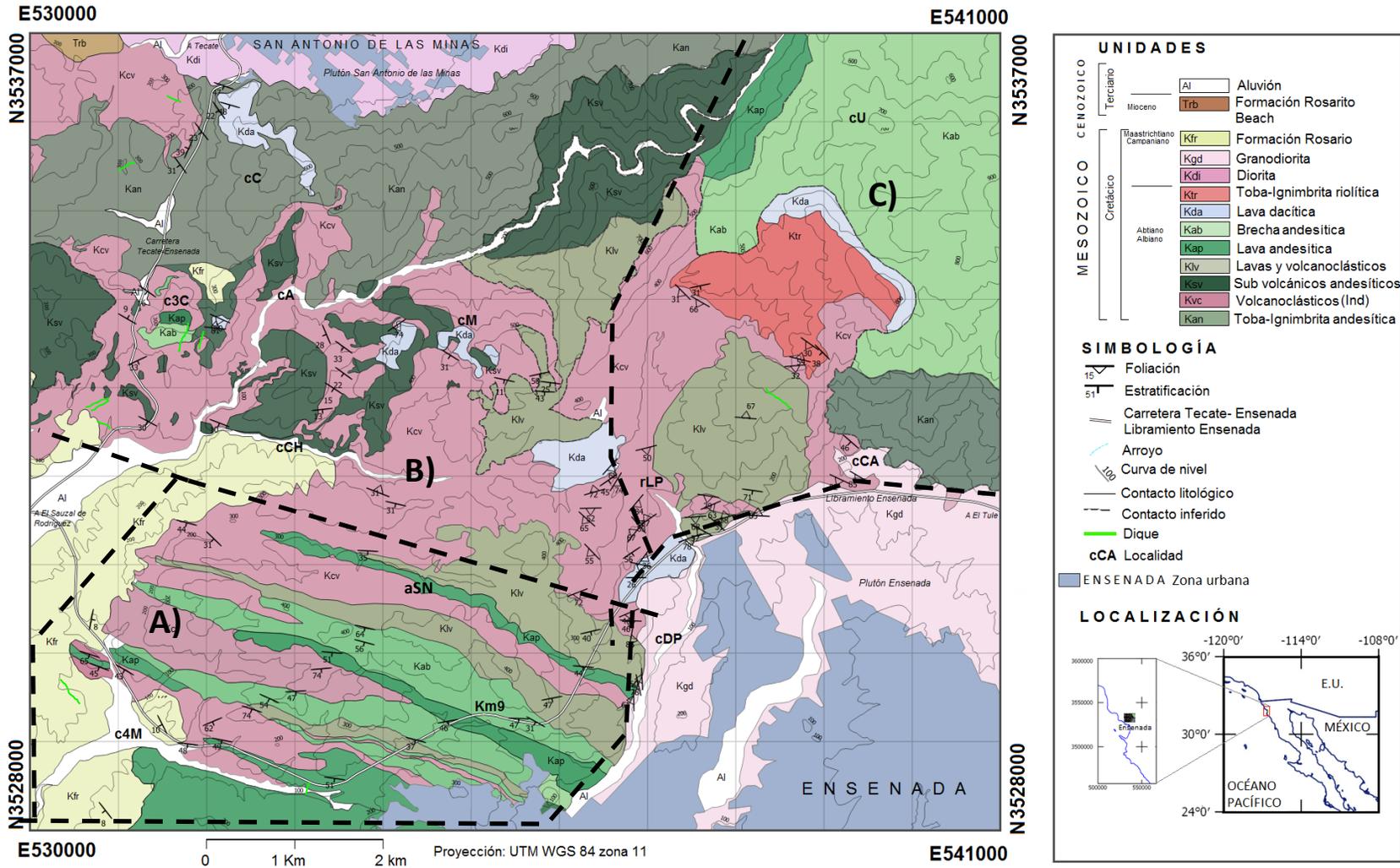


Figura 31. Mapa geológico de la zona de estudio. Abreviaturas: cC, cerro Cantil; c3C, cerro Tres Cuchillas; cA, cañón Arce; cCH, cañada Chavira; cM, cerro Miracielo; aSN, arroyo Sin Nombre; c4M, cañón Cuatro Milpas; Km9, kilómetro 9; rLP, rancho Los Pinales; cDP, cañón Doña Petra; cCA, cañón La Cascada; cU, cerro de Ulloa. Los incisos A), B) y C) representan las áreas mencionadas en el capítulo de Discusión.

Tabla 8. Esquema que representa los episodios que ocurrieron desde el primer depósito de la Formación Santiago Peak hasta el Cretácico Tardío en la zona de estudio

Ep.	Tipo de evento	Unidad	Ambiente	Facies	Litología	Actividad Volcánica	Deformación	Comentarios
1	1.-Explosivo	Kan	Subacuático	Distales	Tobas andesíticas	Subpliniana	-	Primer depósito de la Fm. Santiago Peak
	2.-Explosivo y efusivo	Kan	Subaéreo	Proximal	Ignimbritas y lavas andesíticas	Subpliniana y efusiva	-	
2	1.-Explosivo	Kvc	Subaéreo	Proximal	Brechas tobáceas y tobas líticas	Subpliniana a estromboliano	-	Primera generación de subvolcánicas de Ksv más hidrotermalismo
	2.- Intrusivo	Ksv	Hipabisal	Proximal a central	Diques andesíticos	Subvolcánica	-	
	3.-Explosivo y efusivo	Klv	Subaéreo	Proximal	Areniscas volcánicas y lavas andesíticas	Efusiva y estromboliana	-	
	4.-Efusivo	Kap	Subaéreo	Proximal	Lavas andesíticas	Efusiva	-	
	5.-Intrusivo	Ksv	Hipabisal	Proximal a central	Diques y sills andesíticos	Subvolcánica	-	Segunda generación de subvolcánicas de Ksv, más hidrotermalismo
	6.-Erosivo y explosivo	Kab	Subaéreo	Proximal	Brechas andesíticas	Erosión y estromboliana	-	
	7 .Intrusivo y efusivo	Kda	Subaéreo	Central a proximal	Lavas dacíticas	Efusiva y sub volcánica	-	Hidrotermalismo
	8.-Explosivo	Ktr	Subaéreo	Distal	Tobas riolíticas	Subpliniana	-	
3	1.-Compresivo	Kan-Krt	-	-	-	-	Compresiva	Fallas inversa, formación de monoclinas
	2.-Post compresivo	Kan-Krt	-	-	-	-	Relajación	Fallas normales
4	1.-Intrusivo y de metamorfismo	Kgd y Fm. Santiago Peak	Plutónico	-	Granodiorita a tonalita (pE) Tonalita a Diorita (pSAM). Hornfels y esquistos cuarzo feldespáticos. Cambio de	-	Foliación S1	Foliación local en los borde de los plutones y Metamorfismo de contacto hidrotermal
5	1.-Erosivo	Kgd	Subaéreo	-	-	-	-	Exhumación del CBP y erosión de la Fm Santiago Peak
	2.-Deposito de litoral	Kfr	Sed. Mixto	Fm. Rosario	Areniscas y conglomerados	-	-	

Capítulo 7. Conclusión.

- 1.- En la zona de estudio, entre las localidades de San Antonio de las Minas y la ciudad de Ensenada, afloran rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Santiago Peak. Dicha Formación fue dividida en ocho unidades litológicas, de las cuales tres son volcánicas y cinco volcanoclásticas, interpretándose como facies volcánicas proximales y centrales a partir de un modelo de estratovolcán según sus características texturales y estructurales.
- 2.- Con base en la interpretación de facies volcánicas proximales y centrales se infiere la existencia de la parte más profunda de una estructura volcánica tipo estratovolcán en el norte de la zona de estudio.
- 3.- Las rocas de la Formación Santiago Peak registran al menos dos eventos metamórficos. Fueron intrusionadas por los plutones del Cinturón Batolítico Peninsular promoviendo el desarrollo de hornfels en los contactos del plutón Ensenada, principalmente en las rocas andesíticas y volcanoclásticas dacíticas. Se identifica que la aureola de metamorfismo tiene entre 0.5 a 1 km, definida por la presencia de hornblenda y biotita de origen metamórfico.
- 6.- La disposición de los estratos de la Fm. Santiago Peak forma un monoclinal con rumbo NW-SE buzando hacia la SW. La foliación sigue la tendencia de la estratificación, con excepción de las zonas afectadas por los intrusivos.
- 7.- Se observaron tres tendencias principales en la orientación de lineamientos que coinciden con tres tendencias de fallas que, en orden de abundancia son: 100°-125°, 20°-40° y 50°-70°.
- 8.- La zona de estudio está afectada por una deformación frágil que comprende desde finales del Mesozoico hasta el Presente.
- 9.- Los valores de susceptibilidad magnética en las rocas de la zona de estudio presentan valores bajos asociados a zonas de falla y alteración hidrotermal.

- 10.- Del mapa de anomalía magnética reducido al polo de los datos de aeromagnetometría se observa que los bajos magnéticos coinciden con las rocas volcánicas y volcanoclásticas mientras que los altos se asocian con las rocas plutónicas.

- 11.- Del análisis del mapa de señal analítica se identifican cuatro unidades litomagnéticas que corresponden a secuencias de rocas volcanoclásticas de bajo gradiente y cuerpos intrusivos plutónicos con alto gradiente.

- 12.- Con el mapa de gradiente horizontal realizado a $N45^{\circ}E$ en el mapa de anomalías magnéticas reducida al polo, se observó que existe una buena correlación entre los lineamientos magnéticos de los gradientes con las fallas regionales y los cuerpos plutónicos de la zona de estudio.

Literatura citada

- Adams, M. A. (1979). Stratigraphy and petrology of the Santiago Peak Volcanics east of Rancho Santa Fe, California. M.Sc. thesis, San Diego State University, San Diego, CA, 123 p.
- Allen C., Silver L. and Stehil F. (1960). Agua Blanca fault--a major transverse structure of northern Baja California, Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 71, p. 457-482.
- Allison, E. C., (1974). The type Alisitos Formation (Cretaceous, Aptian-Albian) of Baja California and its bivalve fauna, in G. Gastil, and J. Lillegraven, eds., Geology of peninsular California, American Association of Petroleum Geologists, Pacific Section, p. 20-59.
- Allmendinger, R. W. (2016). Modern structural practice a structural geology laboratory manual for the 21st century. <http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/structure-lab-manual/> v.1.6.0 c.
- Allmendinger, R. W., Cardozo, N. C., and Fisher, D. (2013). Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors: Cambridge, England, Cambridge University Press, 289 pp.
- Anderson, C. L. (1991). Zircon uranium-lead isotopic ages of the Santiago Peak Volcanics and spatially-related plutons of the Peninsular Ranges batholith, southern California: M. Sc. Thesis, San Diego State University, San Diego, California, 111 p.
- Ashby, J.R. (1989). A resume of the Miocene stratigraphic history of the Rosarito Beach basin, northwestern, Baja California, Mexico. in P. L. Abbott, ed., Geologic studies in Baja California, Los Angeles, Ca, Society for sedimentary Geology, Pacific Section, p.
- Balch, D. C., Barlting S. H., and Abbott P. L. (1984). Volcanoclastic strata of the Upper Jurassic Santiago Peak Volcanics, San Diego, California, in J. K. Crouch, and S. B. Bachman, eds., Tectonics and sedimentation along the California margin, Los Angeles, California, Society of Economic Paleontologist and Mineralogists, Pacific Section, p. 157-170.
- Bankey, V., Cuevas, A., Daniels, D., Finn, C. A., Hernandez, I., Hill, P., Kucks, R., Miles, W., Pilkington, M., Roberts, C., Roest, W.R, Rystrom, V., Shearer, S., Snyder, S., Sweeney, R., Velez, J., Phillips, J.D., and Ravat, D. (2002). Digital data grids for the magnetic anomaly map of North America: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-414, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado, USA. Cambridge.
- Best, M. G. (2003). Igneous and metamorphic petrology, (2nd Ed.) Blackwell Science Ltd. (pp.719).
- Brown R.J., Branney M.J., Maher C., and Dávila-Harris P., (2010). Origin of accretionary lapilli within ground-hugging density currents: Evidence from pyroclastic couplets on Tenerife. Geological Society of America Bulletin; January/February 2010; v. 122; no. 1/2; p. 305–320
- Bushee, J., J. Holden, B. Geyer, and Gastil, R. G. (1963). Lead-alpha dates for some basement rocks of southwestern California: Geological Society of America Bulletin, v. 74, p. 803-806.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL), (1976). Carta geológica Ensenada (H11B12), escala 1:50,000: Secretaría de Programación y Presupuesto, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, 1 mapa.

- Corral-Gastéum, R., Guzmán-Espinoza, J.B., Zamora-Tovar, E. y Ruiz-Romo, T., (2001). Informe de la carta geológico-minera Ensenada clave H11-2, 1:250,000, estado de Baja California: Hermosillo, Sonora, Consejo de Recursos Minerales, Informe, Tomo 1, 86 p.
- Crisp, J. A. (1984). Rates of magma emplacement and volcanic output. *Journal of Volcanology. Geothermal. Research.* 20, 177–211.
- Cruz-Castillo, M., (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de baja California, México. GEOS, Unión Geofísica Mexicana, A.C., Abril, 2002, pag.37-42.
- Cruz-Castillo, M. y Delgado-Argote L.A. (1999). Descripción Geológica y Estructural de la Zona de deslizamientos Salsipuedes-Cíbola del Mar, Ensenada, Baja California. GEOS, Vol. 19, No. 3, p.159- 174.
- DePaolo, D.J., (1981). A neodymium and strontium isotopic study of the Mesozoic calc-alkaline granitic batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California: *Journal of Geophysical Research*, v. 86, p. 10,470–10,488.
- Fife, D. L., Minch, J. A., and Crampton, P. J. (1967). Late Jurassic age of the Santiago Peak Volcanics, California: *Geological Society of America Bulletin*, v. 78, p. 229-304..
- Gastil, R. G., and Miller (1993). Prebatholithic history of Peninsular California, in R. G. Gastil, and R. H. Miller, eds., *The Prebatholithic Stratigraphy of Peninsular California*, p. 145- 156.
- Gastil, G., Morgan, G., and Krummenacher, D., (1978). Mesozoic history of Peninsular California and related areas east of the Gulf of California, in Howell, D. G., ed., *Mesozoic Paleogeography of the Western United States: Pacific Coast Paleogeography Symposium No.2*, pp. 107-115.
- Gastil, R. G., Phillips, R., and Allison, E., (1975). Reconnaissance geology of the State of Baja California, *Geological Society of America Memoir* 140, 170 pp.
- Gorzolla, Y. (1988). Geochemistry and petrography of the Santiago Peak Volcanics, Santa Margarita and Santa Ana Mountains, southern California: Thesis, San Diego State University, San Diego, California, 145 p.
- Hawkins, J.W. (1970). Metamorphosed Late Jurassic andesites and dacites of the Tijuana-Tecate area, California, in *Pacific Slope Geology of the Northern Baja California and Adjacent Alta California: Pacific Section*, American Association of Petroleum Geologists, Society Economic Paleontologists and Mineralogists, Society Exploration Geophysics Guidebook, p. 25–29.
- Hinze J.W., VonFrese R.B., and Saad A.H. (2012). *Gravity and Magnetic Exploration Principles, Practices, and Applications*.
- Hrovda, F., Chlupacova, M., and Chadima, M., (2009). The use of magnetic susceptibility of rocks in geological exploration. *Terraplus Geophysical Equipment Supplier*, 27 pp.
- Kontny, A. and Dietl, C. (2002). Relationships between contact metamorphism and magnetite formation and destruction in a pluton's aureole, White-Inyo Range, eastern California. *Geological Society of America Bulletin* 2002;114, no. 11;1438-1451

- Krummenacher, D., Gastil, R. G., Bushee, J. T., and Doupont, J. (1975). K-Ar apparent ages Peninsular Ranges batholith, southern California, and Baja California: *Geol. Soc. of Amer. Bull.*, v. 86, pp. 760-768.
- Kennetgh, Y.R. (1982). The stratigraphy and sedimentology of Upper Cretaceous sediments of southwestern California and Baja California, Mexico: Houston, Texas, EE.UU., Rice University, PhD, 604 p.
- Larsen, E. S. (1948). Batholith and associated rocks of Corona, Elsinore, and San Luis Rey quadrangles, southern California: *Geological Society of America*, v. *Memoir 29*, p. 182.
- Legg, M.R., Wong, V. and Suárez, F. (1991). Geologic structure and tectonics of the inner Continental Borderland of northern Baja California, in: J.P. Dauphin and B.R.T. Simoneit, editors, *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, American Association of Petroleum Geologists, *Memoir 47*, p. 145-177.
- Lunceford R. A. (2010). Geological report and summary of field examination, El Alamo project, municipality of Ensenada Baja California, México.
- MacKenzie, W. S., Donaldson, C. H. and Guilford, C. (1982). *Atlas of igneous rocks and their textures* (pp.148). United States of America, Longman.
- Maus, S., Rother, M., Holme, R., Luhr, H., Olsen, N., and Haak, V. (2002). First scalar magnetic anomaly map from CHAMP satellite data indicates weak lithospheric field. *Geophysics Research Letters.*, v. 29.
- Meeth, G. (1993). Stratigraphy and petrology of the Santiago Peak Volcanics east of La Mision, Baja California: B.S. thesis, San Diego State University, San Diego, CA, 16 p.
- Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics* 37, 507-17.
- Németh, K., Martin, U. (2007). Practical volcanology; lecture notes for understanding volcanic rocks from field based studies. *Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary*, volume 207, 221pags. Geological Institute of Hungary
- Ortega-Rivera, A. (2003). Geochronological constrains 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., and Martin-Barajas, A., eds., *Tectonic Evolution of Northwestern Mexico and the Southwestern USA*. Geological Society of America *Special Paper 374*, 297-335.
- Ragan, M.D. (2009). *Structural geology an Introduction to Geometrical Techniques*. Cambridge University Press, New York, 622 pgs.
- Ravat, D., Whaler, M., Pilkington, T., Sabaka, and M. Purucker (2002). Compatibility of high-altitude aeromagnetic and satellite-altitude magnetic anomalies over Canada: *Geophysics*, v. 67, p. 546-554.
- Reed, B. C. (1992). Petrology and eruptive setting of the Santiago Peak Volcanics, in the Mission Gorge-San Diego area San Diego, California: M. Sc. Thesis, San Diego State University, San Diego, California.

- Rendón-Márquez, G. (1991). Técnicas de preparación de rocas y minerales. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, reporte interno, 32pp.
- Rockwell, T. K., Kennedy, D. R. G. L. Hatch, M. E. Wilson, S. H., and Klinger, R. E. (1989). Uranium-series ages, faunal correlations and tectonic deformation of marine terraces within the Agua Blanca Fault zone at Punta Banda, northern Baja California, Mexico, in P. L. Abbott, ed., *Geologic studies in Baja California*, Los Angeles, Ca, S.E.P.M., Pacific Section, p. 1-16.
- Roest, W. R. Verhoef, J. and Pilkington, M. (1992). Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics* 57 116-25.
- Schmidt, K.L., Wetmore, P.H., Johnson, S.E. and Paterson, S.R. (2002). Controls on orogenesis along an ocean-continent margin transition in the Jura-Cretaceous Peninsular Ranges batholiths. *Geological Society of America Special paper*, 365.
- Schroeder, J.E. (1967). *Geology of a portion of the Ensenada Quadrangle Baja California, Mexico* [M. Sc. thesis]: San Diego, San Diego State University, 65 p.
- Schmidt, K.L., Wetmore, P.H., Alsleben, H., and Paterson, S.R. (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 Morton, D.M., and Miller, F.K., eds., *Peninsular Ranges Batholith, Baja California and Southern California: Geological Society of America Memoir 211*, p. 645–668
- Servicio Geológico Mexicano (2002). Carta magnética de campo total H11-B12 Ensenada.
- Silver, L.T., and Chappell, B.W. (1988). The Peninsular Ranges batholith: An insight into the evolution of the Cordilleran batholiths of southwestern North America: *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, v. 79, p. 105–121.
- Stephens, Collin R. (2009). Age, composition and emplacement of the Santiago Peak Volcanics, Southern California. Portland, Geological Society of America Annual Meeting (18-21 October 2009) Paper No. 248-12.
- Suárez-Vidal, F., Armijo, R. Morgan, G. Bodin, P. and Gastil, R. G. (1991). Framework of recent and active faulting in northern Baja California, in J. P. E. Dauphin, and B. R. T. Simoneit, eds., *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, Tulsa, OK, p. 285-300.
- Tanaka, H., T. E. Smith, and C. H. Huang (1984). The Santiago Peak volcanic rocks of the Peninsular Ranges batholith, southern California; volcanic rocks associated with coeval gabbros: *Bulletin Volcanologique*, v. 47, p. 153-171.
- Tiznado-Vázquez, E. A. (2016). Estimación de peligros geológicos en el libramiento Ensenada, (Baja California) apoyada con mediciones de resistividad eléctrica, tesis maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE). pags 79.
- Wetmore, P. H., Herzig, C., Alsleben, H., Sutherland, M., Schmidt, K. L., Schultz, P. W., and Paterson, S. R. (2003). Mesozoic tectonic evolution of the Peninsular Ranges of southern and Baja California. *Geological Society of America Special Papers*, 374, 93-116.

- Wetmore, P.H., Schmidt, K.L., Paterson, S.R., and Herzig, C. (2002). Tectonic implications for the along-strike variation of the Peninsular Ranges batholith, southern and Baja California: *Geology*, v. 30, p. 247–250,
- Williams H., McBirney A.R. (1979). *Volcanology*, Freeman, Cooper & Co., pp. 397.
- Yamada E. (1984). Subaqueous pyroclastic flows: their development and their deposits. In Kokelaar BP and Howells MF (Eds) *Marginal Basin Geology*. Geological Society of London, Special Publications 16: 29-36.
- Adams, M. A. (1979). Stratigraphy and petrology of the Santiago Peak Volcanics east of Rancho Santa Fe, California. M.Sc. thesis, San Diego State University, San Diego, CA, 123 p.