



UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

Contribución al conocimiento de los eventos tectono-
magmáticos durante el Mioceno en la porción central de la
Sierra El Aguaje, Sonora, México.

Tesis

Para cubrir los requisitos necesarios para obtener el grado
de:

GEÓLOGO

Por:

Kevin Mexia Durán

Hermosillo, Sonora.

23 de septiembre del 2021

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

Contribución al conocimiento de los eventos tectono-
magmáticos durante el Mioceno en la porción central de la
Sierra El Aguaje, Sonora, México.

Tesis

Para cubrir los requisitos necesarios para obtener el grado
de:

GEÓLOGO

Por:

Kevin Mexia Durán

SINODALES

Presidente Dr. Raúl Ernesto Lugo Zazueta

Secretario Dr. Ricardo Vega Granillo

Vocal Dr. Jesús Roberto Vidal Solano

Vocal Invitado Dr. Luis Alonso Velderrain Rojas



EL SABER DE NOS IGUALA
HARA SU GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TEL (662) 259 21 10
FAX 259 21 11

Hermosillo, Sonora, 5 de abril de 2021

DR. FRANCISCO GRIJALVA NORIEGA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
UNIVERSIDAD DE SONORA
Presente.-

Por este conducto y de la manera más atenta me permito someter a su consideración, para su aprobación, el siguiente tema de Tesis intitulado:

“Contribución a los eventos tectono-magmáticos durante el Mioceno en la porción central de la Sierra El Aguaje, Sonora, México.”

Esto es con el fin de que el alumno **Kevin Mexía Durán** con Expediente No. **2015216647**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología.

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Dr. Jesús Roberto VIDAL SOLANO
DIRECTOR DE TESIS
Departamento de Geología
Universidad de Sonora

C.c.p. Interesado.
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

Hermosillo, Sonora, México a 7 de abril de 2021

DR. JESÚS ROBERTO VIDAL SOLANO
DIRECTOR DE TESIS
P R E S E N T E.-

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de Tesis propuesto por usted intitulado:

"CONTRIBUCIÓN A LOS EVENTOS TECTONO-MAGMÁTICOS DURANTE EL MIOCENO EN LA PORCIÓN CENTRAL DE LA SIERRA EL AGUAJE, SONORA, MÉXICO"

Lo anterior con el fin de que el alumno Kevin Mexia Durán, con No. de Expediente 215216647, pueda presentar su examen profesional para la obtención de su título de Licenciatura en Geología. Así mismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

Presidente	Dr. Raúl Ernesto Lugo Zazueta
Secretario	Dr. Ricardo Vega Granillo
Vocal	Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Vocal Invitado	MC Luis Alonso Velderrain Rojas

Sin otro particular y agradeciendo de antemano su atención a la presente, quedo de usted

A T E N T A M E N T E
"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"

DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



El saber de mis hijos
hará mi Grandeza
**DEPARTAMENTO
DE GEOLOGÍA**

c.c.p. archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

NOMBRE DE LA TESIS

**"CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO DE LOS EVENTOS
TECTONO-MAGMÁTICOS DURANTE EL MIOCENO EN LA PORCIÓN
CENTRAL DE LA SIERRA EL AGUAJE, SONORA, MÉXICO"**

NOMBRE DEL SUSTENTANTE

KEVIN MEXIA DURÁN

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.


DR RAÚL ERNESTO LUGO ZAZUETA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.


DR RICARDO VEGA GRANILLO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.


DR JESÚS ROBERTO VIDAL SOLANO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.


DR LUIS ALONSO YELDERRAIN ROJAS

A T E N T A M E N T E

"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"

**DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

c.c.p. archivo

Resumen

Durante el Mioceno tardío ocurrió un importante episodio tectónico extensional, el cual se encuentra parcialmente representado en la Sierra El Aguaje, ubicada en la porción suroeste de Sonora, México. Durante esta etapa, un adelgazamiento cortical acompañado por un magmatismo de rift, generó una compleja red magmática (12-10 Ma) en la litósfera que se traduce en cámaras magmáticas interconectadas por estructuras intrusivas en forma de diques, que son considerados como los conductos alimentadores de una importante secuencia de rocas volcánicas de composiciones félsicas a intermedias de al menos medio kilómetro de espesor, acumulada durante un periodo relativamente corto (~2 Ma) y que es conocida como Formación El Parral. En la porción central de la Sierra El Aguaje es evidenciado un cuerpo microgranítico que se presenta en forma de sill y se encuentra emplazado entre la secuencia volcánica anorogénica y el basamento laramídico de ~83 Ma. La erosión y debilidades estructurales provocadas por la extensión de la región, suscitan una descompresión del sistema magmático hipabisal (diques y cámaras magmáticas) que se encontraban ya emplazados, generando una exsolución de las fases volátiles que desencadenan una movilización de magma a la superficie, provocando la extrusión de la secuencia volcánica y la generación de nuevas cámaras magmáticas emplazadas cerca de la superficie. El líquido magmático inyectado en fracturas y fallas, muestran dos facies; aquellos diques emplazados en el cuerpo hipabisal muestran un enfriamiento contemporáneo al mismo y muestran un sobre-enfriamiento de hasta 150°C (diferencial térmico), que es evidenciado por morfologías cristalinas; en cambio, otros diques magmáticos emplazados en el basamento muestran un sobre-enfriamiento mayor, estimado entre 250°C y 450°C, manifestando fenómenos de exsolución de volátiles, que propician la ocurrencia de fases fluidas heterogéneas y una movilidad magmática más impetuosa. Finalmente, el evento intrusivo más joven, que se evidencia en el área por una inyección de composición intermedia con xenolitos del microgranito, es posiblemente asociada a la Formación Volcánica El Guajaré.

Además de su voluminosa secuencia volcánica, estructuralmente, la Sierra El Aguaje destaca por grandes fallas que basculan, deforman y desplazan grandes volúmenes de roca. El corazón de la Sierra, mencionado en este trabajo como Valle de la Sierra El Aguaje, se caracteriza por formar parte de estructuras en transtensión, cuya falla maestra se intuye al noreste de la Sierra, colindando con el Valle de San José de Guaymas. Dicha estructura cuenta con una dirección NW-SE y podría ser continuación de la Falla El Vigía. En la zona del Arroyo San José de Robinson, el bloque de piso evoluciona a partir de una falla maestra lítrica con dirección NNE-SSW y con componente rotacional. La apertura progresiva del Valle de la Sierra El Aguaje se deduce que es regida por la generación de nuevas fallas lítricas escalonadas cuyos bloques segmentados se conectan a un mismo nivel de despegue que se deduce, se unen a una profundidad aproximada de ~250 metros. Finalmente, un sistema conjugado con otras fallas normales y laterales, forma una geometría compleja de bloques rocosos, desarrollando pequeñas estructuras tipo horst y graben.

Abstract

The Sierra El Aguaje represents during the Upper Miocene, a very important episode of an extensional tectonic regime which took place in the southwestern portion of Sonora, México. Throughout this stage, it is generated a rift-related magmatism (12-10 Ma) caused by crustal thinning in the lithosphere. This context includes magmatic chambers interconnected by dikes interpreted as feeder channels to the massive sequence of intermediate and felsic volcanic rocks of at least half kilometer thick. The sequence accumulated during a relatively short period (~1 Ma) is known as the El Parral Formation. In addition, a hypabyssal rock (microgranite) recognized as well in the study area is characterized as a sill-shaped body emplaced between the anorogenic volcanic sequence and the laramide basement of ~83 Ma.

The erosion and structural weaknesses generated by the regional extension lead to decompression of the magmatic hypabyssal system (dikes and magmatic chambers) already emplaced, this context generates an exsolution of volatile phases that trigger a mobilization of magma to the surface, causing the extrusion of the volcanic sequence. The magmatic fluid injected in fractures and faults shows to facies, in one hand, dikes emplaced in the hypabyssal body show a contemporary cooling to it and manifest a supercooling of up to 150°C (thermal differential) which is evidenced by crystalline morphologies; on the other hand, those dikes emplaced at the basement show an estimated supercooling from 250°C to 450°C, revealing a volatile exsolution phenomena, facilitating heterogeneous fluid phases and a more impetuous magmatic mobility. Finally, a younger magmatic event is revealed, consisting of intermediate injections with hypabyssal intrusive xenoliths, and that by its petrographical characteristics, could be related to the Volcanic Formation El Guajaré.

In addition to its massive volcanic sequence, the Sierra El Aguaje stands out for large faults that tilt, deform and displace large volumes of rock. At the center of this area, that is considered here as Sierra El Aguaje Valley, is characterized as being part of structures in transtension, whose master fault is possibly located at the northeast and bordering the San José de Guaymas Valley. This major structure has a NW-SE direction and seems to be an extension of the Falla El Vigía. In the area of San José de Robinson Creek, the footwall evolves from a listric master fault with NNE-SSW direction and a rotational component. The progressive aperture of the Sierra El Aguaje Valley generates new staggered detachment faults whose segmented blocks are connected to the same take-off level possibly located at ~250 meters dept; finally, a conjugated system with other normal and lateral faults, form a complex geometry of blocks, creating small horst and graben type structures.

Agradecimientos

Quiero agradecer al Departamento de Geología por haber sido la cuna de mi formación profesional y a todas las personas que formaron parte de esta experiencia durante mi licenciatura.

Agradezco a mis padres Sandra, Kemuel y a mi hermana Valeria, por su amor y apoyo incondicional.

Al Dr. Jesús Vidal por su paciencia, retroalimentaciones, consejos y por sus infinitas ganas de transmitir su conocimiento tanto durante clases, como durante la realización de este trabajo. De todo corazón, muchas gracias profe.

A mis sinodales: Dr. Ricardo Vega Granillo, Dr. Raul Ernesto Lugo Zazueta y Dr. Luis Velderrain Rojas por sus importantes observaciones que enriquecieron de gran manera, esta tesis de licenciatura.

A Gabriel Medina y familia, a Víctor, Luis Carlos, Antonio y a las personas del Ejido General San Francisco Villa que, con mucho gusto, nos dejaron acceder a la tan hermosa Sierra El Aguaje. Les muestro un infinito agradecimiento.

A los profes Alejandra Gómez, Francisco Cuen, Francisco Grijalva (*Chile*), Verónica Moreno, Francisco Paz y Ricardo Vega, por haber sido parte fundamental de mi formación y ejemplo a seguir. Los llevaré conmigo siempre.

A los coordinadores Ricardo Amaya (QEPD) y Alejandra Montijo por toda su ayuda brindada. Al personal administrativo y de laboratorio Czarina, Silvia, Jorge y Sheyla. El Departamento tiene su tan buen distintivo espíritu gracias a ustedes.

Al M.C. Abraham Mendoza por su ayuda con las muestras analizadas en difracción de rayos X y la interpretación de las mismas.

A Brenda Miranda por su importantísima ayuda con los esquemas de evolución geológica.

A las personas cuya ayuda fue fundamental en campo: Carolina, Luis (Wichori), profe Lugo, profe Vidal y Gerardo.

A Alejandra y Adriana por sus importantes ánimos y consejos durante la realización de esta tesis.

No por estar a lo último, significa que sean menos importantes. Agradezco enormemente a mis amigos, a quienes me apoyaron, me dieron su amistad sincera y me acompañaron siempre de una manera incondicional, una muy buena parte de este trabajo va dedicado a ustedes: Sandra (Chilaquil), Araceli, Lugo, Abraham, Omar Obeso, Diana (Dianita), Javier (Maligno), Víctor, Mafer, Emilio, Alonso (Pepeloncho), Pamela (Pam), Flaminia, Mei y Ada.

ÍNDICE

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Marco teórico – Geología Regional	3
1.3	Vías de acceso y localización	7
2	Metodología	8
3	Resultados	9
3.1	Geomorfología de la Sierra El Aguaje	9
3.2	Cartografía geológica del Valle de La Sierra El Aguaje	10
3.2.1	<i>Mapa Geológico de la Sierra El Aguaje</i>	11
3.3	Secciones geológicas	12
3.4	Columna estratigráfica	13
3.5	Unidades litológicas del Valle de la Sierra El Aguaje	14
3.5.1	<i>Basamento granodiorítico – Cretácico</i>	14
3.5.2	<i>Microgranito hipabisal – Mioceno tardío</i>	15
3.5.3	<i>Diques hipovolcánicos de la Sierra El Aguaje</i>	17
3.5.3	<i>Diques andesíticos posteriores</i>	25
3.6	Geología estructural	25
3.6.1	<i>Foliación magmática</i>	26
3.6.2	<i>Fallas</i>	27-28
3.6.3	<i>Orientación de diques hipovolcánicos</i>	29
5	Discusiones	31
5.1	Implicaciones magmáticas – Microgranito hipabisal	31
5.2	Implicaciones magmáticas – Diques Hipovolcánicos	32
5.3	Diques andesíticos posteriores	33
5.4	Implicaciones estructurales	34
5.5	Evolución tectono-magmática de la Sierra El Aguaje	37
7	Conclusiones	40
8	Bibliografía	41
	Anexo I – Muestras del área de estudio	46
	Anexo II – Muestras de difracción de rayos x	46

1 Introducción

La costa sur de Sonora se enmarca dentro de la Provincia Extensional del Golfo de California y presenta una complejidad geológica debido a su historia durante el Neógeno, marcado por un cambio de régimen tectónico de subducción a uno en distensión (Martín-Barajas, 2000). Durante esta última etapa, la importante extensión litosférica, desencadenó un adelgazamiento cortical y un magmatismo durante el Mioceno medio (Vidal-Solano et al, 2007). Dicho fenómeno magmático fue tan importante que hoy en día existen acumulaciones de cientos de metros de roca volcánica distribuidos en más de 100 kilómetros cuadrados con edades aproximadas de 11 Ma en la Sierra El Aguaje (SEA; Velderrain-Rojas, 2014). El magma se emplaza parcialmente a profundidad como un conjunto de cuerpos intrusivos hipabisales que incluyen sills y diques, reportados en la literatura como cuerpos granofíricos y diques hipovolcánicos. (Flores, 1929; Johnpeer, 1977; Sheridan et al., 1978; Cochemé, 1981; Mora-Álvarez, 1993; Vega-Granillo et al., 2004; Velderrain-Rojas, 2014; Velderrain-Rojas, 2016; Piña-Páez, 2020; Velderrain-Rojas, 2021)

Además de los fenómenos magmáticos, el contexto tectónico en distensión, la formación de una extensa zona volcánico-tectónica conocida como proto-Golfo ocurrida durante el Mioceno Medio-Tardío (Karig & Jency, 1972), y la apertura del actual Golfo de California, generaron un sinfín de estructuras secundarias que han desplazado y deformado las unidades litológicas existentes y junto con ellas, modificando la topografía de la región.

En relación a lo anteriormente mencionado, este proyecto de investigación en la Sierra El Aguaje busca responder las siguientes interrogantes:

- ¿Qué significado tienen el emplazamiento y la posterior exhumación de los cuerpos intrusivos (basamento granodiorítico, granofiro y diques) para el tectonismo de la región?
- ¿De qué manera afecta el tectonismo a los cuerpos antes mencionados?
- ¿Qué relación tectónica existe entre las estructuras del Valle de la Sierra El Aguaje con las estructuras reportadas en las zonas aledañas?
- ¿Qué tipo de fenómenos o procesos vinculan al cuerpo granofírico con los diques?

Para poder abordar las interrogantes se tiene como objetivo realizar una caracterización de los eventos geológicos y tectónicos correspondientes al área de estudio, así también se busca realizar un modelo esquemático que represente los eventos geológicos más importantes ocurridos en la Sierra El Aguaje (SEA).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Contribuir al conocimiento geológico en la Sierra El Aguaje (SEA) a partir del estudio estructural y petrológico de la zona Arroyo San José de Robinson, Sierra El Aguaje.

1.1.2 Objetivos específicos

- (1) Realizar una cartografía detallada de la unidad granofírica y sus áreas adyacentes.
- (2) Caracterizar las unidades intrusivas asociadas al cuerpo granofírico.
- (3) Realizar un análisis estructural que permita explicar los movimientos de los bloques rocosos.
- (4) Proponer un modelo geodinámico de los procesos geológicos involucrados para la formación de la SEA.

1.2 Marco teórico – Geología Regional

(1) Los episodios magmáticos y el cambio de régimen tectónico que ha sido ampliamente estudiado, forman una pieza clave para la reconstrucción geológica del noroeste de México. Una parte de dichos fenómenos ha sido definida a partir de evidencias presentes en la actual costa del suroeste de Sonora. Estos estudios se han hecho a partir de investigaciones en lugares como: Sierra Libre (SL), Sierra Santa Úrsula (SSU), Sierra el Aguaje (SEA), San Carlos (SC), Guaymas, Valle de San José de Guaymas (VSJG) y en Los Algodones (LA) (Figura 1) (Flores, 1929; Johnpeer, 1977; Sheridan et al., 1978; Cochemé 1981; Mora-Álvarez 1992; Mora-Álvarez, 1993; Mora-Álvarez y Mc Dowell, 2000; Gómez Valencia, 2004; Vega-Granillo et al., 2004; Vidal-Solano, 2005; Aragón-Arreola, 2005; Barrera-Guerrero, 2012; Gómez-Valencia, 2014; Velderrain-Rojas, 2014; Velderrain-Rojas, 2016; Gómez-Valencia, 2016; Pérez-Aguilar, 2017; Fragoso-Irineo et al., 2018; Piña-Páez 2020; Lugo-Zazueta et al., 2020; Velderrain-Rojas et al., 2021)

. Todos estos lugares se localizan cercanos a la costa central de Sonora, han sido una herramienta fundamental para una reconstrucción geológica de más de 80 Ma y su importancia para el presente manuscrito es desglosado a continuación.

La unidad más antigua de esta zona les corresponde a rocas metasedimentarias atribuidas al Triásico-Jurásico, descrito como un hornfels silíceo que aflora en el cerro Los Algodones (Figura 2) y en el cerro Tetacahui, dicha unidad forma lomeríos suaves que se encuentran cubiertos discordantemente por rocas volcánicas miocénicas (Vega-Granillo et al., 2004; Piña-Páez, 2020). El batolito laramídico, que forma parte del basamento de toda la región, intrusión a las rocas anteriores y tiene distintos afloramientos a lo largo de toda la costa de Sonora, específicamente en la zona de San Carlos, en la Sierra El Aguaje y en la porción norte de la Sierra Libre (Barrera-Guerrero, 2012), este intrusivo granodiorítico se fechó y dio como resultados edades de 83 y 81 Ma (Mora-Álvarez y Mc Dowell, 2000). Según el trabajo de Vega-Granillo y colaboradores (2004) el basamento se encuentra expuesto debido a un importante levantamiento y erosión atribuido al basculamiento de bloques rocosos desplazados a partir de fallas normales asociadas una primera fase extensional denominada de Sierras y Valles paralelos (“*Basin and Range*”) que afectó la región desde el Oligoceno al Mioceno medio.

Durante el Oligoceno – Mioceno en la región dominó un volcanismo de arco continental nombrado en la zona de San Carlos, como unidades Básica-Intermedia con edades de 22 y hasta 18 Ma. (Vega-Granillo et al., 2004) el cual es denominado informalmente como Grupo San Carlos y se compone por el producto de tres pulsos volcánicos descritos en la Sierra Libre, fechados entre 19 y 18 Ma. (Gómez-Valencia, 2014). Dichas unidades rocosas son también correlacionables de forma local con el paquete de rocas máficas descritas por Piña-Páez (2020) en la zona de Los Algodones (Figura 2).

La Sierra Libre, por otro lado, muestra un registro magmático clasificado en tres grupos petrogenéticos (Barrera-Guerrero, 2012 y Gómez-Valencia, 2014), el primero representado por lavas adakíticas de arco continental con edades de 25 a 14 Ma, las cuales

representan el último episodio magmático de subducción. Posteriormente, se registró uno de los primeros magmatismos de rift que provocó la erupción de riolitas e ignimbritas riolíticas de carácter hiperalcalino, entre ellas la conocida como Ignimbrita de Hermosillo / Toba de San Felipe, correlacionable con la Ignimbrita Los Algodones en San Carlos (Piña-Páez, 2020), siendo este un excelente marcador estratigráfico hacia los 12.5 Ma (Vidal-Solano, 2005); y, por último, un pulso toleítico formado por islanditas y basaltos con edades entre 11 y 8 Ma (Gómez Valencia, 2004).

El estudio de las rocas volcánicas en la Sierra Santa Úrsula (SSU) (Figura 1) realizado por Mora-Álvarez y Mc Dowell (2000); Mora-Álvarez (1992) reveló una transición tectónica entre 23.5 y 8.5 Ma, separadas en dos conjuntos: el primero de 27 a 15 Ma está formado por domos de lava, tobas e ignimbritas y el segundo fechado entre 12.5 y 8 Ma, formado por ignimbritas félsicas y flujos máficos de carácter toleítico. El pulso más antiguo ha sido asociado al proceso de subducción mientras que el segundo a un proceso de transtensión. Para las rocas orogénicas, el estudio realizado posteriormente por Gómez-Valencia (2014) permitió correlacionar las rocas del SW de la SL y las del estudio realizado en la SSU, mientras que los derrames piroclásticos fueron asociadas con las rocas toleíticas encontradas en la Sierra El Aguaje (Velderrain-Rojas, 2014).

Uno de los productos de este régimen tectónico en transtensión presentado en el sur de la SSU son un conjunto de estructuras que conforman el sistema de fallas en transtensión del Golfo de California, las cuales se caracterizan por ser fallas normales con componente rotacional de tipo lístrico y otras fallas sintéticas (Pérez-Aguilar, 2017).

Desplazándonos hacia el sur de la región, Velderrain-Rojas (2016) establece el Grupo Guaymas, el cual se compone de dos conjuntos, el inferior constituido por lavas intermedias y el superior por rocas explosivas intermedias-félsicas. Ambos paquetes presentan características de un magmatismo por distensión según sus firmas geoquímicas. En localidades como Guaymas, Isla San Pedro Nolasco y San Carlos, este grupo ha sido fechado entre 12.5 y 10 Ma. Además de las rocas ya mencionadas, este mismo autor define al miembro granofíro como un cuerpo hipabisal aflorando en el Cerro el Vigía (Guaymas), y que, a pesar de tener un mecanismo de emplazamiento diferente a las rocas del Grupo Guaymas, estableció una relación geoquímica entre ellos. Estructuralmente hablando, en la región existen estructuras asociadas a un rift oblicuo (Velderrain-Rojas et al., 2021; Fragoso-Irineo et al., 2018), con direcciones NW-SE entre las cuales destacan la Falla El Vigía (FEV) y la Falla Santa Úrsula (FSU). Por otra parte, Aragón-Arreola (2005), reporta a la Falla San Pedro Nolasco Este (FSPNE) como una estructura paralela a las anteriormente mencionadas (Figura 1).

El cuerpo granofírico fue reportado por primera vez por Flores (1929) como un granito con ocurrencia al norte de Empalme, se le dio también por primera vez la connotación de “Granofíro de Empalme-Ortiz” en la zona de El Papalote por Cochemé (1981). Ha sido reportado en distintos lugares de la región tales como la Sierra Santa Úrsula (Mora-Álvarez,

1993), llegó a ser considerado por [Johnpeer \(1977\)](#) y [Sheridan et al., \(1978\)](#) como una toba soldada recristalizada en la región de Guaymas y se menciona que aflora en los cerros El Vigía, Lomas de Cortés y El Gandareño ([Vega-Granillo et al., 2004](#)).

Recientemente, en estudios de termocronología de baja temperatura ([Lugo-Zazueta et al. 2020](#)) indican que la región comprendida entre Empalme y San Carlos tendrían actividad tectónica entre los 13 y 8 Ma, para la Sierra el Aguaje (SEA) se identificaron secuencias rocosas definidas como Formación El Parral ([Figura 1](#)) que son enmarcadas bajo un contexto tectónico en distensión con un rango de edad entre 11-10 Ma. La actividad tectónica y las rocas anteriormente mencionadas se asocian temporalmente a las etapas iniciales del rifting del Golfo de California ([Velderrain-Rojas, 2014](#)). La Formación El Parral está conformada principalmente de riolitas, ignimbritas con respectivas facies vítreas y tobas de color amarillo-rosados. Además de las unidades volcánicas encontradas en el centro de la SEA, [Velderrain-Rojas \(2014\)](#) reporta el afloramiento de diques félsicos que cortan al basamento granodiorítico y al cuerpo granofírico hipabisal antes mencionado. La aparición de las distintas rocas intrusivas (cuerpo granofírico y diques félsicos) se atribuye a la amplia distensión y erosión que ocurrió en la zona, generando una morfología en forma de cuenca ([Velderrain-Rojas, 2014](#)). Las unidades volcánicas de la Formación El Parral además de predominar en la SEA, se encuentran presentes en diferentes afloramientos correlacionables en la zona del SW de la SL, en Tastiota y la sierra Los Algodones ([Figura 2](#)) ([Piña-Paez, 2020](#); [Gómez-Valencia, 2016](#)).

[Velderrain-Rojas \(2014\)](#), nombró como Fm. Guajará a una secuencia de lavas intermedias a máficas intercaladas con tobas. Esta unidad forma mesas subhorizontales, coronando a los cerros en la zona de El Parral (dentro de la SEA). Estas rocas forman parte del volcanismo de la Mesa El Parapeto en la Sierra Tinaja del Carmen ([Figura 1](#)), del Cerro el Vigía en Guaymas y de los cerros al norte de Empalme, donde fueron reportados como Basaltos de Empalme ([Johnpeer, 1977](#)) y son correlacionables con la unidad Basalto de las Trincheras en la SSU ([Mora-Álvarez, 1993](#)).

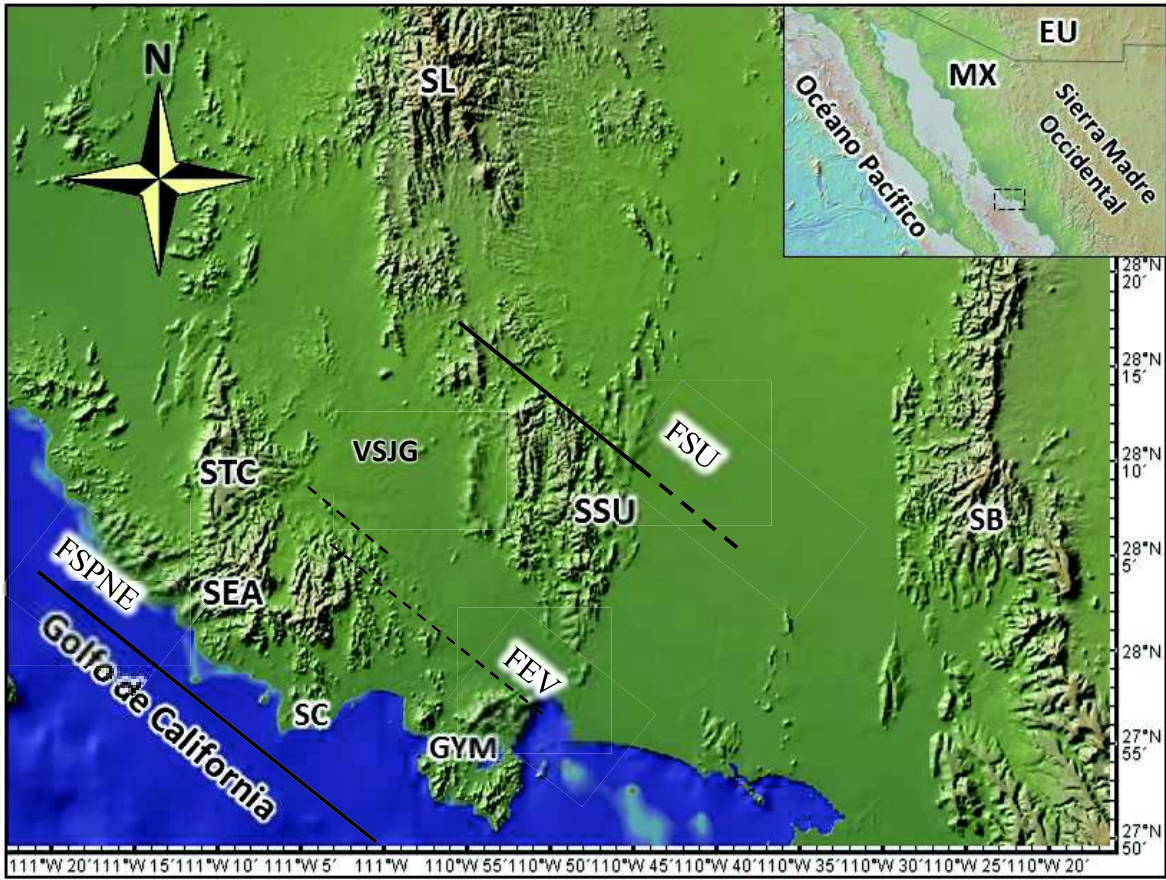


Figura 1.- Mapa de relieve batimétrico y continental hecho a partir de GeoMapApp 3.6.10 (Modificado de [Velderrain-Rojas, 2016](#)) donde se muestran principales sitios de interés relacionados al presente manuscrito; Sierra Libre (SL), STC (Sierra Tinaja del Carmen, Sierra el Aguaje (SEA), San Carlos (SC), Guaymas (GYM), Sierra Santa Úrsula (SSU), Sierra El Bacatete (SB), Falla Santa Úrsula (FSU), Falla El Vigía (FV) y Falla San Pedro Nolasco Este (FSPNE), Valle de San José de Guaymas (VSJG) .

1.3 Vías de acceso y localización

Partiendo desde la ciudad de Hermosillo hacia el sur por la carretera internacional número 15 con dirección hacia Guaymas, se toma un camino de terracería sobre el kilómetro 145 hacia el Oeste entrando al ejido San Francisco y siguiendo el camino con dirección a la Sierra El Aguaje se llega hasta la localidad de El Aguaje de Robinson, tal como se muestra en la **Figura 2**.

La Sierra el Aguaje se ubica en la porción suroeste de Sonora y forma parte del paisaje distintivo de esta porción costera del estado, colinda al norte con la Sierra Tinaja del Carmen y a casi 8km al sur se encuentra la ciudad de San Carlos, hacia el este se encuentra el arroyo El Tigre que se une al Río Mátape, finalmente, hacia el suroeste la sierra acaba en la costa del Golfo de California.

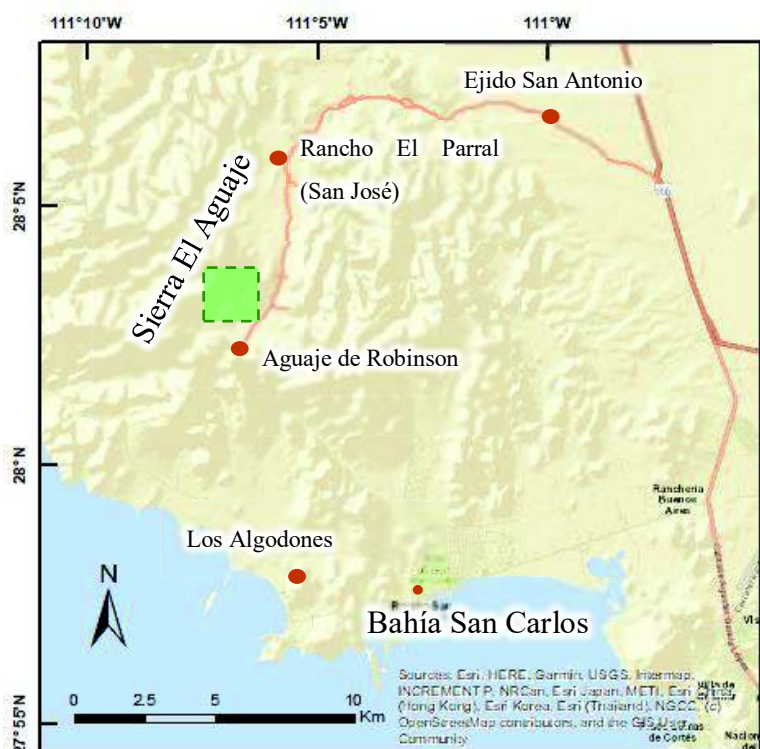


Figura 2.- Vías de acceso y localización del área de estudio encuadrado con verde.

2 Metodología

Tras haber seleccionado la zona de estudio, la primera etapa de gabinete consistió en realizar una recopilación de información del área en cuestión (tales como cartas geológica-mineras: El plano H12-11: 1:250,000 Sierra Libre y H12-C89: 1:50,000 San Alfonso). Se utilizaron imágenes satelitales de diferentes fuentes utilizando el programa Global Mapper, se utilizó el plano geológico propuesto por [Velderrain-Rojas \(2014\)](#), adicionalmente, se realizó una interpretación a partir de fotogeología con fotografías de la Zona 61-A. Todo lo anteriormente mencionado fue necesario para visualizar estructuras y definir cuáles zonas eran de mayor importancia a visitar y que representarían posibles puntos clave para el estudio del área.

Una vez realizada la recopilación se llevó a cabo un trabajo de campo enfocado en identificar, muestrear, medir, fotografiar, y describir tanto estructuras geológicas como unidades ígneas.

Posteriormente se efectuó una cartografía geológica a partir de todos los datos recabados en las excursiones de campo utilizando el software ArcGis 10.3, así como información disponible en INEGI para plasmar elementos vectoriales y rasters como un modelo integrado digital de elevaciones a 5 m. También se elaboraron dibujos, esquemas, columnas y secciones con el programa CorelDraw.

El trabajo de laboratorio consistió en elegir 16 muestras para realizar láminas delgadas con sus respectivas secciones pulidas, éstas permitieron realizar un estudio petrográfico. Adicionalmente, con ayuda del análisis estructural y el reconocimiento litológico fue posible realizar un esquema representativo de la cronología de los eventos geológicos en el área en cuestión.

Finalmente, un último trabajo de análisis fue necesario para estructurar y presentar toda la información recabada, se realizaron esquemas, mapas, secciones, figuras y dibujos para plasmar los datos estructurales que permiten explicar la dinámica del área en cuestión.

3 Resultados

Se presentan los datos recabados y procesados a partir de diferentes métodos y análisis. De manera ordenada, se muestran primero los resultados de cartografía, que incluyen estratigrafía, relaciones de corte y clasificaciones petrológicas formales plasmadas en el mapa geológico. En la siguiente parte de resultados, se presentan las respectivas secciones geológicas. Enseguida, se muestran los resultados obtenidos a partir de la petrografía los cuales incluyen descripciones formales y agrupaciones de acuerdo a los fenómenos observados en las muestras.

Posteriormente, se presentan los datos del análisis estructural tales como fallas y otras estructuras primarias ígneas como foliación magmática/estratificación magmática y actitudes de diferentes cuerpos ígneos.

3.1 Geomorfología de la Sierra El Aguaje

La SEA se caracteriza por tener laderas montañosas altas con diferencias topográficas de hasta 840 metros. Se presentan varios cañones dispersos, de los cuales, los más conocidos son el Cañón de Nacapule y el Cañón de los Anegados, los cuales se ubican en la porción sureste y suroeste de la sierra respectivamente. Existen, además, otros de cañones colindantes con la Sierra Tinaja del Carmen. La Sierra El Aguaje tiene lomeríos aislados en las porciones central-norte y este, cuenta con dos desembocaduras principales, una hacia el norte que se une con el Río El Tigre y otra al suroeste (Cañón de los Anegados) que desemboca en el Golfo de California. Adicionalmente, cuenta con planicies fluviales y aluviales que caracterizan a la zona central de la SEA.

La geoforma de interés en este trabajo (la cual no ha sido establecida ni utilizada formalmente en la literatura) es un valle ubicado en el corazón de la Sierra (**Figura 3**), con una extensión longitudinal de aproximadamente 7.5 kilómetros y transversal de 2 kilómetros, esta geoforma será utilizada en este manuscrito como “*Valle de la Sierra El Aguaje*”.



Figura 3. Mapa de relieve continental donde se muestran sitios importantes de la SEA: SEA (Sierra El Aguaje), STC (Sierra Tinaja del Carmen), EP (Rancho El Parral o San José), VSEA (Valle de la Sierra El Aguaje), ADR (Rancho Aguaje De Robinson, VN (Valle de Nacapule), GYM (Guaymas), SC (San Carlos) y 15 (Carretera internacional #15)

3.2 Cartografía geológica del Valle de La Sierra El Aguaje – Arroyo San José de Robinson

Se realizó como producto de la cartografía, un mapa geológico compilado a partir de los datos obtenidos de campo, de los cuales se incluyen un total de 8 litologías y estructuras de diferentes tipos.

3.2.1 Mapa Geológico de la Sierra El Aguaje – Arroyo San José de Robinson

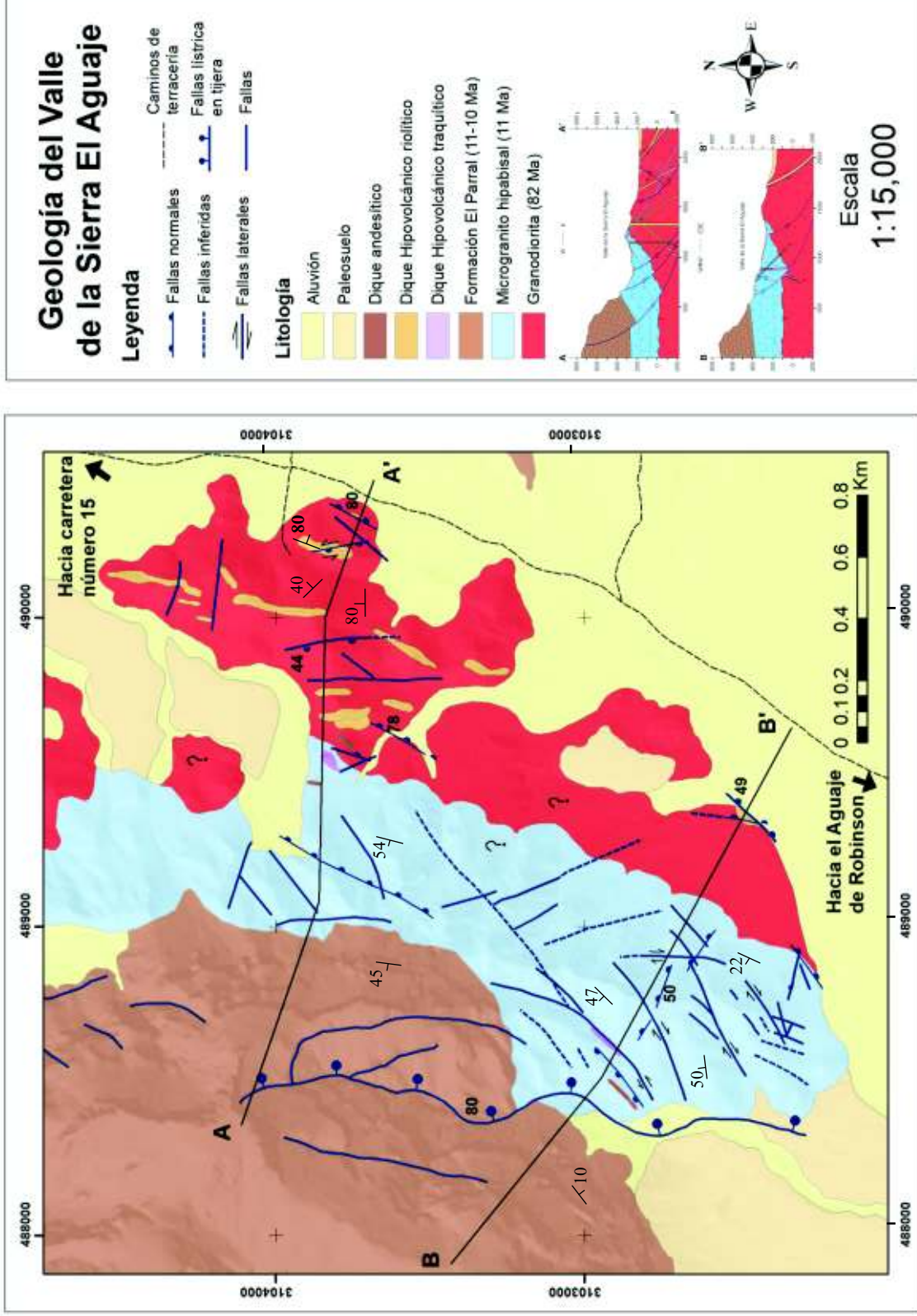


Figura 4. Mapa Geológico del área de estudio en la Sierra El Aguaje

3.3 Secciones geológicas

Las secciones geológicas A-A' y B-B' tienen una orientación W-E y WNW-SEE respectivamente, representan la interpretación de la disposición de las unidades a profundidad, presentes en el Valle de la Sierra El Aguaje.

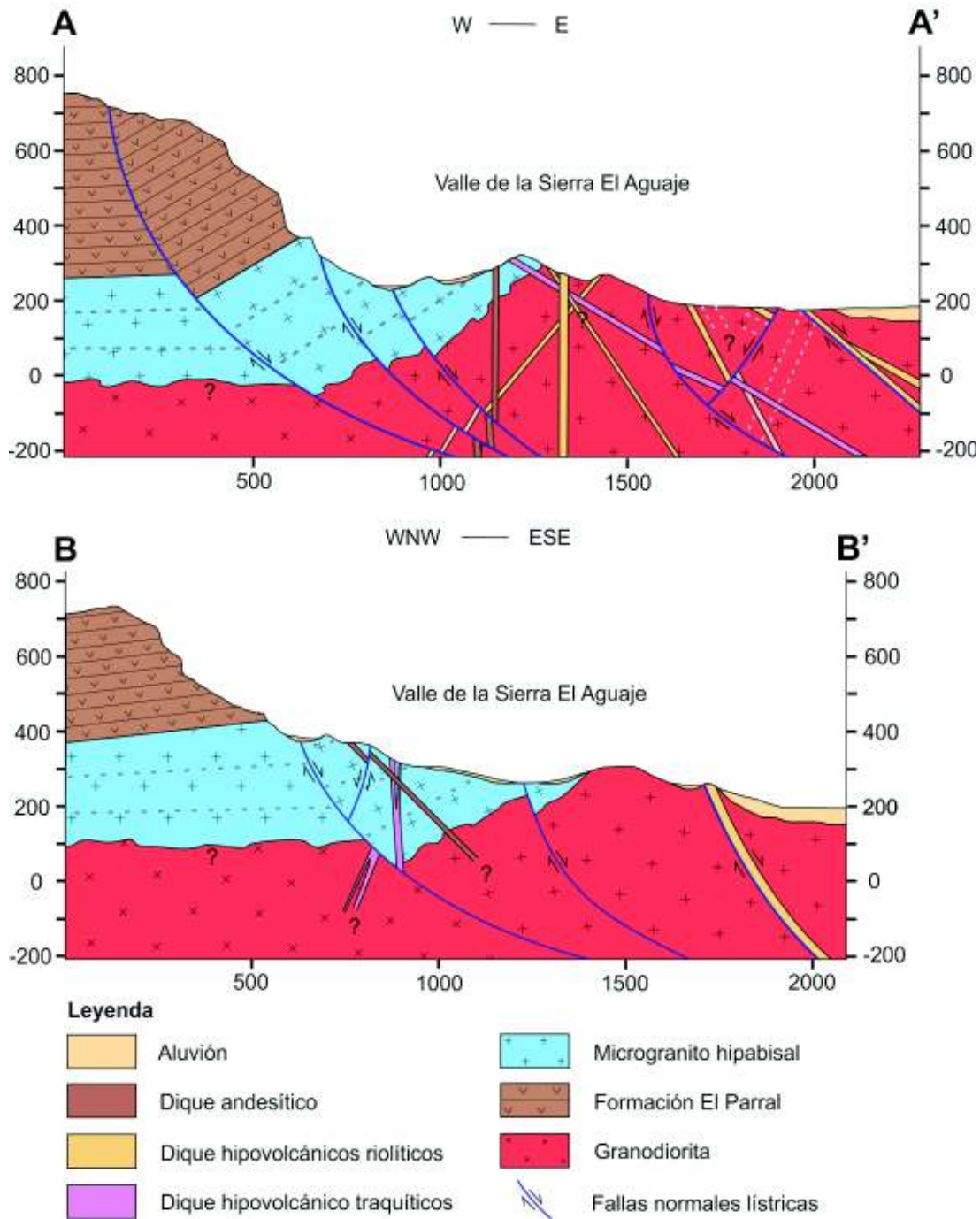


Figura 5. Secciones geológico-estructural del área de estudio en la Sierra El Aguaje donde se observan las actitudes y disposición de las fallas normales y listricas, además de la actitud de los diferentes diques que afloran en la zona.

3.4 Columna estratigráfica

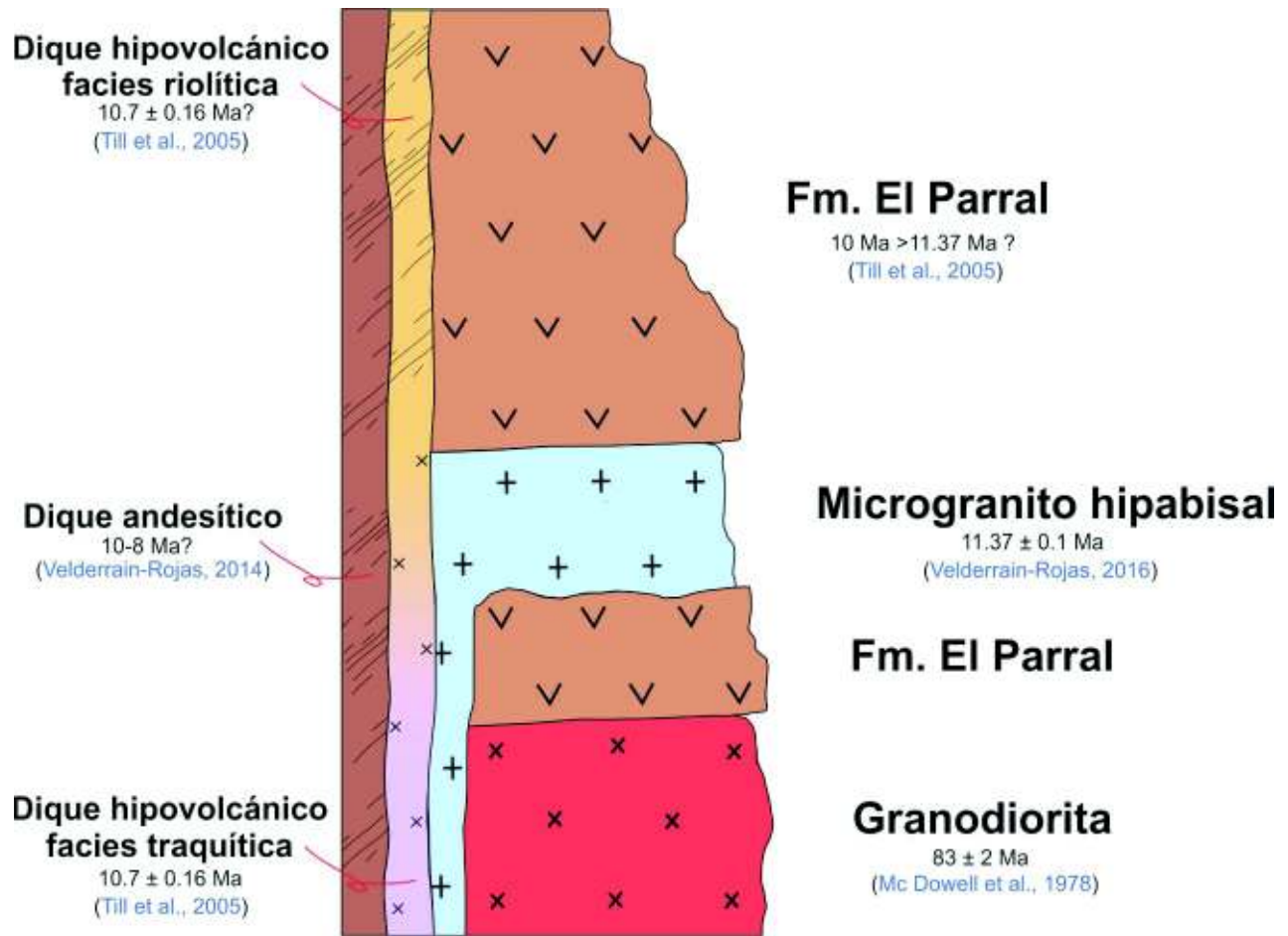


Figura 6. Columna estratigráfica compuesta del Valle de la Sierra El Aguaje: Arroyo San José de Robinson – El Tigre.

3.5 Unidades litológicas del Valle de la Sierra El Aguaje - Arroyo San José de Robinson

La geología de la zona de estudio abarca en su mayoría cuerpos ígneos de carácter intrusivo profundo, intrusivos hipabisales y cuerpos intrusivos cortantes relacionados (diques de diferentes composiciones), así también como, depósitos piroclásticos y derrames de lava. Las unidades se muestran clasificadas con sus respectivas descripciones litológicas que van desde una escala macro hasta microscópica.

3.5.1 Basamento granodiorítico - Cretácico

El basamento corresponde a una granodiorita de anfíbol y biotita, que aflora principalmente en la zona del Arroyo San José de Robinson-El Tigre (Vidal-Solano et al., 2020), en el centro del Valle de la Sierra El Aguaje, como un cuerpo de 2.8 kilómetros de largo mientras que al SW del Rancho El Parral (actualmente Rancho San José) aflora como un lomerío de menos de 200m de largo (Figura 4). El cuerpo intrusivo muestra cristales de tamaño medio con fenocristales de anfíbol, de manera dispersa se observan autolitos más máficos con tamaños de hasta 5 cm (Figura 7B). Este cuerpo rocoso forma parte del mismo basamento reportado por diferentes autores en la zona de San Carlos y fechado en 83 y 81 Ma por Mora-Álvarez y Mc Dowell (2000). Dicho cuerpo intrusivo de composición granodiorítica se encuentra cubierto en el contacto superior por un Microgranito hipabisal, y ambos son cortados por diversos diques de composición félsica. Velderrain-Rojas (2014) reporta que la granodiorita se encuentra cubierta por un depósito de brecha piroclástica en el límite oeste del valle de la SEA, la cual forma parte de la Formación el Parral. En el área de estudio, el intrusivo granodiorítico presenta una foliación magmática de desarrollo heterogéneo (en la zona este del área de estudio) y es cortado por fallas normales con echados hacia el E y SE.

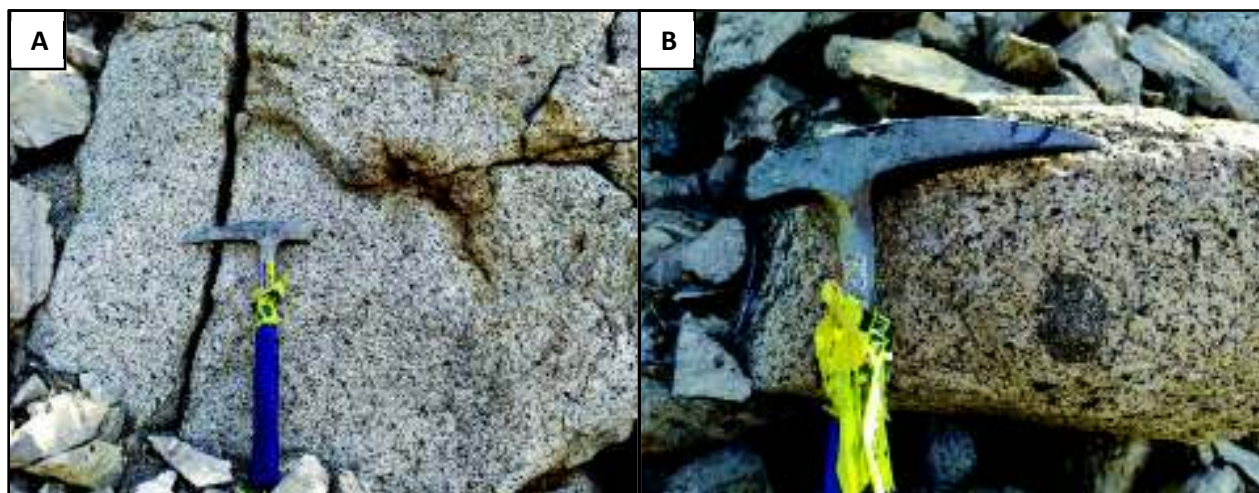


Figura 7. Fotografía de la unidad basamento granodiorítico (A) y de una muestra de mano con un posible autolito o cúmulo(B).

3.5.2 Microgranito hipabisal – Mioceno tardío

El microgranito es un cuerpo hipabisal clasificado por [Velderrain-Rojas \(2014\)](#) y mencionado en la literatura por diferentes autores como “granófiro” debido a la distintiva textura granofírica visible al microscopio. Entiéndase por una textura granofírica aquella que tiene una matriz compuesta de intercrecimientos de cuarzo y feldespato alcalino en arreglos gráficos ([Castro-Dorado, 2015](#)).

En la Sierra El Aguaje, este intrusivo aflora en la zona central del valle, donde principia el Arroyo San José de Robinson. Tiene una longitud expuesta de aproximadamente 3km y un espesor inferido aproximado de 300m. A juzgar por su disposición en campo y en imágenes satelitales, el cuerpo tiene una geometría tabular concordante a la secuencia volcánica y cortante al basamento granodiorítico, la cual refiere a un emplazado en forma de sill, en contacto con las rocas volcánicas de la Formación El Parral y con el basamento granodiorítico ([Figura 8](#)).



Figura 8. Vista panorámica con dirección SW-NE donde se muestra el contacto superior del intrusivo Microgranítico y la Fm. El Parral, la cual muestra sus diferentes unidades volcánicas.

En campo, la roca que compone al microgranito presenta un color gris claro a rosa. Muestra escasos fenocristales de cuarzo y feldespato alcalino con una textura microcristalina de aspecto sacaroide, tiene abundantes fracturas y miarolas que se encuentran rellenas de cuarzo, calcita, heulandita y estilbita ([Anexo II](#)). Es común encontrar una foliación magmática, juntas de enfriamiento ([Figura 9B](#)) y enclaves redondeados de 30 hasta 70 cm de diámetro ([Figura 9A](#)) en la zona inferior del cuerpo. Es posible encontrar zonas con una mayor abundancia de miarolas y variaciones tanto cromáticas (de gris a rosadas) como de cristalinidad (observado como un cambio en el tamaño de cristales en petrografía). Dichas variaciones se encuentran con una disposición en forma de bandas paralelas con un echado general de 50° hacia el SW, lo que es considerado como la actitud del sill microgranítico.

En la petrografía las muestras del intrusivo corresponden a un *granito de feldespato alcalino* con textura granofírica, porfírica de cuarzo y feldespatos alcalinos. Una gran cantidad de fenocristales muestran golfos de corrosión (**Figura 11A**), la matriz presenta miarolas parcialmente rellenas de zeolitas, cristales de biotita con halos de hematita e inclusiones de Fe-Ti (**Figura 11B**), escasos xenocristales de anfíboles alterados y microcristales aislados de fayalita. En la mayoría de las muestras las plagioclasas y feldespatos presentan una fuerte alteración sericítica. Como minerales accesorios es posible encontrar zircón, apatito y óxidos de Fe-Ti.

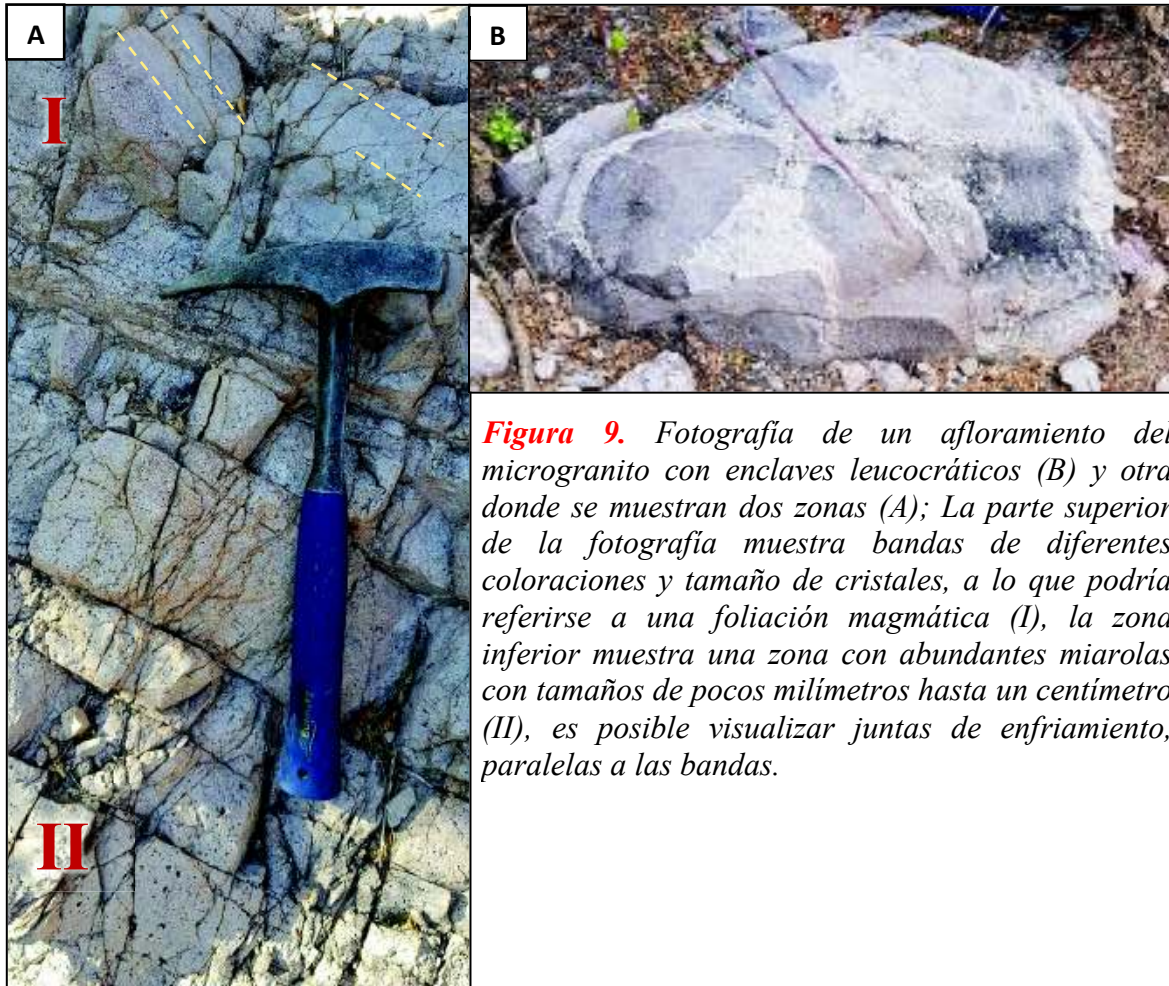


Figura 9. Fotografía de un afloramiento del microgranito con enclaves leucocráticos (B) y otra donde se muestran dos zonas (A); La parte superior de la fotografía muestra bandas de diferentes coloraciones y tamaño de cristales, a lo que podría referirse a una foliación magmática (I), la zona inferior muestra una zona con abundantes miarolas con tamaños de pocos milímetros hasta un centímetro (II), es posible visualizar juntas de enfriamiento, paralelas a las bandas.

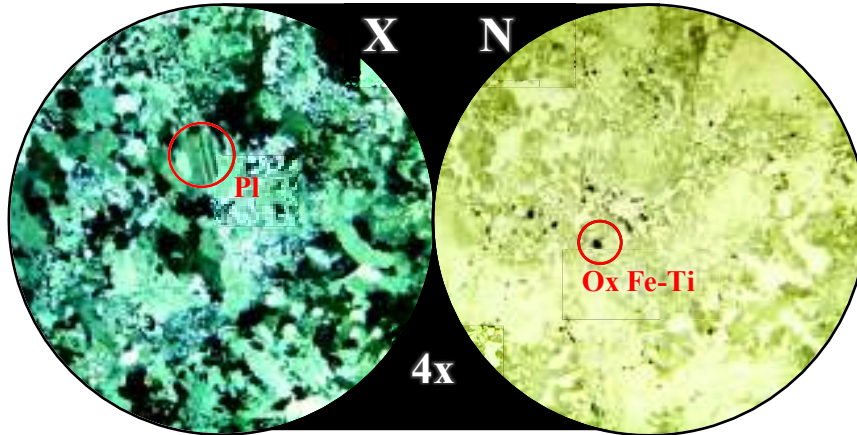


Figura 10. Microfotografía de la muestra SEA19-06 tomada con un microscopio petrográfico a luz polarizada (X) y luz natural (N). Correspondiente a un microgranito con textura granofírica y una alteración sericítica importante.

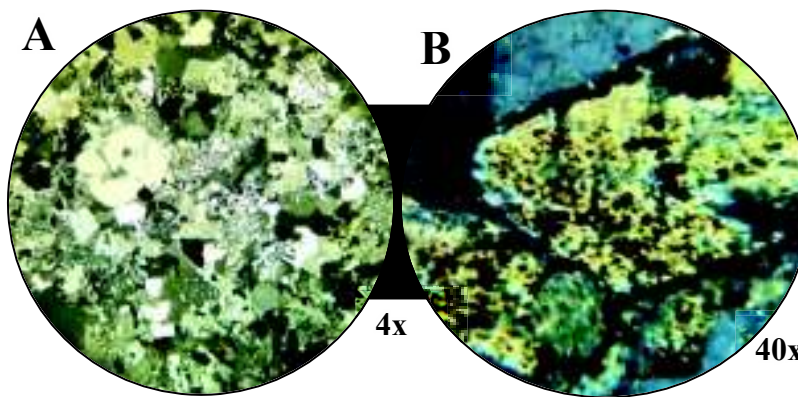


Figura 11. Microfotografías de la muestra SEA19-06 donde se muestran fenocristales con golfos de corrosión (A) y un cristal de biotita con inclusiones de óxidos de Fe-Ti y una corona de reacción (B), ambas fotos tomadas con luz polarizada.

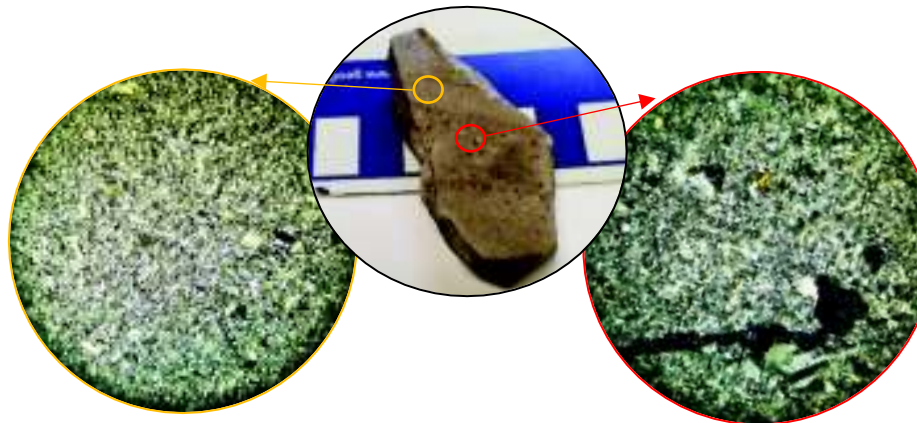


Figura 12. Fotografía de la muestra SEA19-04 donde se muestran bandas con diferentes coloraciones. Microfotografías que muestran diferente nivel de cristalinidad según la ubicación del objetivo (En rojo y naranja).

3.5.3 Diques hipovolcánicos de la Sierra El Aguaje

Diversos diques encontrados en el Valle SEA-Arroyo San José de Robinson han sido interpretados como unidades intrusivas alimentadoras del volcanismo de la “Fm. El Parral” (Velderrain-Rojas, 2014). En campo, los diques presentan una dirección general NE-SW cortando tanto al microgranito hipabisal como al basamento granodiorítico, y afloran gracias a la fuerte distensión y denudación ocurrida en la zona de estudio, sin embargo, a pesar de que todos han sido clasificados como conductos alimentadores, la disposición, apariencia y mecanismo de emplazamiento varía entre ellos, por lo que se realizó la siguiente distinción en función de la cronología y sus características:

(1) Inyecciones hipovolcánicas

Se realizaron dos distinciones en este subgrupo de unidades intrusivas:

El primer conjunto corresponde a diques de composición *granítica* con coloraciones moradas o grises, con abundantes miarolas. En campo, estos diques solo se encuentran emplazados en la unidad Microgranítica Hipabisal y algunos se presentan como estructuras segmentadas (Figura 13A). Estas inyecciones suelen formar un sistema conjugado con espesores desde 3 hasta 20cm, algunos se caracterizan por mostrar una inmiscibilidad de líquidos evidenciada por una forma plástica al límite de los diques (Figura 13A y 13B).

En microscopio, estos diques corresponden a una *traquita de feldespato alcalino* con textura porfirica a glomero-porfirica de sanidinas y plagioclasas de tipo andesina. Se observan feldespatos con texturas de sobre-enfriamiento (*Overcooling*) tanto plumosas como esferulíticas (Figura 14A y 14B). La matriz está formada por cuarzo (qz), feldespatos alcalinos (fa) y plagioclasas (pl) anhedrales, posibles xenocristales de biotita con abundantes óxidos de Fe-Ti y grupos dispersos de miarolas. Como minerales accesorios se identificaron zircón y apatito.

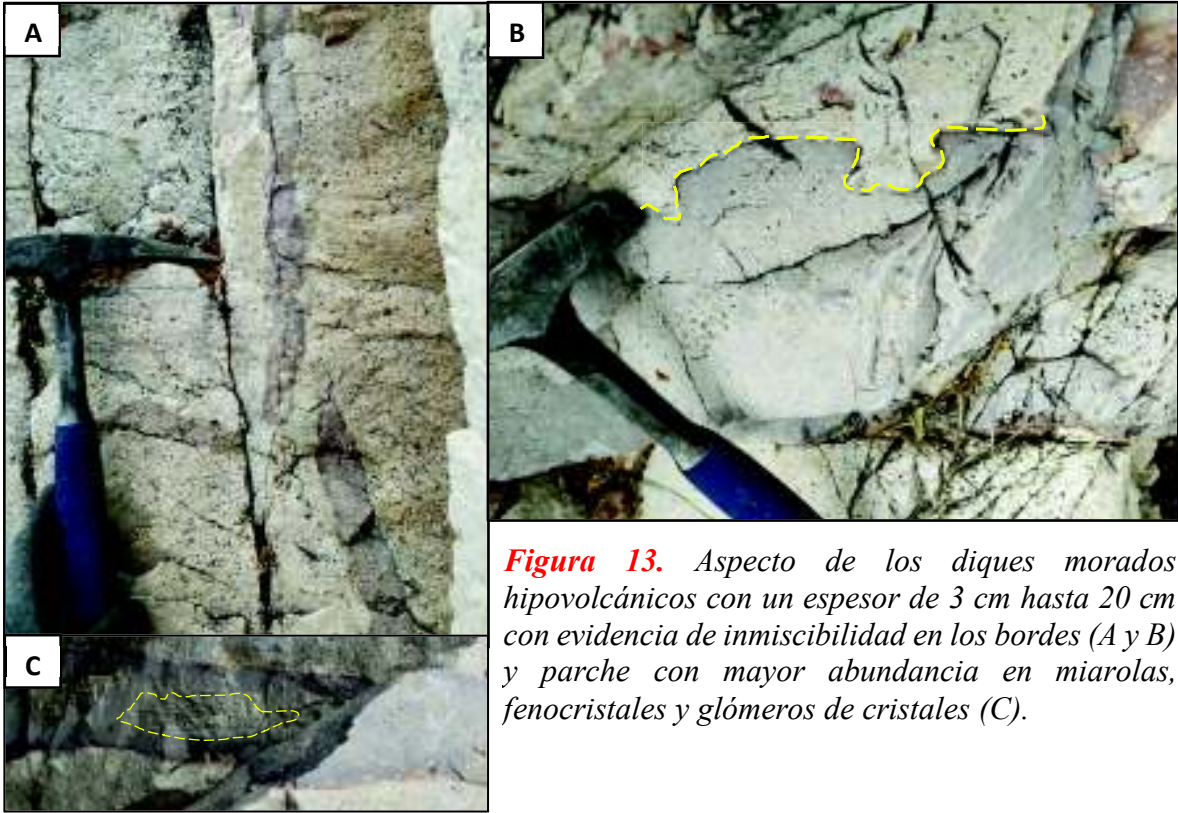


Figura 13. Aspecto de los diques morados hipovolcánicos con un espesor de 3 cm hasta 20 cm con evidencia de inmiscibilidad en los bordes (A y B) y parche con mayor abundancia en miarolas, fenocristales y glómeros de cristales (C).

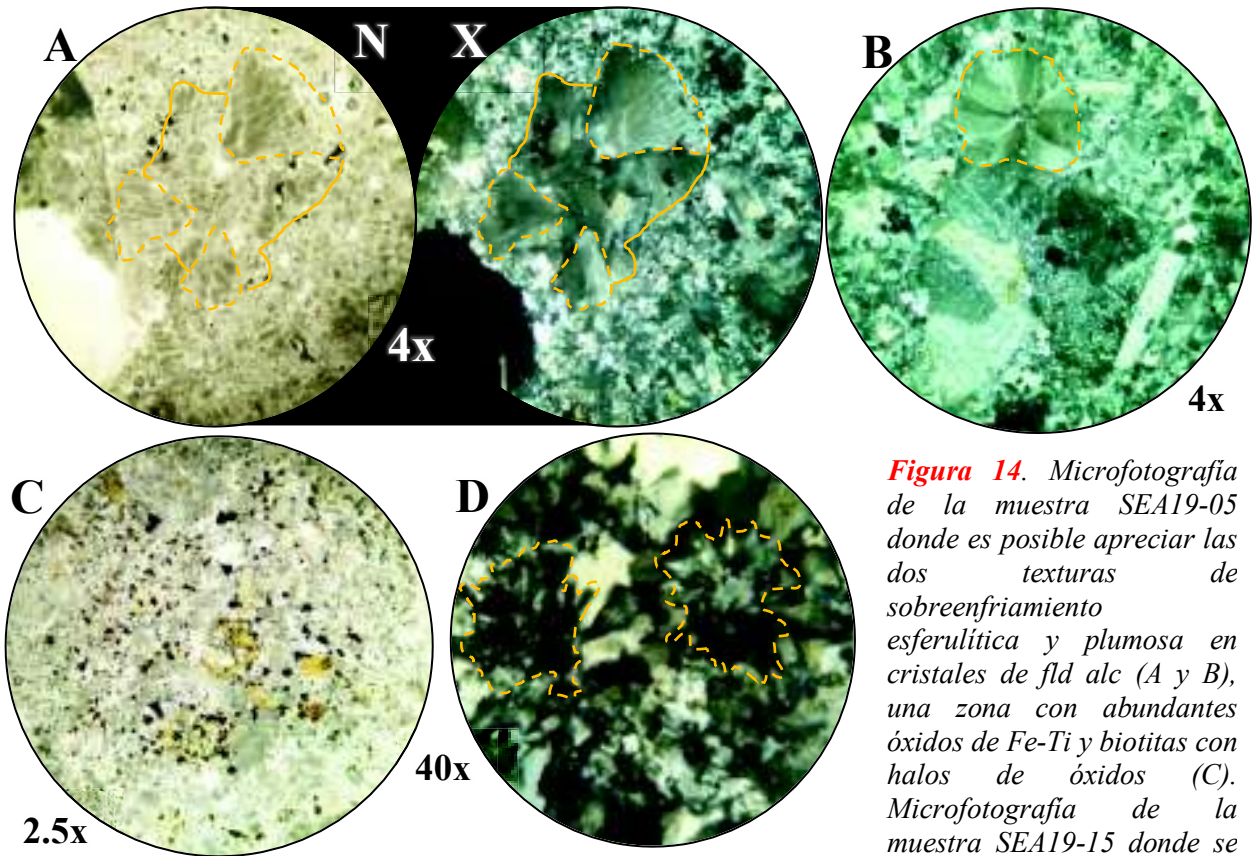


Figura 14. Microfotografía de la muestra SEA19-05 donde es posible apreciar las dos texturas de sobreenfriamiento esferulítica y plumosa en cristales de fld alc (A y B), una zona con abundantes óxidos de Fe-Ti y biotitas con halos de óxidos (C). Microfotografía de la muestra SEA19-15 donde se muestran texturas radiales de qz y fld alc.

El segundo conjunto de diques riolíticos considerados para la subdivisión *Inyecciones hipovolcánicas* es de composición riolítica, de coloraciones café, gris, rosada y blanca, difieren en que estos diques presentan reomorfismo indicado por un flujo distinguible en forma de bandas de diferentes coloraciones (Figura 15) y cortan al basamento granodiorítico. Los diques presentan texturas que indican la movilización de magma durante el emplazamiento, las cuales se detallarán a continuación:

Este conjunto muestra una composición *riolítica* porfírica a glomero-porfírica de fld alc, qz y pl, esporádicamente es posible encontrar piroxenos, anfíboles y fantasmas de cristales reemplazados por iddingsita. Adicionalmente, la matriz suele presentarse en forma de un mosaico félsico microcristalino a criptocristalino. Como minerales accesorios es común encontrar fayalita, zircones y apatitos.

Diversas estructuras como plagioclasas esqueléticas, esferulitas de feldspatos alcalinos, cristales de forma plumosa y litofisis se interpretan como texturas cristalinas de sobre-efriamiento (*overcooling*) (Figura 16C, 16D, 16E y 16G).

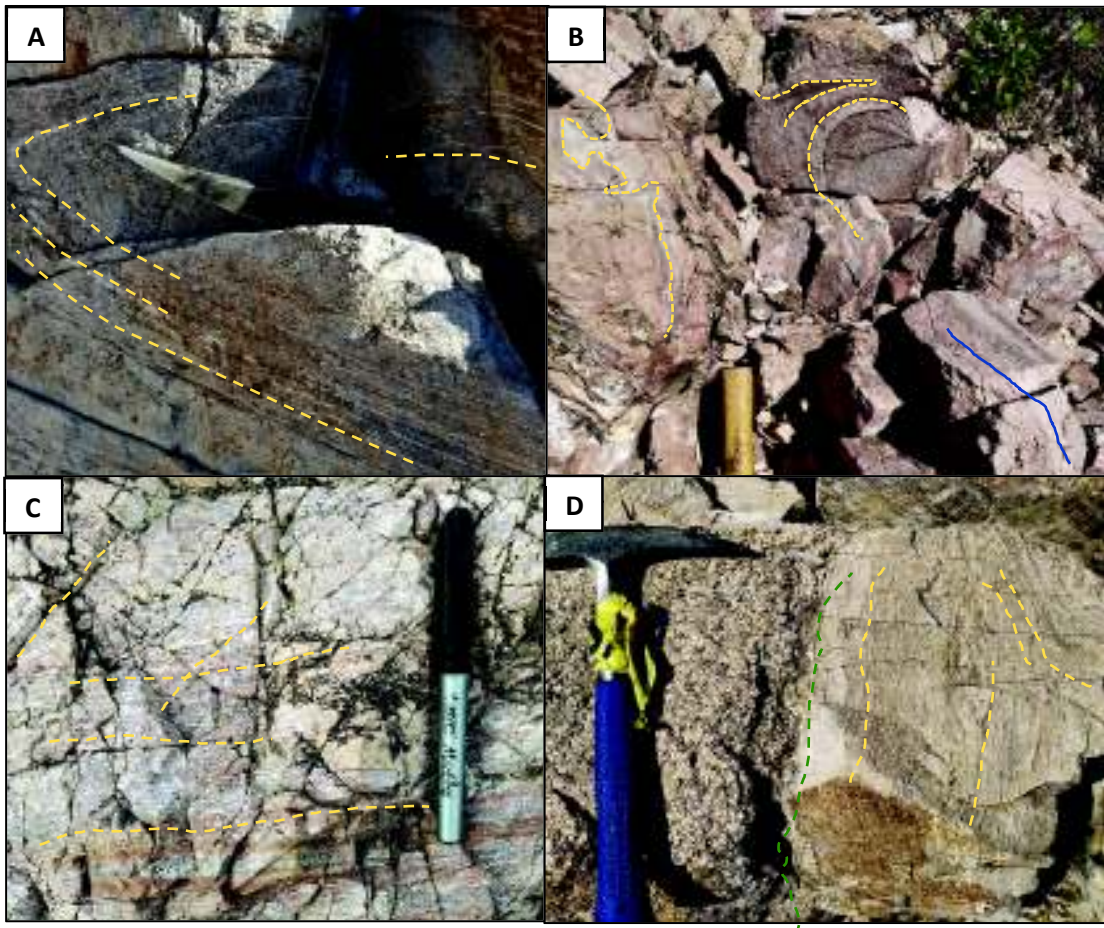
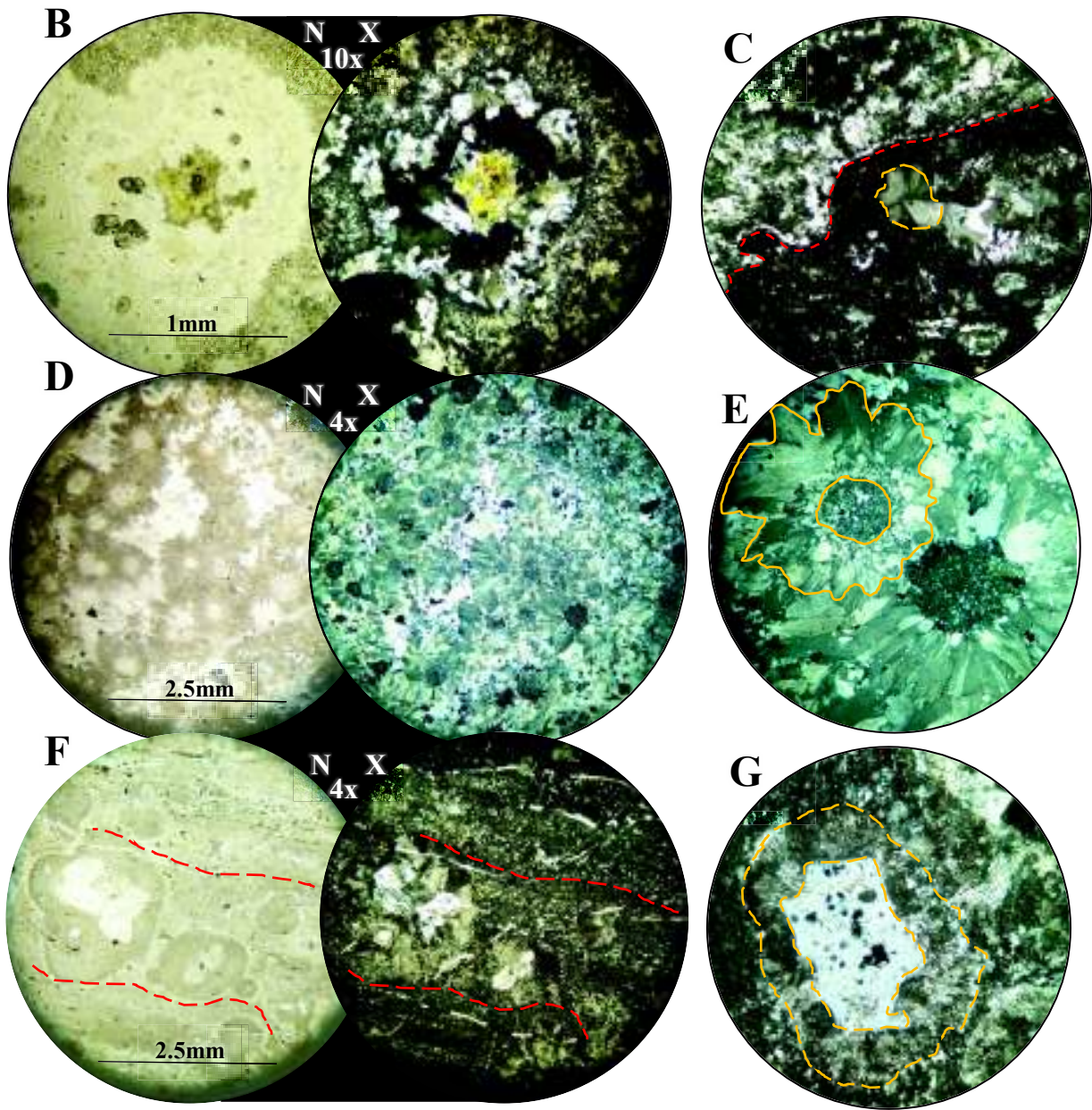
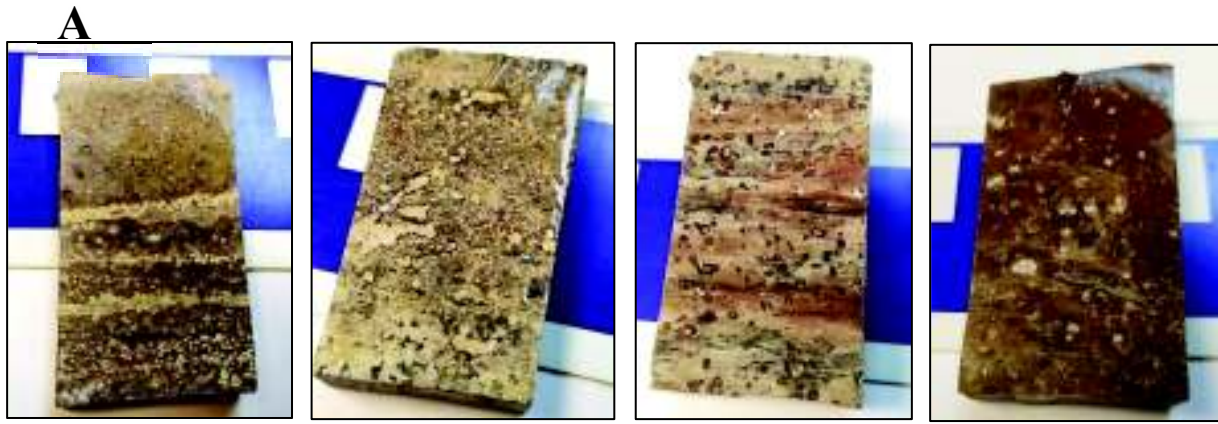


Figura 15. Aspecto de los diques mostrando bandas de diferentes coloraciones, pliegues (A), contorsiones (B y D) y un contacto con el basamento granodiorítico (D)



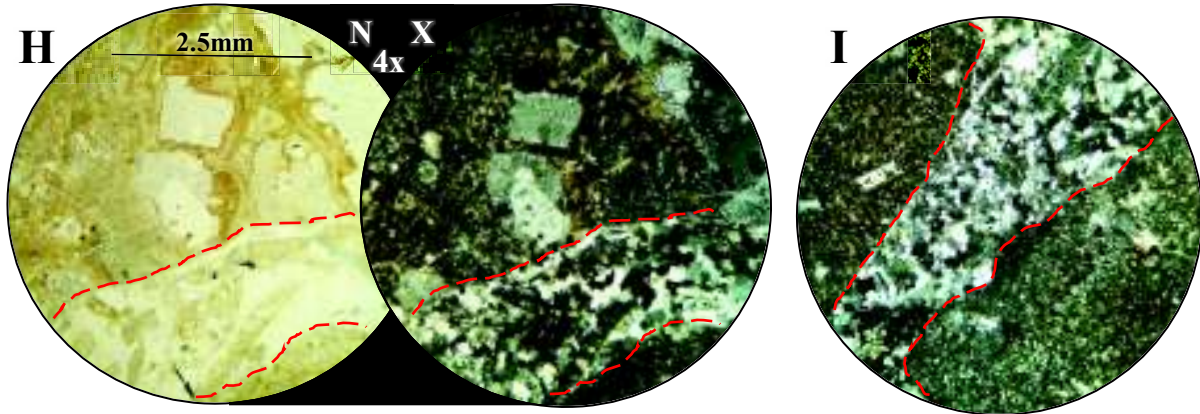


Figura 16. A) Fotografías de las secciones pulidas de los diques, de derecha a izquierda las muestras son: SEA19-11, SEA19-14, SEA19-23, SEA19-13. B) En la muestra SEA19-11 se observa una litofisa? con diferentes niveles de cristalización, desde glómeros cristalinos, vidrio y hasta un glómero cristalino de epidota en el centro; C) un dique donde se observan dos fases del magma, una cristalina y otra con vidrio, fenocristales y esferulitas. D) y E) La muestra SEA19-14 presenta una zona de esferulitas con centros vítreos que desarrollan una textura en forma de flor. F) y G) En la muestra SEA19-23 se aprecia una foliación magmática indicada con rojo y fenocristales rodeados de una textura plumosa de agregados cristalinos. Por último, la muestra SEA19.13 presenta dos fases magmáticas una con bandas alteradas color café y otra con cristales de mayor tamaño y una estructura cristalina más definida (I), la muestra también presenta fragmentos líticos y xenocristales con textura gráfica y fenocristales corroídos (H).

Estos diques muestran fases identificables por sus coloraciones en muestras de mano, las cuales forman las distintivas bandas de flujo y que en petrografía son reconocibles por su heterogeneidad, traducida en diferentes niveles de cristalinidad (desde vidrio hasta cristales) y lo cual se ejemplifica con la **Figura 16C**. En algunas otras muestras, es posible encontrar dos fases distintas, la primera de un flujo viscoso con cristales de menor tamaño, xenocristales y líticos de microgranito; y otra fase más homogénea con una mejor cristalinidad emplazada en forma de fracturas irregulares (**Figura 16 I**).

3.5.4 Diques andesíticos posteriores

Este conjunto de diques es escaso en el campo, muestran coloraciones café oscuro-rojizas y fenocristales de plagioclasa. En petrografía se observa que las muestras corresponden a una *andesita porfírica de andesina* con una textura intersertal/traquítica en una matriz vítrea con óxidos, iddingsita y plagioclasas orientadas mostrando un flujo. Esta litología presenta también xenolitos del microgranito (**Figura 17 y 18**) y otros microlitos. La muestra SEA19-07 presenta dos fases inmiscibles que son definidos por una diferencia en cuanto al nivel de cristalinidad y dirección de flujo (**Figura 19A**). Por otro lado, la muestra SEA19-12 tiene una matriz sin presencia de pl, pero muestran una proporción similar en cuando a la relación cristales-vidrio (70 % vs 30%) Los fenocristales de feldespatos muestran una importante alteración sericítica, texturas esqueléticas y golfos de corrosión (**Figura 19C, D y G**)

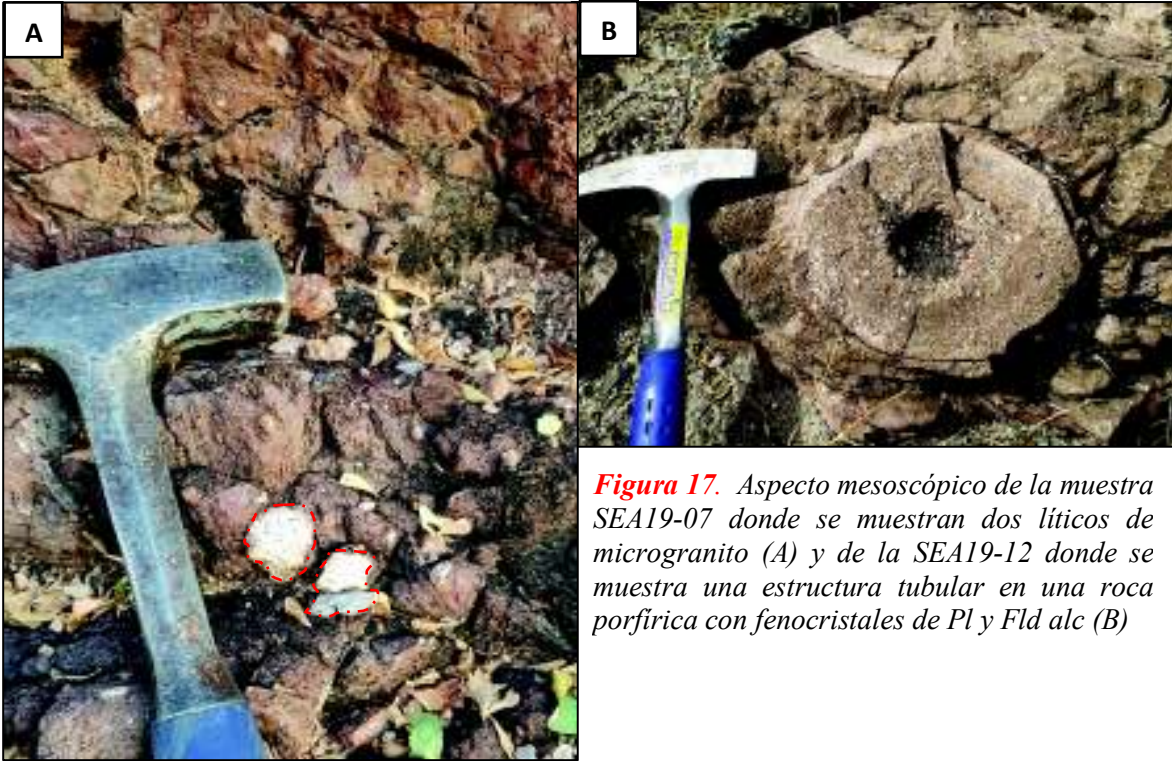


Figura 17. Aspecto mesoscópico de la muestra SEA19-07 donde se muestran dos líticos de microgranito (A) y de la SEA19-12 donde se muestra una estructura tubular en una roca porfírica con fenocristales de Pl y Fld alc (B)

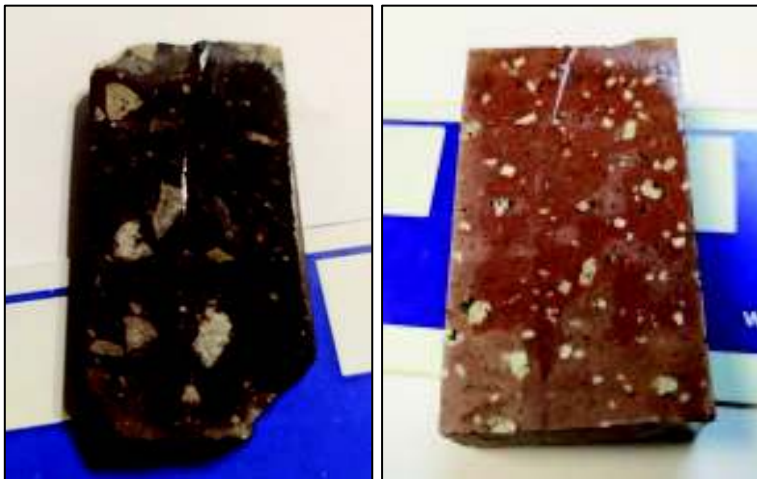


Figura 18. Secciones pulidas de las muestras SEA19-07 (izquierda) y SEA19-12 (derecha). En la primera se observan líticos del microgranito y fenocristales de plagioclasas, en la segunda se observan claramente fenocristales de plagioclasa de hasta 3 milímetros de longitud.

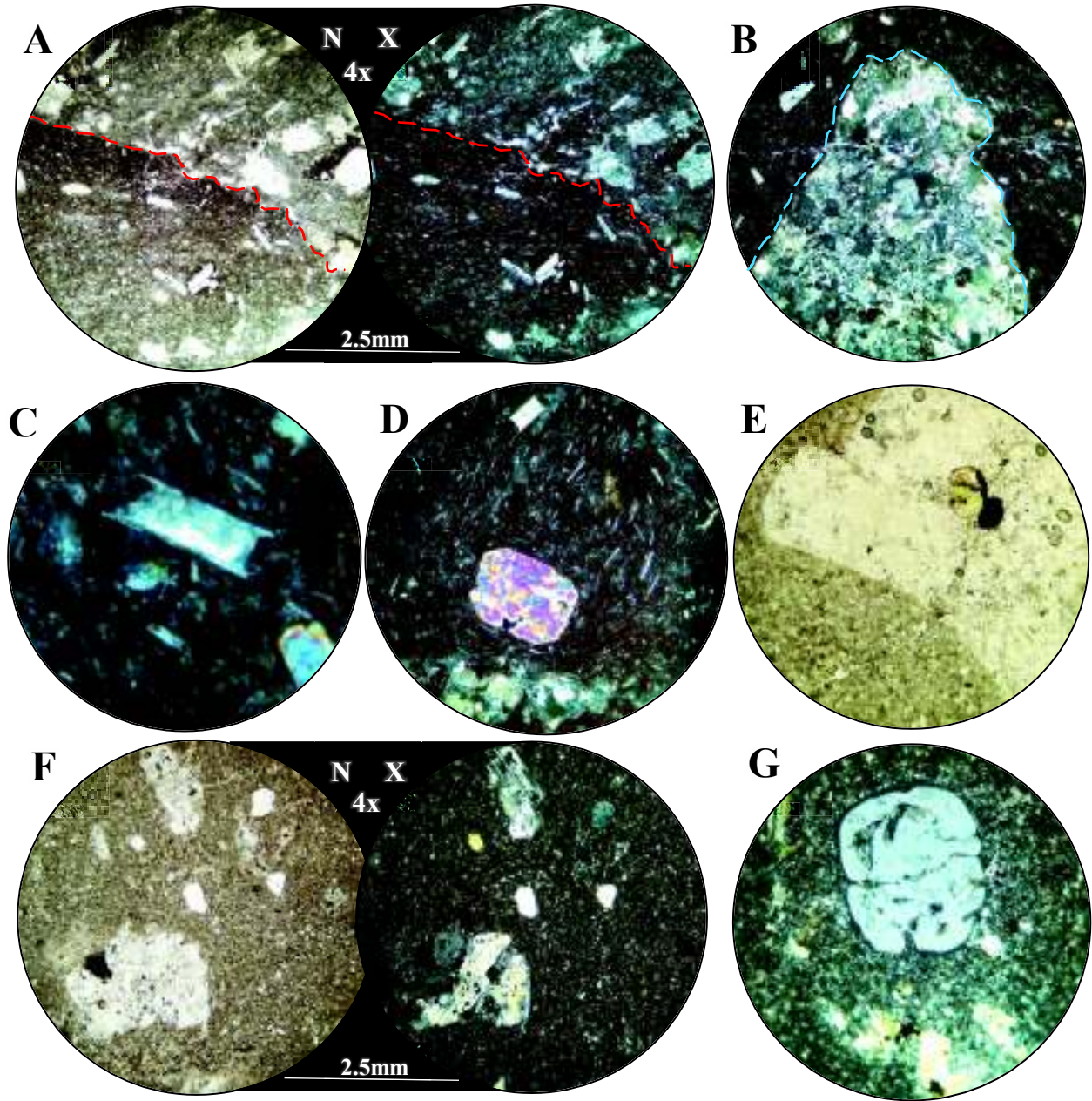


Figura 19. Microfotografías de las muestras SEA19.07 (A-D) y SEA19-12 (E-G). Se observan dos fases con direcciones de flujo y cristalinidad diferente (A), un fragmento lítico del microgranito con textura granofírica (B), se observan plagioclasas esqueletales y corrosión en un cristal de Px (C y D). En la muestra SEA-19-12 se observan cristales en desequilibrio, y un cristal de Px alterado (F), cristales de iddingsita (E) y un fenocristal de cuarzo corroído (G).

3.6 Geología estructural

Los datos estructurales presentes en este capítulo, incluyen planos de foliación magmática, actitudes de cuerpos magmáticos, contactos entre diferentes unidades y fallas. Los datos se tomaron de forma acimutal y con la “Regla de la mano derecha” (RMD). Posteriormente, en la etapa de gabinete, los datos se graficaron con el programa *Stereonet 10.1.1* (Allmendinger et al., 2012) contemplando los que se mencionan a continuación.

Se realizaron en total 13 mediciones de foliación magmática para los cuerpos intrusivos presentes en el área. Para el caso de la unidad Basamento-Granodiorita las mediciones se realizaron a partir de la orientación de fenocristales de anfíbol que mostraba dicha unidad (Figura 29E), su actitud resultó ser variable con rumbo de entre 350° y 39° con echados entre 40° y 90° . Las mediciones de foliación magmática para el sill-microgranito se realizaron en zonas cercanas a la base del cuerpo, dando como media una actitud de 192° de rumbo y 54° de echado. Para el caso de los diques, se realizaron 6 mediciones de foliación por flujo, los cuales son también variables y cuyos rumbos se ubican desde los 9° hasta los 211° , con echados entre 20° y 78° .

En total, se realizó una medición de 43 fallas las cuales se pueden dividir en dos grupos principales; el primero, un amplio grupo de fallas, con rumbos ubicados desde los 0° hasta los 70° y con echados pronunciados de 64° hasta los 90° ; un segundo grupo muestra rumbos aproximados de 133° y 303° con echados pronunciados que van desde los 77° hasta los 88° .

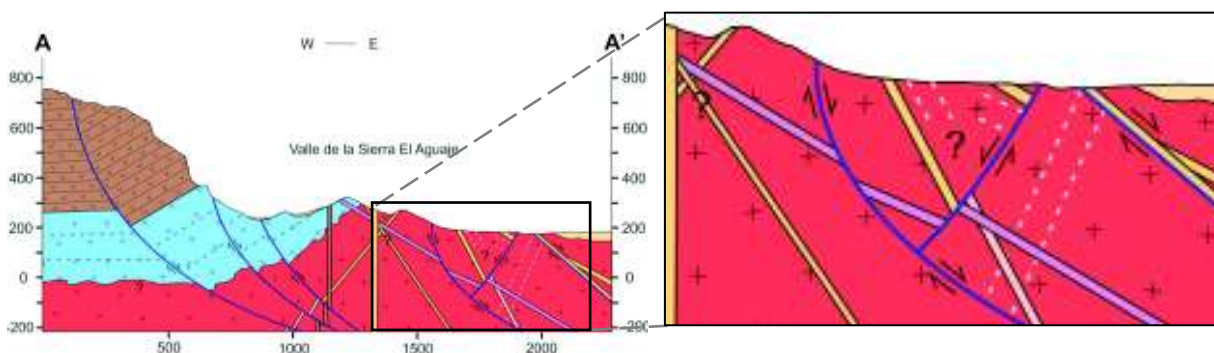


Figura 20. Sección geológico-estructural A-A' del área de estudio con un zoom que muestra la foliación magmática del basamento granodiorítico con una línea gris discontinua y su posible disposición a profundidad.

3.6.1 Foliación magmática

Para el basamento granodiorítico, las disposiciones medidas en campo se encontraron solamente en la porción este de la zona B del área de estudio (Figura 27) y su representación en las secciones geológico-estructurales (Figura 20) no muestran una continuidad y tienen una tendencia diferente a la que muestra el microgranito (Figura 23).

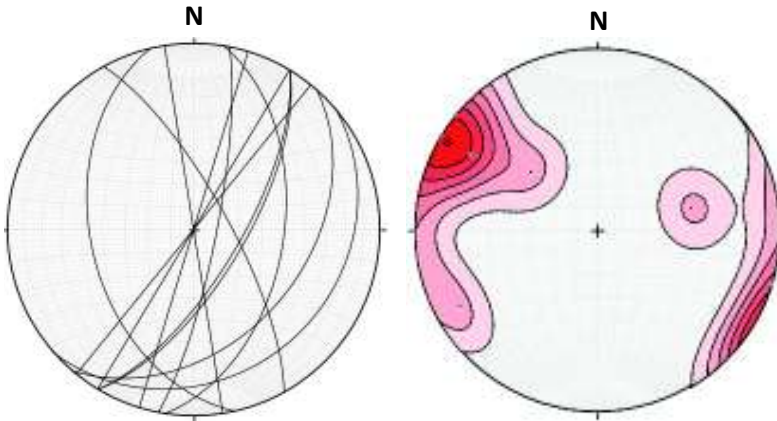


Figura 21. Representación estereográfica de áreas iguales para actitudes de foliación magmática del Basamento-Granodiorítico (izquierda) y proyecciones al polo con su respectivo mapa de contornos (derecha).

El microgranito presenta un rumbo y echado promedio de 192° y 54° respectivamente, definido a partir de imágenes satelitales, fotografías panorámicas (Figura 26B) y actitudes medidas en campo. Dicha actitud se plasma en ambas secciones geológicas con una línea gris discontinua y ayuda a inferir a profundidad la disposición del cuerpo (Figura 22). Nótese que es importante considerar que la actitud será variable según la posición del bloque que se tome.

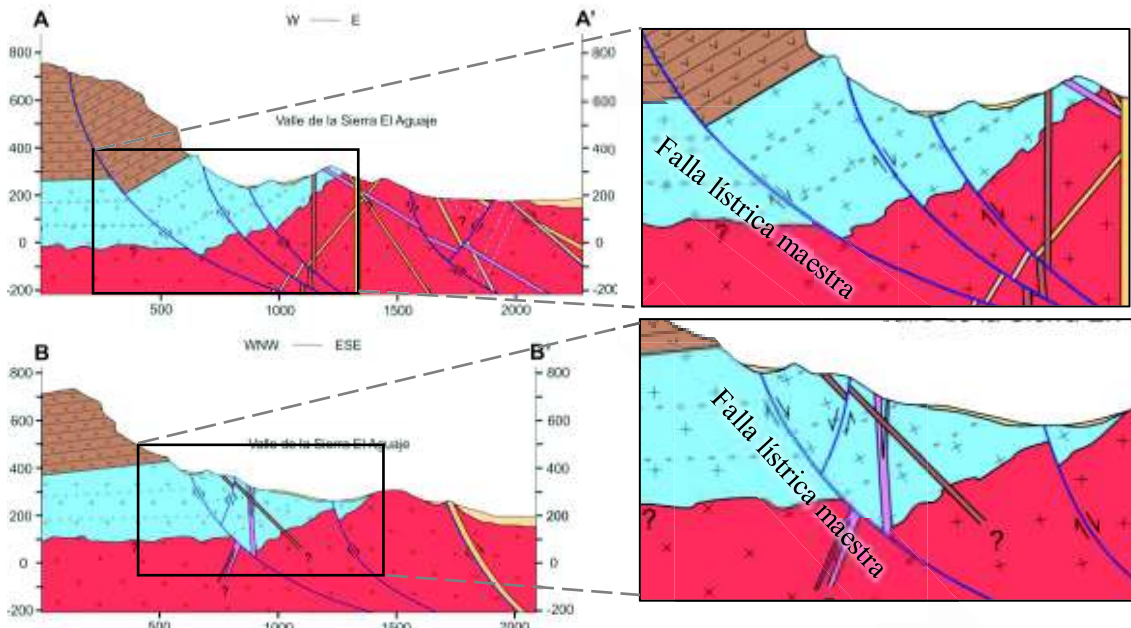


Figura 22. Secciones geológicas del área de estudio con un zoom que muestran la foliación magmática del sill-Microgranito con una línea gris discontinua y su disposición a profundidad.

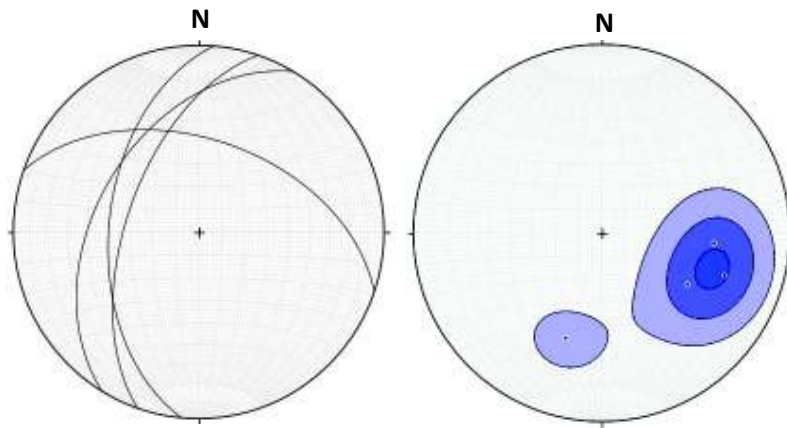


Figura 23. Representación estereográfica de áreas iguales para actitudes de foliación magmática para la unidad intrusivo Hipabisal-Microgranito (izquierda) y proyecciones al polo con su respectivo mapa de contornos (derecha).

3.6.2 Fallas

Las 43 fallas medidas en el área de estudio se encontraron principalmente en la unidad de Microgranito y en el basamento granodiorítico. Fue posible identificar y medir fallas normales, oblicuas y laterales gracias a indicadores de falla como estrías (Figura 29 A y B), desplazamientos relativos, así como las actitudes generales en estructuras observadas a partir de imágenes satelitales y fotogeología. Las fallas no se encontraban equitativamente distribuidas en la zona, por lo que se realizó un mapa que indica donde existen agrupamientos de las fallas mencionadas (Figura 27).

Las fallas mostradas en el estereograma muestran ser predominantemente de alto ángulo (no menor a los 64°). Se presentan dos grupos principales, el primero con direcciones variables NE-SW y otro más pequeño NW-SE (Figura 24).

En la porción oeste de la zona de estudio se infiere la presencia de una gran falla normal con plano lítrico (figura 25) y cuyo contorno está indicado por una línea roja discontinua en la figura 26A.

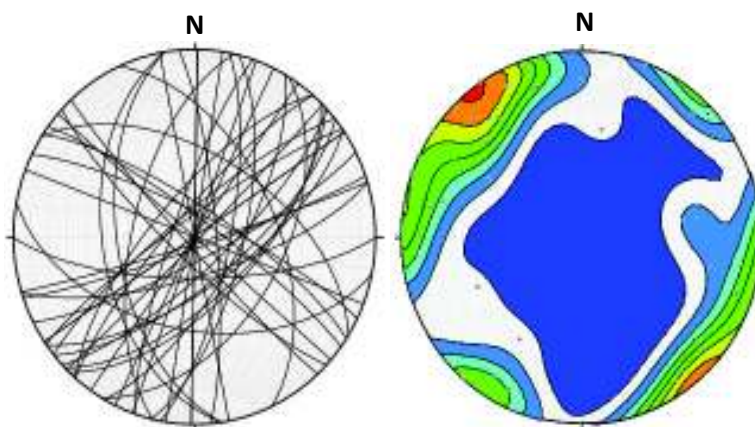


Figura 24. Representación estereográfica de áreas iguales de la actitud de las fallas medidas (izquierda) y proyecciones al polo con su respectivo mapa de contornos (derecha).

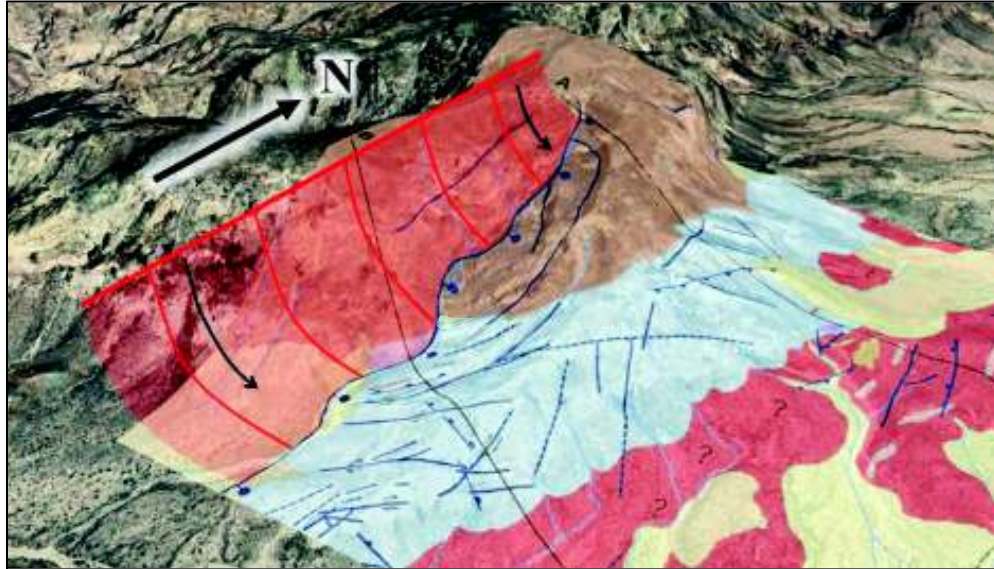


Figura 25. Representación esquemática de una falla maestra normal en tijera con plano lístrico en la imagen satelital del área de estudio con sobreposición de la porción oeste del mapa geológico. (Google, Image Landsat / Copernicus, 2021)

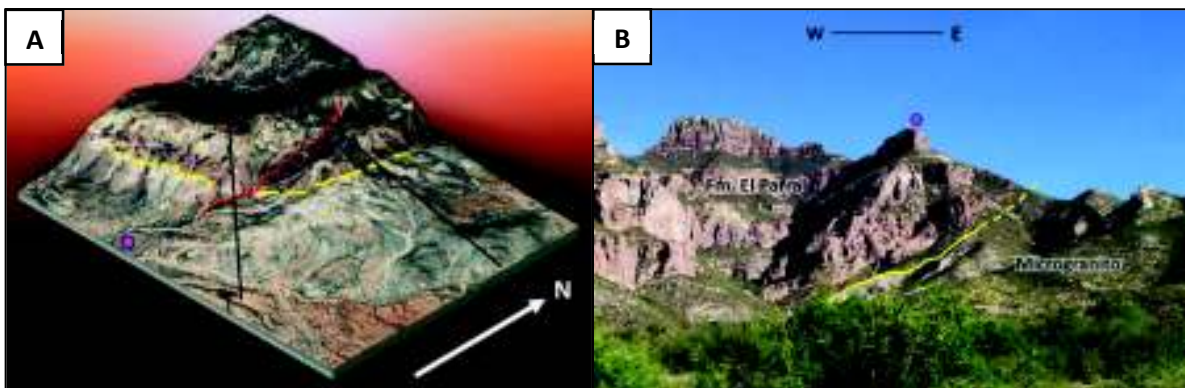
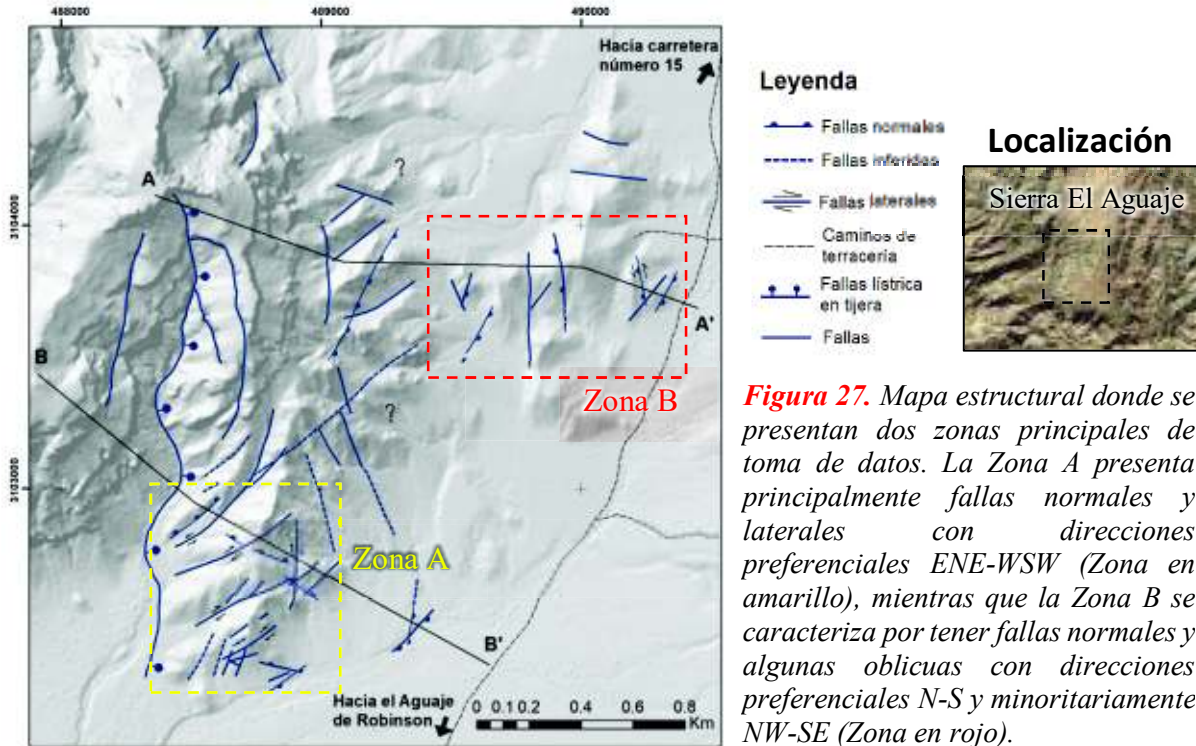


Figura 26. Modelo hecho a partir del software 3D Map Generator donde se muestra en amarillo el contacto Fm. El Parral-Microgranito. En rojo la proyección en superficie de la falla lístrica maestra, con líneas negras la traza de las secciones geológicas (A) y con un punto morado desde donde se tomó la fotografía de la derecha, una fotografía panorámica donde se muestra en amarillo, el contacto superior inferido, para la Fm El Parral-Microgranito y que es paralelo la disposición del cuerpo hipabisal (B).



3.6.3 Orientación de diques hipovolcánicos

Se realizaron en total 15 mediciones de actitudes de diques los cuales tienen direcciones NE-SW con echados variables desde los 40 hasta los 84°, se caracterizan por formar un grupo continuo de diques con actitudes paralelas como se observa en la siguiente figura.

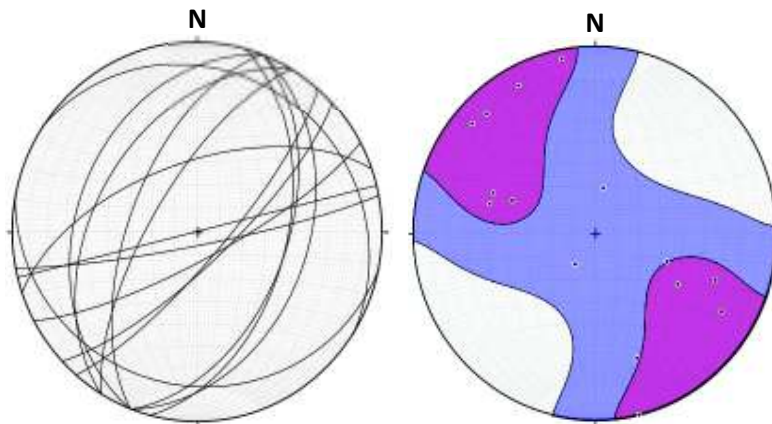


Figura 28. Representación estereográfica de áreas iguales de la actitud de los diques medidos (izquierda) y proyecciones al polo con su respectivo mapa de contornos (derecha).

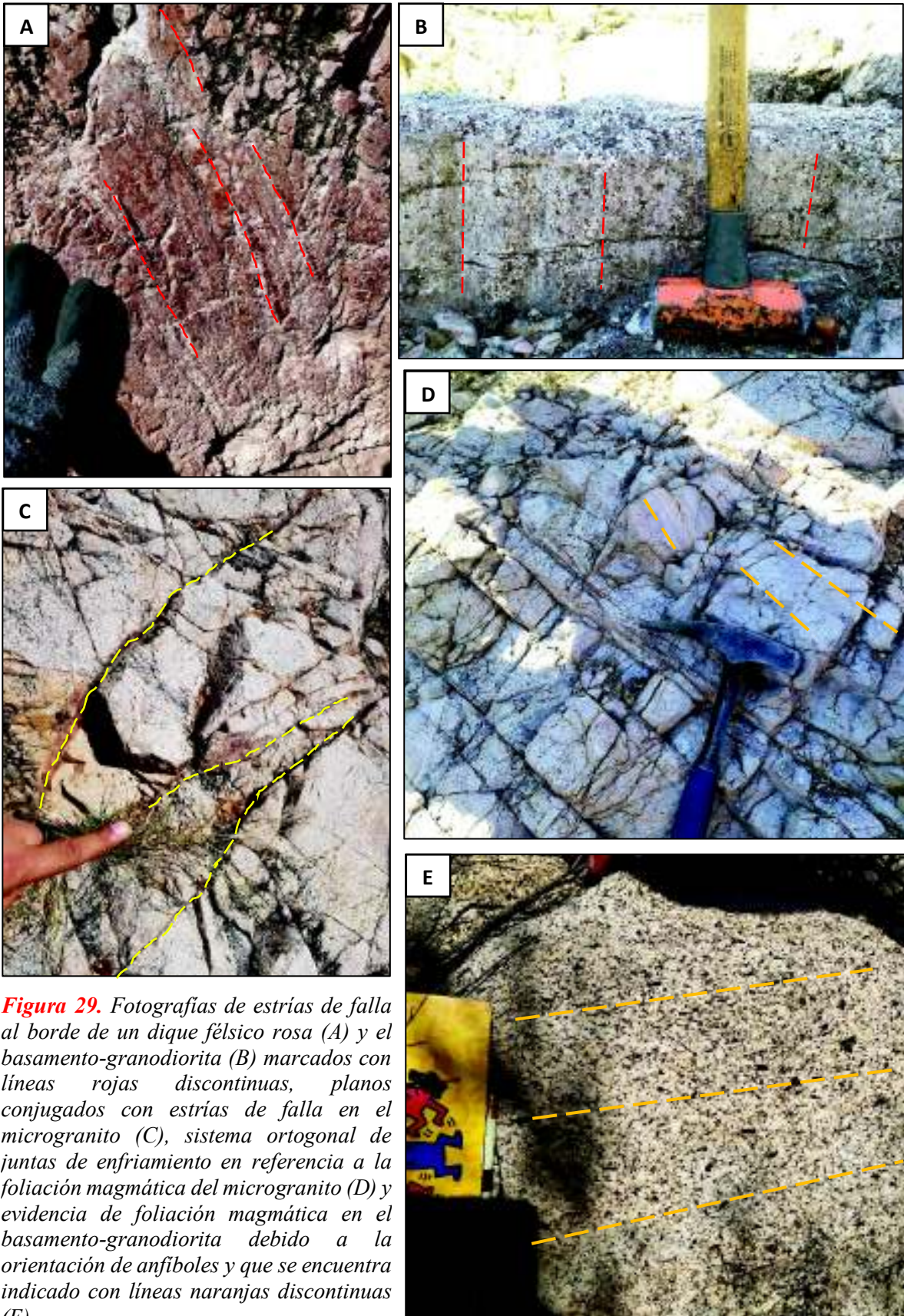


Figura 29. Fotografías de estrias de falla al borde de un dique félsico rosa (A) y el basamento-granodiorita (B) marcados con líneas rojas discontinuas, planos conjugados con estrias de falla en el microgranito (C), sistema ortogonal de juntas de enfriamiento en referencia a la foliación magmática del microgranito (D) y evidencia de foliación magmática en el basamento-granodiorita debido a la orientación de anfíboles y que se encuentra indicado con líneas naranjas discontinuas (E).

4 Discusiones

4.1 Implicaciones magmáticas – Microgranito hipabisal

Un cuerpo hipabisal es aquel emplazado en una profundidad no mayor a 5 km, suelen tener una velocidad de enfriamiento media, tienden a presentar una fase acuosa alta en volátiles y el magma es heterogéneo. Bajo estas circunstancias, la formación de arreglos granofíricos en la roca es favorecida por la baja presión, pero manteniendo una temperatura suficientemente alta para la movilización de componentes cristalinos (Lowenstern, 1997).

La existencia de fenocristales con evidencias de desequilibrio tales como golfos de corrosión y halos de alteración manifiestan dos etapas principales para este magma, el primero con una permanencia en un reservorio principal con una cristalización homogénea que genera a los cristales más grandes (fenocristales) y otro en el cual el magma es transportado mediante diques a reservorios más someros donde cambia súbitamente de temperatura y termina por enfriarse a presiones menores, generando durante esta última etapa, fases gaseosas (*second boiling*) en forma de inclusiones fluidas y visibles en diferentes muestras de esta unidad; evidenciado en el desarrollo de miarolas.

Los dos principales motivos de la pérdida rápida de temperatura son: en primer lugar, una pérdida de presión isotérmica y desgasificación; en segundo, un enfriamiento adiabático que produce exsolución de la fase más fluida del magma, generando una expansión de la fase volátil (Lowenstern, 1997), bajo este contexto, estos fenómenos podrían haber sido provocados por la continua extensión de la SEA, junto con una fuerte denudación (Velderrain-Rojas, 2014). En petrografía, estos fenómenos han generado diversas texturas cristalinas producidas por un sobre-enfriamiento (*overcooling*) del magma. Castro-Dorado (2015) establece que la textura esferulítica-plumosa como la presente en la unidad microgranito-hipabisal tiende a formarse entre 800-700°C para plagioclasas del tipo andesinas, esto a partir de un diferencial térmico (ΔT) mayor a 150°C y bajo una tasa de cambio de temperatura superior a 16°C/hora necesaria para influir en la morfología de los cristales.

La aparición de diques hipovolcánicos petrológicamente relacionados al microgranito sugieren la ocurrencia de al menos dos episodios de emplazamiento para un mismo magma, el cual pone en evidencia la existencia de un mismo reservorio que alimenta el ascenso del magma en diferentes episodios, que al emplazarse en un nivel superior y solidificarse bajo diferentes mecanismos de emplazamiento, forman rocas con distintos aspectos texturales y de coloración. Por otro lado, Kavanagh (2015) sugiere que los sills actúan tanto como reservorios magmáticos a poca profundidad como alimentadores de erupciones sucesivas. Bajo este contexto y aunada la aparición de diversos diques hipovolcánicos con edades similares y de diferentes aspectos, estos cuerpos pueden llegar a emplazarse en el microgranito ya frío, y ser cortantes entre sí.

Dicho episodio magmático en la región se interpreta como producto de un adelgazamiento avanzado de la litósfera (Vidal-Solano et al., 2007), cuyos cuerpos intrusivos ya han sido reportados en diferentes localidades (Flores, 1929; Johnpeer, 1977; Sheridan et al., 1978; Cochemé, 1981; Mora-Álvarez, 1993; Vega-Granillo et al., 2004; Velderrain-Rojas, 2014; Velderrain-Rojas, 2016; Velderrain-Rojas, 2021) y que específicamente en el área de estudio son responsables de los derrames volcánicos félsico-intermedios de la Fm. El Parral.

Los enclaves encontrados en la base del Microgranito muestran tener una composición intermedia, hace referencia al ingreso y mezcla de un magma ajeno (*Magma Mingling*), y que, por presentar una temperatura, viscosidad y una densidad diferente, son inmiscibles entre sí (Sklyarov, 2005), formando cuerpos redondeados “flotantes” dentro del microgranito.

En cuanto a la disposición espacial del cuerpo, distintas evidencias como rasgos geológicos en imágenes satelitales y en campo, la ocurrencia de juntas de enfriamiento, bandas de diferentes coloraciones, la variación del nivel de cristalinidad según la porción del intrusivo y su textura mostrada en el microscopio petrográfico, muestran ser un cuerpo hipabisal o subvolcánico tipo *sill* emplazado concordantemente a la secuencia volcánica de rift y al techo del basamento granodiorítico, tiene un echado hacia el oeste debido a los bloques deslizados por fallas lístricas (Ver modelo de evolución tectónica) y un echado subhorizontal en el bloque de piso no deformado.

4.2 Implicaciones magmáticas – Diques Hipovolcánicos

Durante las primeras fases de extensión del Mioceno Medio-Tardío en la región, un amplio magmatismo, producto de un adelgazamiento avanzado de la litósfera (Vidal-Solano et al., 2007), conformado por múltiples emplazamientos y diques alimentadores interconectados, llegaron a formar parte de una actividad magmática importante hacia los ~11 Ma (Velderrain-Rojas, 2016). Estas evidencias ocurren en toda la región debido a la exhumación de dichos cuerpos ya sea por erosión, y fallamiento. La aparición de los cuerpos micrograníticos y diques asociados mostrados en este estudio como “Inyecciones Hipovolcánicas”, forman parte del sistema de cuerpos intrusivos que, junto con el microgranito, son parte del evento magmático que constituye a la Fm. El Parral.

Las inyecciones hipabisales descritas, a pesar de que son divididas en dos subgrupos de diques, ambos tienen la misma composición, y se interpreta que la razón por la que sus características texturales y de coloración son variables, es debido a su nivel y mecanismo de emplazamiento. Algunos diques que tienen una relación directa con el microgranito, suponen ser cuerpos que hayan permanecido con una temperatura constante y se hayan enfriado de manera contemporánea al microgranito, generando texturas cristalinas similares a este último, mientras que aquellos que se encuentran emplazados en el basamento granodiorítico,

muestran un reomorfismo derivado de un flujo viscoso. Esto podría representar niveles de emplazamiento más cercanos a la superficie y conlleva a un ascenso con pérdida de calor por una posible inclusión progresiva de agua meteórica en el sistema. Bajo este contexto, se propiciaría la generación de texturas cristalinas de sobre-enfriamiento (*overcooling*) tipo

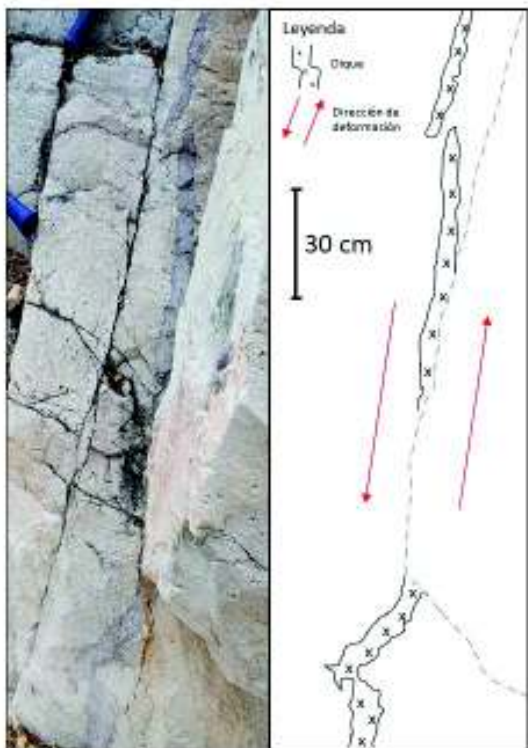


Figura 30. Fotografía de la inyección traquítica donde se esquematizan los segmentos en arreglo echelon.

esferulítica, en forma de flor y plumosa, y que, con la ayuda de las evidencias encontradas en el estudio petrográfico (fases heterogéneas, texturas cristalinas, presencia de vidrio, etc) sugiere una exsolución de fases volátiles por saturación y una expansión de los volátiles disueltos (Myron Best, 2003). Dichas texturas de sobre-enfriamiento encontradas en las inyecciones hipovolcánicas muestran que existió una pérdida de temperatura con al menos $\Delta T > 250^\circ\text{C}$ y con tasas de enfriamiento de hasta varias centenas de grados por hora, cerca de que el fluido magmático forme vidrio (Castro-Dorado, 2015 y Myron Best, 2003).

Durante la fuerte extensión del Mioceno tardío, el sistema de fallas normales y de deslizamiento a rumbo formaban parte de debilidades que permitieron la intrusión de los cuerpos en forma de diques, esta relación se infiere comparando los estereogramas de actitudes para ambas estructuras (fallas y diques), y que incluso pudieron haber sido

reactivadas tras el enfriamiento de los magmas, durante las últimas etapas de la distensión que moldeó la topografía de la SEA.

Uno de los diques de composición traquítica que presenta segmentaciones, hace referencia a un arreglo en tipo *en échelon* (*Echelon dike segments*, Weinberger, 2000) que muestra la existencia de una deformación estructural contemporánea al emplazamiento de los cuerpos intrusivos en forma de diques (Figura 30). Lo anterior ha sido evidenciado en los cuerpos subvolcánicos silícicos del Mioceno Tardío, en la región de Guaymas (Velderrain-Rojas et al., 2021)

4.3 Diques andesíticos posteriores

Los considerados informalmente como “*diques andesíticos posteriores*” son nombrados de esta manera debido a la aparición de fragmentos líticos del granófiro (xenolitos). Muestran fases fluidales con cristales orientados y una cantidad importante de vidrio en la matriz, además, se presentan cristales esqueléticos, que según Castro-Dorado

(2015) se relacionan a un sobre-enfriamiento (ΔT) de entre 100 y hasta 200°C a partir de agregados cristalinos generados a una mayor temperatura (poco superiores a los 1000°C) y a razones de enfriamiento de algunas decenas de grados por hora. Estos cuerpos magmáticos, debido a las características mostradas en la petrografía, podrían estar relacionados al magmatismo intermedio-máfico de 10-8 Ma, que compone a la Formación El Guajará (Velderrain-Rojas, 2014).

4.4 Implicaciones estructurales

Las estructuras secundarias encontradas y medidas en el área de estudio dan identidad al sistema en distensión de la SEA. Este estilo pudo ser utilizado de manera temprana como debilidades por las cuales se emplazaron y abrieron paso los líquidos magmáticos. En el área de estudio la tectónica en extensión genera bloques rocosos segmentados por fallas, formando geometrías conjugadas y que junto con otras fallas antitéticas, forman pequeños bloques de tipo graben y horst (Figura 34). De esta manera el Valle de la Sierra El Aguaje, específicamente en el Arroyo San José de Robinson, se caracteriza estructuralmente por una falla maestra lítrica en tijera (Figura 31) que se encuentra conjugada con otras fallas normales, lítricas y laterales formando geometrías paralelas y escalonadas (Figura 32), rotando bloques de roca y generando una basculación de los bloques seccionados de hasta 50° hacia el NE, dichas fallas lítricas presentaron una evolución a partir de la falla maestra, en donde el bloque de techo se deforma a través de la generación de nuevas fallas lítricas, que se conectan a profundidad a un mismo nivel de despegue, transfiriendo los nuevos bloques de techo segmentados al bloque de piso (Maloney et al. 2012). El nivel de despegue deberá ser aquel donde exista un cambio en la resistencia mecánica considerable, ya sea por porosidad, densidad o nivel de compactación de alguna litología. Para este caso, este cambio es marcado por el basamento cristalino (Granodiorita) y el cual se infiere podría estar a ~250 metros por debajo del nivel del mar según la estimación gráfica hecha a partir de las secciones geológicas. Este sistema de estructuras produjo la apertura progresiva del Valle de la SEA y cuyas características pueden ser apreciables a una mayor escala mediante rasgos topográficos distintivos en el área (lineamientos), tal y como se observa en la figura 31.

Finalmente, este estilo de deformación tiene una connotación importante para la tectónica del área debido a que, según su edad, actitudes y ubicación, forman parte del régimen transtensional en el margen oriental del Golfo de California (Herman, 2013; Velderrain-Rojas et al., 2021) y coincide con ser un sistema estructural formando cuencas de separación (*pull apart basins*) ubicadas en las zonas de relevo de fallas laterales derechas (Umhoefer et al., 2018). De esta manera, en la figura 31, una falla maestra es inferida de forma oblicua a la dirección de la expansión del Valle de la SEA, así como al grupo menor de fallas presentadas en la figura 23. Estas estructuras fueron mencionadas por Velderrain-Rojas (2014) como fallas relacionadas a estructuras mayores, pero que son menos expuestas en campo. Esta falla maestra podría ser una continuidad de la Falla El Vigía, la cual se establece pertenece a un grupo de fallas dextrales asociadas a un *rifting* oblicuo, tales como

la Falla San Pedro Nolasco Este y la Falla Santa Úrsula (Velderrain-Rojas, 2016; Aragón-Arreola, 2005). Dicha estructura guardaría entonces, una relación con las grandes fallas que delimitan la porción oeste del Valle de San José de Guaymas (Fragoso-Irinceo et al., 2018) (Figura 1).

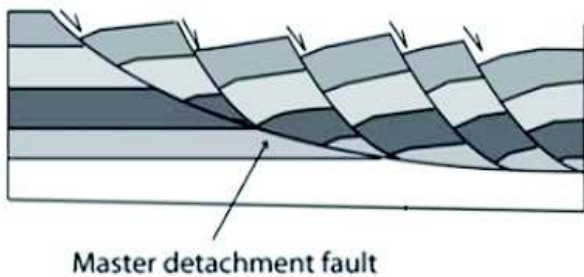
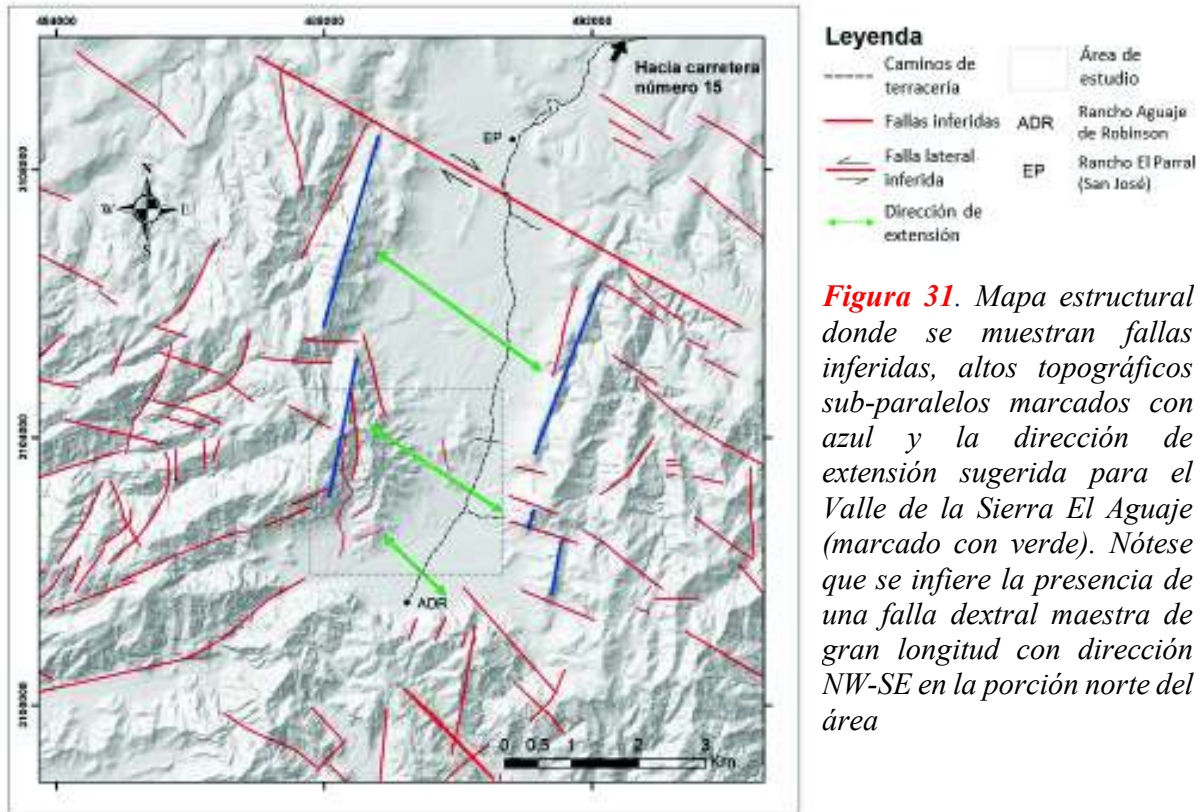


Figura 32 Modificado de Maloney, 2011. Modelo de fallas lístricas paralelas escalonadas formadas a partir de una falla maestra con plano lístrico.

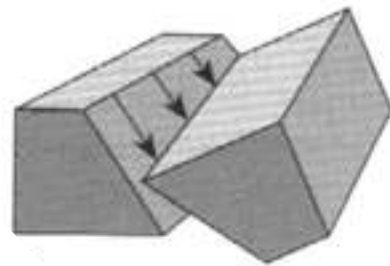


Figura 33. Ejemplo de falla en tijera de plano recto.

Figura 34. Esquema de una geometría de horsts y grabens por fallas en tijera a partir de una falla maestra listrica. (Zhiwei, 2019)

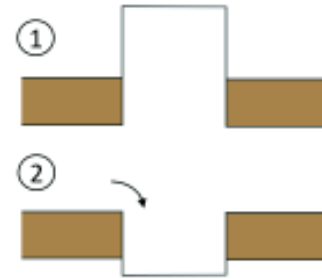
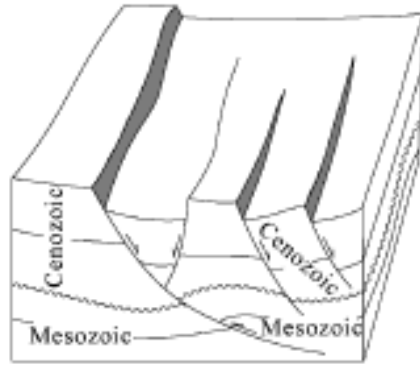


Figura 35. Modelo esquemático que representa la inversión de relieve tras la erosión de un alto topográfico.

4.5 Evolución estructural esquemática del Valle de la Sierra El Aguaje

Partiendo del hecho que los modelos esquemáticos aquí propuestos consideran como punto de partida un bajo topográfico (Figura 35), para esquematizar y sintetizar los principales eventos estructurales ocurridos en el área de estudio, el siguiente modelo cronológico muestra 4 figuras esquemáticas (Figura 36.1, 36.2, 36.3 y 37.4):

(1) La primera fase representa el inicio del adelgazamiento cortical por *rifting* oblicuo, que conlleva al inicio del magmatismo durante el Mioceno medio-tardío. Este magmatismo podría surgir a partir de uno o varios reservorios principales ubicados a profundidad que se abren paso a partir de estructuras tempranas. La secuencia volcánica de *rift* comienza a mostrar sus primeras evidencias en superficie y sus vestigios son los de la Fm. El Parral.

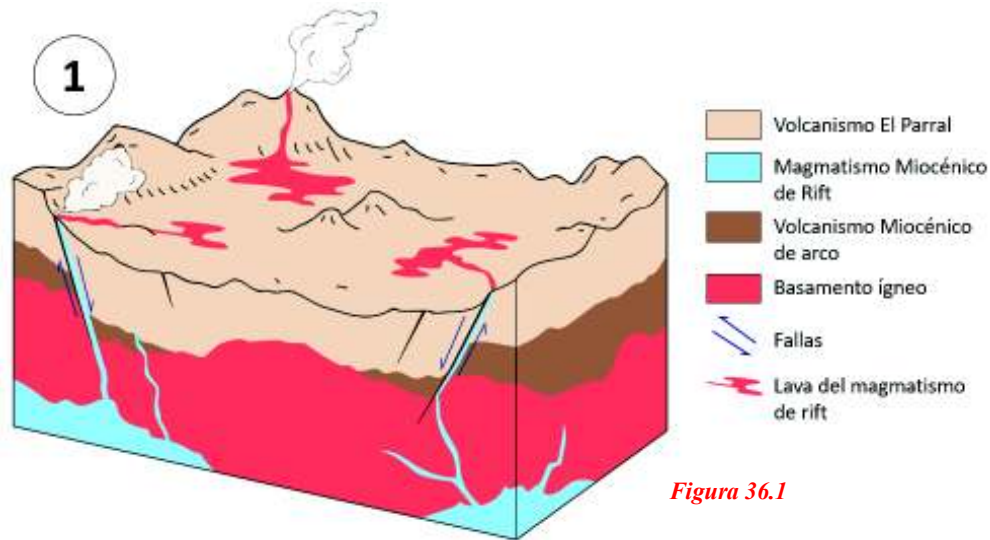


Figura 36.1

(2) Mientras el magmatismo y la distensión continuaban, las unidades volcánicas forman una secuencia cada vez más gruesa. La distensión propicia una actividad magmática sintectónica, desarrollando una mayor cantidad de diques conectados a cuerpos hipovolcánicos (reservorios secundarios). La evolución tectónica provoca que algunas de las estructuras profundicen más en la corteza, generando progresivamente una mayor deformación.

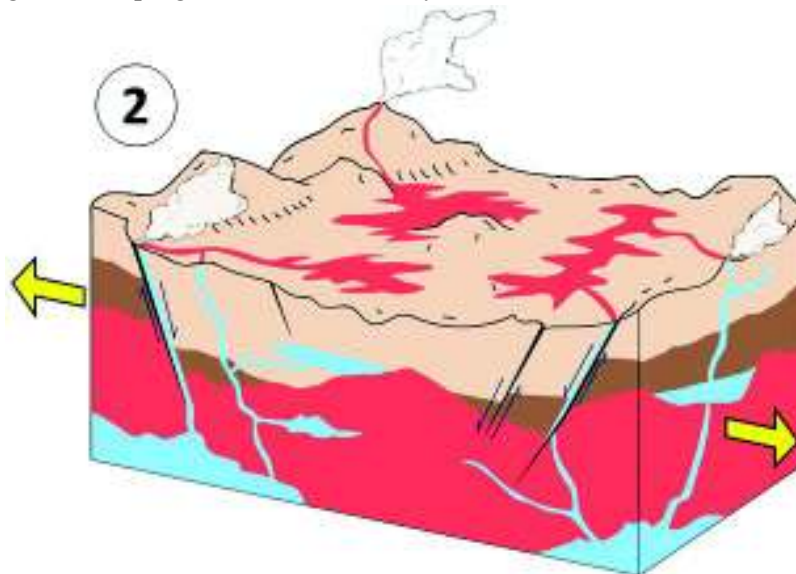
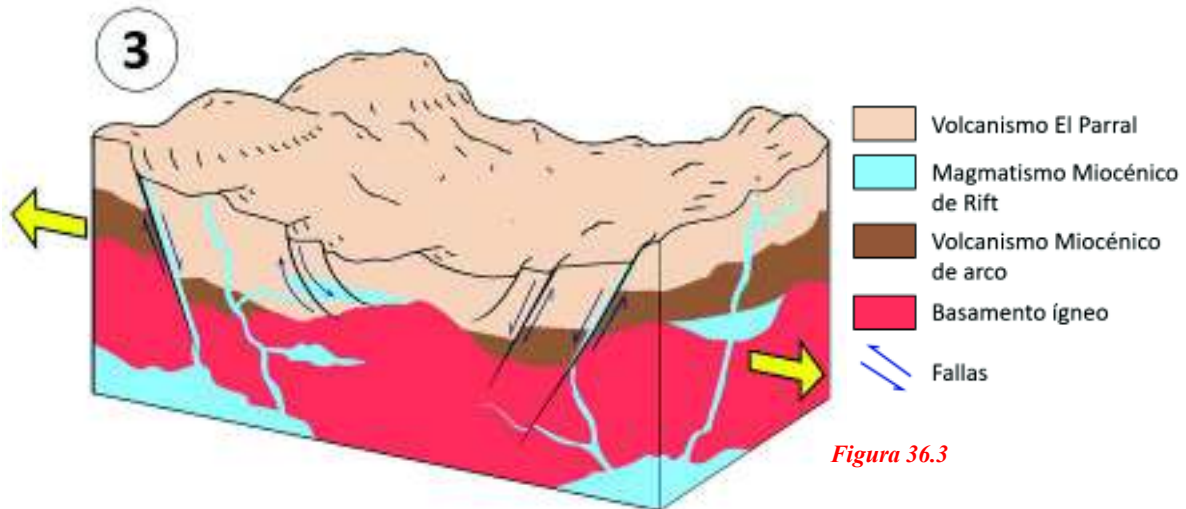
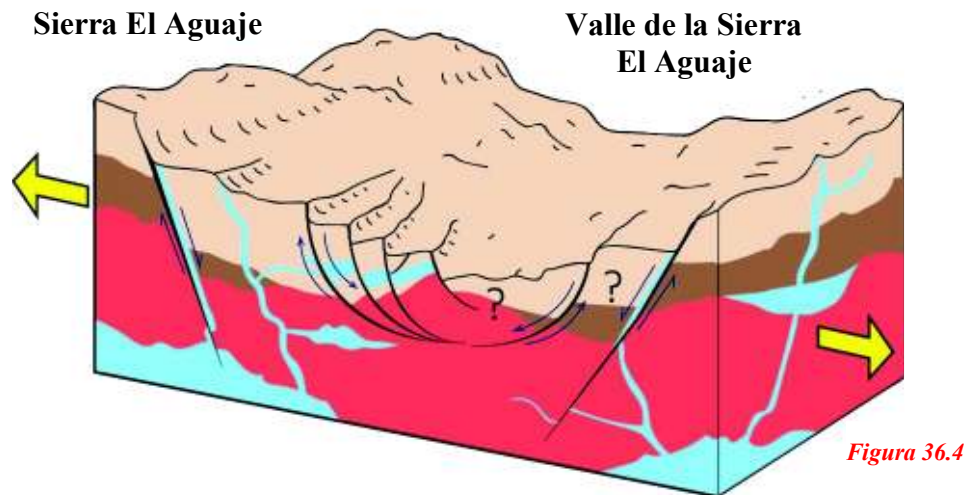


Figura 36.2

(3) Posteriormente, la extensión y la erosión pasan a adquirir protagonismo, nuevas fallas adquieren un comportamiento lístrico y que, junto con las ya existentes, profundizan en el subsuelo, generando distensión, comenzando a bascular unidades rocosas y a esculpir el Valle de la Sierra El Aguaje.



(4) Por último, un importante intemperismo fluvial y eólico erosionan de manera importante las secuencias volcánicas. Una apertura progresiva del valle de la SEA provoca que las estructuras evolucionen y adquieran una mayor longitud, generando una rotación de bloques y una geometría de fallas lístricas escalonadas, que junto con otras fallas antitéticas, forman estructuras tipo semi-graben y horst.



Una idea alterna que podría ser considerada para futuros trabajos es la siguiente: Partiendo del hecho que el actual Valle de la Sierra el Aguaje fuese un antiguo bloque tectónico tipo horst, que posteriormente fue erosionado de manera importante, generando una inversión de relieve donde lo más alto se convierte en la zona más baja (el actual valle). De esta manera el basamento granodiorítico representaría a un bloque de horst, que ahora se encuentra a menor altura y es parcialmente expuesto en el Valle.

Esta idea es factible ya que en Sonora los horst son en su mayoría conformados por este tipo de basamento que fue expuesto durante el evento tectónico de extensión anterior (*Basin and Range*), sin embargo, una futura adquisición de datos geofísicos en un perfil que permita observar la disposición de las estructuras a profundidad, así como su geometría, pudiera encontrar a la antigua falla que delimitaría al horst, planteando y precisando a grabens antiguos.

5 Conclusiones

Las inyecciones hipovolcánicas muestran como conjunto, diferentes facies de magmas cogenéticos que difieren en su aspecto según su mecanismo y nivel de emplazamiento. Por un lado, existen evidencias de unos que se emplazaron en el Microgranito mientras aún estaban en una fase plástica, estos presentan una cristalinidad homogénea, un enfriamiento relativamente lento y evidencias de un sobreenfriamiento más bajo (de aproximadamente 150°C). Por otro lado, otras inyecciones muestran un emplazamiento donde el fluido magmático se instala en debilidades estructurales y fallas que cortan tanto al basamento como al microgranito ya frío, lo cual ayuda a una pérdida más rápida de calor del magma, en donde ocurre una exsolución de las fases volátiles y se genera un sobre-enfriamiento mayor a 250° (y hasta aproximadamente 450°C).

Según las evidencias encontradas en campo, en imágenes tanto satelitales como aéreas, se puede inferir que el cuerpo intrusivo Microgranito (Granófiro) es de tipo *sill* y se encuentra emplazado entre el basamento y la secuencia volcánica. Este cuerpo podría llegar a tener un espesor de hasta ~330 metros en su zona más gruesa, así como una extensión horizontal de más de 2 km.

Las estructuras del área de estudio evidencian que el Valle de la Sierra El Aguaje-Arroyo San José de Robinson se encuentra delimitado en la parte oeste (y probablemente también en la parte este) por fallas lítricas maestras con componente rotacional que se encuentran conjugadas con otras fallas laterales, normales y otras fallas sintéticas, las cuales forman geometrías escalonada, de horst y graben. Estas estructuras son el producto de la apertura progresiva del Valle de la SEA y favorecen su erosión en la porción central.

El Valle de la SEA-Arroyo San José de Robinson a escala regional, fue formado a partir de fallas dextrales maestras que, a gran escala, forman parte de un sistema de estructuras de contexto transtensional. Debido a su ubicación y dirección, una falla maestra de tipo transtensional se infiere por lineamientos a partir de imágenes satelitales y se considera que podría ser la continuación de la Falla El Vigía, que ocurre al más al Sur, en el Valle de San José de Guaymas. Dichas evidencias encuadrarían a la SEA como parte del sistema transtensivo inicial del cual el Golfo de California forma parte.

Un evento magmático posterior, que se revela en el área de estudio por cuerpos intrusivos en forma de diques de composición intermedia, podría relacionarse con las coladas volcánicas más recientes de la región y que forman parte de la Fm. El Guajará.

6 Bibliografía

- Aragón-Arreola, M., Morandi, M., Martín-Barajas, A., Delgado-Argote, L., & González-Fernández, A. (2005).** Structure of the rift basins in the central Gulf of California: Kinematic implications for oblique rifting. *Tectonophysics*, 409(1-4), 19-38.
- Allmendinger, R. W., Cardozo, N. C., and Fisher, D. (2012).** Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors: Cambridge, England, Cambridge University Press, 289pp.
- Barajas, A. M. (2000).** Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 72-83.
- Barrera-Guerrero, S. (2012).** Contribución al estudio del Evento volcánico hiperalcalino del Mioceno medio en el NW de México: Petrología de la Sierra Libre, Sonora (Tesis de maestría). Universidad de Sonora, Hermosillo, México. 113pp.
- Best, M. G. (2013).** *Igneous and metamorphic petrology*. John Wiley & Sons.
- Burchardt, S. (2018).** *Volcanic and Igneous Plumbing Systems: Understanding Magma Transport, Storage, and Evolution in the Earth's Crust*. Elsevier.
- Castro-Dorado, A. (2015).** *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Cochemé J. J. (1981).** Mise en évidence d'un granite subvolcanique associé aux laves tertiaires du Sonora (Mexique) : Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Paris, tome 293, Serie II, p. 989-992.
- Flores, T. (1929).** Reconocimientos Geológicos en la Región Central de Sonora, Bol. Inst. Geol. Mex., 49, p. 1-23.
- Gómez-Valencia, A.M., 2014.** Evolución espacio-temporal y petrológica del magmatismo Oligoceno-Mioceno en Sonora, México: Énfasis en el magmatismo Adakítico relacionado al cese de la subducción (Tesis de Maestría). Universidad de Sonora, Hermosillo, México. 287pp.

- Gómez-Valencia, A; Vidal-Solano, J; López-Martínez, M; Vega-Granillo, R. y Pellares, C. (2015).** Petrografía, geoquímica y geocronología del magmatismo orogénico en Rayón: Características petrológicas de los últimos magmas asociados a la subducción en Sonora, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 20, 20.
- Herman, S. W. (2013).** A paleomagnetic investigation of vertical-axis rotations in coastal Sonora, Mexico: Evidence for distributed transtensional deformation during the Proto-Gulf shift from a subduction-dominated to transform-dominated plate boundary in the Gulf of California. Santa Barbara, California. University of California. 38 pp.
- Johnpeer, G. D. (1977).** Reconnaissance geology and petrology of the Guaymas area, Sonora, Mexico (M. Sc. Thesis), Arizona State University, 67 p.
- Karig, D. E., & Jensky, W. (1972).** The proto-gulf of California. *Earth and Planetary Science Letters*, 17(1), 169-174.
- Kavanagh, J. L., Boutelier, D., & Cruden, A. R. (2015).** The mechanics of sill inception, propagation and growth: Experimental evidence for rapid reduction in magmatic overpressure. *Earth and Planetary Science Letters*, 421, 117-128.
- Pérez-Aguilar, L. (2017).** Evolución tectono-magmática en la región de la Sierra Libre, Sonora, México, y su relación con el Proto-Golfo de California durante el Mioceno medio-tardío. Tesis de Maestría, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, 355pp.
- Lowenstern, J. B., Clynne, M. A., & Bullen, T. D. (1997).** Comagmatic A-type granophyre and rhyolite from the Alid volcanic center, Eritrea, northeast Africa. *Journal of Petrology*, 38(12), 1707-1721.
- Lugo-Zazueta, R., Kohn, B., Gleadow, A., Calmus, T., Ramos-Velázquez, E., Fletcher, J. M., & Pérez-Segura, E. (2020).** Neogene evolution of the eastern margin of Gulf of California, Sonora, Mexico: Insights from low-temperature thermochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 103, 102695.

- Maloney, D., Davies, R., Imber, J., & King, S. (2012).** Structure of the footwall of a listric fault system revealed by 3D seismic data from the Niger Delta. *Basin Research*, 24 (1), 107-123.
- McDowell, F. W., & Clabaugh, S. E. (1979).** Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western México: *Geological Society of America Bulletin*, v. 88, p 1479-1487.
- Mora-Alvarez, G., & McDowell, F. W. (2000).** Miocene volcanism during late subduction and early rifting in the Sierra Santa Ursula of western Sonora, Mexico. *Geological Society of America Special Papers*, 334, 123-141.
- Mora-Álvarez, G. (1992).** History of Cenozoic magmatism in the Sierra Santa Úrsula, Sonora, Mexico. (M. Sc. Thesis). Universidad de Texas, Austin, 153 pp.
- Mora-Álvarez, G. (1993).** Relaciones estratigráficas y geocronológicas entre las unidades volcánicas de la Sierra Santa Úrsula, en Sonora, y el magmatismo de la región del Golfo de California, in Delgado-Argote, L., Martin-Barajas, A (eds.), *Contribuciones a la Tectónica de Occidente de México: Monografía UGM*, 1, p. 123-146.
- Piña-Páez, A. (2020).** Nuevas evidencias petrotectónicas en el área de Los Algodones, San Carlos, Sonora, México: Énfasis en los vestigios volcánicos miocénicos relacionados a Protogolfo de California (Tesis de licenciatura). Universidad de Sonora, Hermosillo, México, 94 pp.
- Fragoso-Irineo, A., Martínez-Retama, S., and Vega-Granillo, R. (2018).** Estudio gravimétrico y modelo estructural del Valle de San José de Guaymas, Sonora, México. *GEOS Unión Geofísica Mexicana*, v. 38, p. 1-17
- Sheridan, M. F., Wilson, R. T., and Johnpeer, G. D. (1978).** Volcanic geology of the region between Guaymas and Kino Bay, Sonora: Simposio sobre la Geología y Potencial Minero del Estado de Sonora, Resúmenes (Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología), no. 1, p. 115-116.
- Sklyarov, E. V., & Fedorovskii, V. S. (2006).** Magma mingling: tectonic and geodynamic implications. *Geotectonics*, 40(2), 120-134.

- Till, C. B., Gans P. B., & Sphera F. J. (2005).** The transition from Oligo-Miocene subduction to late Miocene transtension in southern Sonora, Mexico: a geochemical perspective. Dept. of Earth Science, University of California, Santa Barbara, 53 p.
- Umhoefer, P. J., Darin, M. H., Bennett, S. E., Skinner, L. A., Dorsey, R. J., & Oskin, M. E. (2018).** Breaching of strike-slip faults and successive flooding of pull-apart basins to form the Gulf of California seaway from ca. 8–6 Ma. *Geology*, 46(8), 695-698.
- Vega-Granillo, R., De la O Villanueva, M., Vega-Granillo, E. L., Pérez-Álvarez, M. E., Morales-Montaña, M., y Araux-Sánchez, E. (2004).** Geología urbana de la Ciudad de Guaymas, informe final CONACYT (Clave 489100-5-4148PT), México, 240 p.
- Velderrain-Rojas, L. A. (2014).** Contribución al estudio de los eventos volcánicos del Mioceno en la Sierra El Aguaje, porción Costera de Sonora, México (Tesis de Licenciatura). Universidad de Sonora, Hermosillo, México, 127 pp.
- Velderrain-Rojas, L. A. (2016).** Evolución tectono-magmática en la región de Guaymas, Sonora, México: Relación geodinámica con el Protogolfo de California (Tesis de Maestría). Universidad de Sonora, Hermosillo, México, 148 pp.
- Velderrain-Rojas, L.A., Vidal-Solano J.R., Alva-Valdivia L.M., & Vega- Granillo R. (2021).** Late miocene silicic subvolcanic plumbing system related to oblique rifting in the Pacific-North American plate boundary, Sonora, Mexico: geodynamic implication in a regional context, *International Geology Review*.
- Vidal-Solano, J.R. (2005).** Le volcanisme hyperalcalin d'âge Miocene Moyen du Nord-Ouest du Mexique (Sonora) (Thèse de doctorat). Minéralogie, géochimie, cadre géodynamique : Francia, Universidad Paul Cézanne, 256 pp.
- Vidal-Solano, J.R., Paz-Moreno F.A., Demant, A., López-Martínez, M. (2007).** Ignimbritas hiperalcalinas del Mioceno medio en Sonora Central; Revaluación de la estratigrafía y significado del volcanismo Terciario: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24 (1), 47-67.
- Vidal-Solano, J. R., Gómez-Valencia, A. M., Hinojo-Hinojo, A., & Lozano-Santa Cruz, R. (2020).** Geochemistry and geological control of Sonora obsidian: New insights

into the provenance study of archaeological obsidians in Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102840.

Weinberger, R., Lyakhovsky, V., Baer, G., & Agnon, A. (2000). Damage zones around en echelon dike segments in porous sandstone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B2), 3115-3133.

Zhiwei, H. U., Changgui, X. U., Deying, W. A. N. G., Jian, R. E. N., Yubo, L. I. U., Shuguang, X. I. A. O., & Xin, Z. H. O. U. 2019. Superimposed characteristics and genetic mechanism of strike-slip faults in the Bohai Sea, China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(2), 265-279.

Anexo I – Muestras del área de estudio

Coord. X	Coord. Y	Litología	Roca	Muestra	Textura	Fenocristales	Matriz	Observaciones
491286	3109409	DI	Andesita	SEA19-1A y 1B	Porfírica orientada	Pl>Px>Ol	ox, pl y vidrio	Evidencia de flujo
488956	3102603	MH	Microgranito	SEA19-02	Granofírica	Qz > Fld Alc > Pl	qz, fld alc, pl y bio	Foliación magmática y miofolias orientadas
488932	3102606	MH	Microgranito	SEA19-03	Granofírica	Qz > Fld Alc > Pl	qz, fld alc, pl y bio	Foliación magmática
488872	3102648	MH	Microgranito	SEA19_04	Granofírica	Fld Alc > Qz > Pl	qz, fld alc, pl y bio	Evidencia de inmiscibilidad
488622	3102917	DG	Traquita de fld alc	SEA19-05	Porfírica a glomeroporfírica	San > Pl > Qz	qz, fld alc, pl y bio	
488622	3102917	MH	Microgranito	SEA19-06	Granofírica	Fld Alc > Qz > Pl	fld alc, qz y pl	qz corroídos
488501	3102920	DIP	Andesita	SEA19-07	Porfírica a glomeroporfírica	Clpx > Pl	pl y vidrio	Evidencia de flujo
		Perlita verde	Perlita verde	SEA19-08	Perlítica			Estratificación por flujo
490328	3103746	IH	Riolita	SEA19-09	Porfírica a glomeroporfírica	Fld Alc > Qz	pl y qz	Evidencia de flujo
490314	3013752	BL	Granodiorita	SEA19-10	Porfírica	Qz > Anf > Pl > Bio	qz, fld	Anf orientados
490207	3103762	IH	Riolita	SEA19-11	Porfírica a glomeroporfírica	Qz > Fld Alc > Pl	qz, fld alc, px, pl	Bandas
489749	3103782	DIP	Andesita	SEA19-12	Porfírica a glomeroporfírica	Pl > Fld alc > Qz	fld alc, px, qz	Pl corroídas
489648	3103780	IH	Riolita	SEA19-13	Porfírica a glomeroporfírica	Fld Alc > Qz > Pl	fld alc, qz	Das fases visibles
489649	3103782	IH	Riolita	SEA19-14	Glomeroporfírica	Qz > Fld Alc > Pl	qz, fld y vidrio	Das fases visibles
489540	3103829	DG	Traquita de fld alc	SEA19-15	Porfírica sacaroide	Fld alc > Qz > Bio	Fld alc, Qz	
489496	3103868	MH	Microgranito	SEA19-16	Granofírica	Fld alc > Qz > Pl	qz, fld, fayal,	
489496	3103868	C	Diorita	SEA19-17	intergranular	Pl > Fld alc > Clpx	fld y pl	En forma de enclaves redondeados
489463	3103861	IH	Riolita	SEA19-18	Porfírica	Qz > Fld Alc > Pl	qz y fld alc	Miarolítico
488670	3102483	MH	Microgranito	SEA19-19	Granofírica	Fld alc > Qz > Pl	qz y fld alc	Miarolítico
488648	3102472	MH	Microgranito	SEA19-20	Porfírica - Granofírica	Fld alc > Qz > Pl	fld alc y qz	
489325	3103820	MH	Microgranito	SEA19-21	Granofírica	Pl > Fld alc > Qz	qz, fld alc, pl	
489553	3103856	IH	Riolita	SEA19-22	Porfírica bandeada	Fld alc > Qz	fld alc y qz	
489568	3103787	IH	Riolita	SEA19-23	Porfírica bandeada	Fld alc > Qz	fld alc, qz y vidrio	Evidencia de flujo

Figura 1 Tabla de muestras analizadas por petrografía. DG=Dique granítico, MH=Microgranito hipabisal, IH=Inyección hipovolcánica, DIP=Dique intermedio posterior, C=Cumulate, DI=Dique intermedio

Anexo II – Muestras analizadas por difracción de rayos x

Se realizó un muestreo de rocas con fracturas rellenas de cristales secundarios que mostraban ser fibro-radiales con un brillo vítreo, para posteriormente realizar una separación mecánica de estos cristales (Figura 2) con un rayador de tungsteno. Una vez retirada suficiente polvo del mineral se analizó con un difractor de rayos x dando como resultado un espectro que coincide con los espectros de los minerales estilbita y heulandita, ambas de tipo sódica.



Figura 2 Fotografía de las muestras tomadas para la separación mecánica de los cristales (izquierda) y muestra con una superficie de minerales Heulandita-Na / Estilbita-Na (Derecha).

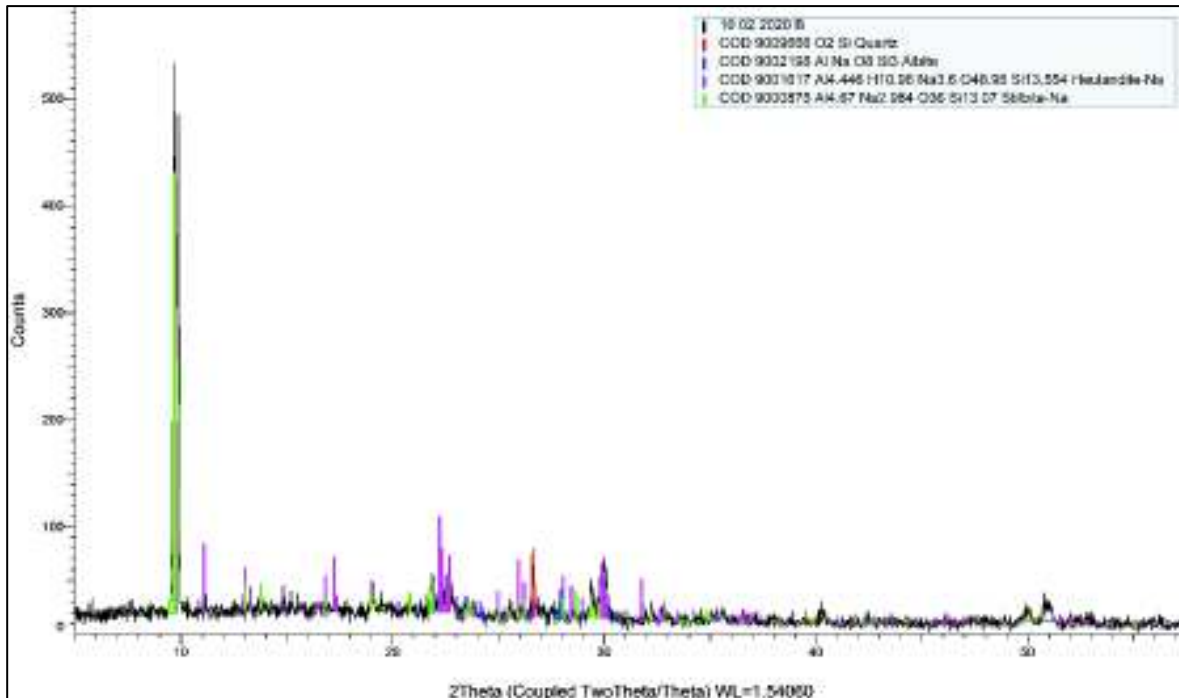


Figura 3 Difractograma de las muestras analizadas. El espectro de la muestra en negro, el del mineral Heulandita-Na en morado y el del mineral Estilbita-Na en verde.