



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

Nuevas evidencias petrotectónicas en el área de Los Algodones, San Carlos, Sonora, México: Énfasis en los vestigios volcánicos miocénicos relacionados al Protogolfo de California.

Tesis

Para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de:

GEÓLOGO

Presenta:

Lillian Adriana Piña Páez

Hermosillo, Sonora

Junio 2020

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

Nuevas evidencias petrotectónicas en el área de Los Algodones, San Carlos, Sonora, México: Énfasis en los vestigios volcánicos miocénicos relacionados al Protogolfo de California.

Tesis

Para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de:

GEÓLOGO

Presenta:

Lillian Adriana Piña Páez

Director:

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
(UNISON)

Co-Directora:

Dra. Joann Miriam Stock
(CALTECH)

Hermosillo, Sonora

Junio 2020



EL HAZER DE NOS ALTA
MIRA AL MUNDO

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

TEL (662) 259 21 10
FAX 259 21 11

Hermosillo, Sonora, 10 de Marzo de 2020

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

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

**"Nuevas evidencias petro-tectónicas en el área de Los Algodones, San Carlos, Sonora, México:
Énfasis en los vestigios volcánicos miocénicos relacionados al Proto-Golfo de California"**

Esto es con el fin de que la alumna **Lillian Adriana PIÑA PÁEZ** con Expediente No. 215209030, 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, quedamos de Usted.

ATENTAMENTE

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

Dra. Joann Miriam STOCK
CO-DIRECTORA EXTERNA DE TESIS
Division of Geological and Planetary Sciences
California Institute of Technology

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 12 de marzo de 2020

DR. JESÚS ROBERTO VIDAL SOLANO

DIRECTOR DE TESIS

DRA. JOANN MIRIAM STOCK

CO-DIRECTORA

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:

**"NUEVAS EVIDENCIAS PETRO-TECTÓNICAS EN EL ÁREA DE LOS ALGODONES,
SAN CARLOS, SONORA, MÉXICO: ÉNFASIS EN LOS VESTIGIOS VOLCÁNICOS
MIOCÉNICOS RELACIONADOS AL PROTO-GOLFO DE CALIFORNIA"**

Lo anterior con el fin de que la alumna **Lillián Adriana Piña Páez** con No. de Expediente **215209030**, 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. Ricardo Vega Granillo
Secretario	MC Alejandra Marisela Gómez Valencia
Vocal	Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Vocal Externo	Dra. Joann Miriam Stock
Vocal Externo	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
UNIVERSIDAD DE SONORA



"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

**"NUEVAS EVIDENCIAS PETRO-TECTÓNICAS EN EL ÁREA DE LOS ALGODONES,
SAN CARLOS, SONORA, MÉXICO: ÉNFASIS EN LOS VESTIGIOS VOLCÁNICOS
MIOCÉNICOS RELACIONADOS AL PROTO-GOLFO DE CALIFORNIA"**

NOMBRE DEL SUSTENTANTE

LILLIÁN ADRIANA PIÑA PÁEZ

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

MC ALEJANDRA MARISELA GÓMEZ VALENCIA

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

DRA. JOANN MIRIAM STOCK

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

MC LUIS ALONSO VELDERRAIN 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



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

c.c.p. archivo

Abstract

Two main processes mark the Neogene Geology of NW Mexico: the first one related to a subduction context with arc volcanism, the second one involves transtensional deformation with associated vulcanism of more diverse composition. Los Algodones mountain range is located north of San Carlos, Sonora, Mexico and despite its small area (6.5 km² approximately) it has structural and petrological information enough to illustrate the change from subduction to transtention regimes. This change is registered in two volcanic sequences: I. The first one is represented by lava flows and pyroclastic deposits, which overlay to a Laramide basement. The volcanic unit includes lava flows of mafic to intermediate compositions, covered by a block and ash pyroclastic deposit. Rocks of this unit are rich in olivine, biotite, and pyroxene. This fact suggests that this first sequence is related to arc vulcanism. II. The second volcanic sequence has more diverse composition. The oldest unit of this sequence corresponds to a hyperalkaline ignimbrite rich in alkali feldspar and low proportions of clinopyroxene and olivine. The ignimbrite is covered by a riodacite lava flow porphyritic with crystals of plagioclases, alkali feldspar and clinopyroxene and a second felsic ignimbrite with high content of lithics. Both sequences are intruded by two hypovolcanic igneous bodies. The oldest hypovolcanic intrusion has a high content of plagioclase (Andesine), this fact suggests an intermediate composition of this intrusion. The second intrusion has felsic characteristics, as a perlitic texture and low content of clinopyroxene phenocrysts. The top of the second sequence is composed of lahars. Both volcanic sequences are affected by normal and strike-slip faults, which strike NW-SE with dips higher than 70°. The most noteworthy result of this project is that one of the ignimbritic units corresponds to the Ignimbrite of Hermosillo- Tuff of San Felipe, a widespread stratigraphic marker in NW Mexico. Based on its petrotectonic characteristics, this ignimbritic unit can be correlated to the similar rocks reported at Cataviña, Baja California, Mexico, 430 km away from the study area. This fact is tectonically relevant because it allows to correlate the block of San Carlos with its equivalent in the Baja California microplate. Based on paleomagnetic studies are recognized a significant vertical axis rotation of the San Carlos block (?), which is related to deformation during the evolution of the Proto-Gulf of California Rift.

Resumen

La geología del Neógeno en el Noroeste de México está marcada por dos procesos principales: el primero corresponde a un contexto de subducción con volcanismo de arco, mientras que el segundo involucra una deformación transtensional con un volcanismo de composición más diversa. La Sierra Los Algodones se ubica al norte de la localidad de San Carlos, Sonora, México. A pesar de no tener una extensión considerable (6.5 km² aproximadamente) alberga suficiente información estructural y petrológica para atestiguar el cambio de un régimen de subducción a uno de transtensión. Dicha transición está documentada en dos secuencias volcánicas: I. La primera, está representada por lavas y depósitos piroclásticos que sobreyacen a un basamento de edad laramídica. Estas unidades volcánicas se presentan como lavas que van de máficas a intermedias cubiertas por un depósito piroclástico de bloques y ceniza. La mineralogía rica en olivino, biotita y piroxeno sugiere que esta secuencia corresponde a un volcanismo de arco. II. La segunda secuencia tiene un volcanismo con una composición más diversa. La unidad más antigua corresponde a una ignimbrita hiperalcalina rica en feldespato alcalino y proporciones menores de olivino y clinopiroxeno. Cubriendo a esta unidad se encuentra la presencia de una lava riodacítica porfídica de plagioclasas, feldespato alcalino y clinopiroxeno y una ignimbrita de composición félsica con un alto contenido de líticos, Ambas secuencias se encuentran intrusionadas por dos cuerpos hipovolcánicos. La intrusión más antigua tiene un alto contenido de plagioclasas (Andesina), este hecho propone una composición intermedia para este cuerpo ígneo. La segunda intrusión tiene características félsicas, como una textura perlítica y muy poca presencia de fenocristales de clinopiroxeno. Finalmente, la segunda secuencia se encuentra coronada por lahares. Ambas secuencias volcánicas están cortadas por fallas normales y laterales con direcciones NW-SE con echados mayores a 70°. El resultado más notable de esta investigación es que una de las unidades ignimbríticas encontradas en el área de estudio corresponde a la unidad Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San Felipe, un marcador estratigráfico ampliamente distribuido en el NW de México, y que con base en sus características petrotectónicas es correlacionable con el depósito reportado a 430km al NW, en la región de Cataviña, Baja California. Este hecho es de relevancia tectónica, ya que permite reconstruir y ubicar al bloque cortical de San Carlos con su correspondiente en la microplaca Baja California, y que a partir de estudios paleomagnéticos,

se reconoce una rotación importante en su eje vertical, que está relacionada a la deformación durante el Rift del Proto-Golfo de California.

Agradecimientos

Los agradecimientos que se presentan a continuación no sólo van dirigidos a quienes estuvieron involucrados en la realización de este trabajo, sino también a todas las personas que gentilmente me brindaron su ayuda durante todos mis estudios de pregrado.

A la Universidad de Sonora, a la División de Ciencias Exactas y Naturales y al Departamento de Geología.

Al California Institute of Technology y al Geological and Planetary Sciences Division por todas las facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

Al proyecto CONACYT 180784 “Evolución Geodinámica del Proto-Golfo de California: Énfasis en los vestigios volcánicos del Mioceno en Sonora, México, dirigido por el Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, siendo este trabajo parte de él.

Al proyecto EAR-1728690 de *National Science Foundation* dirigido por la Dra. Joann Miriam Stock por financiar parte de una estancia corta realizada en Caltech para el análisis paleomagnético.

A la AIMGYMM por financiar parte de una estancia corta realizada en Caltech para el análisis paleomagnético y además por otorgarme una de sus becas para estudiantes de licenciatura durante dos años y medio.

A mi director de tesis, el Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, por guiarme en este maravilloso universo de la Petrotectónica, su paciencia y su amistad durante todo este tiempo pero, sobre todo, por enseñarme a ejercer mi profesión con responsabilidad. Muchas gracias por todo, profe.

A mi co-Directora, la Dra. Joann Miriam Stock por todo el apoyo brindado para realizar una estancia corta para el análisis de datos para paleomagnetismo, sus valiosas observaciones para este trabajo, por ser un pilar fundamental en mi formación profesional y su forma invaluable de transmitir conocimientos y motivación. También quisiera agradecerle por recibirme como su estudiante de verano en el programa SURF y cubrir el financiamiento de dicha estancia en el California Institute of Technology.

A mis sinodales: Dr. Ricardo Vega Granillo, cDra. Alejandra Gómez Valencia y cDr. Luis Velderrain Rojas por sus tan precisas observaciones y aportaciones para presentar un mejor trabajo de tesis.

A mi querido amigo Bruce, por creer en mi talento. El mundo necesita más personas como tú.

Al cuerpo académico del Departamento de Geología, en especial a los profesores: Alejandra Gómez, Ricardo Amaya, Francisco Paz, Ricardo Vega, Francisco Grijalva “*El Chile*”, Margarita de la O, Diana Meza, Alba Martínez y Efrén Pérez y Alejandra Montijo. A la antigua secretaria Lupita. Gracias por sus consejos, amistad y por ser parte de mi formación académica y personal.

Un agradecimiento especial al Dr. Francisco Grijalva y a la M.C. Alejandra Montijo por todo el apoyo administrativo para lograr llevar a cabo la disertación en estos tiempos tan difíciles que nos han tocado vivir.

Al personal administrativo del Departamento de Geología, la C.P. Czarina Pérez y la jefa de departamento en turno Dra. Silvia Martínez Retama por ayudarme con el trámite para el apoyo financiero para realizar una estancia corta en Caltech para el análisis de datos paleomagnéticos.

A Dr. Arturo Martín Barajas por recibirme como su estudiante de verano en el 2017 y 2019 e involucrarme en sus proyectos de investigación en la Isla Ángel De La Guarda y el Golfo de California. Gracias por sus consejos, paciencia, hospitalidad y amistad. Gracias por ser un pilar fundamental en mi formación profesional y personal.

Al M.C. Javier Hernández. Gracias Javi, por todas tus enseñanzas, paciencia y amistad.

To PhD candidate Leah Sabbeth for all her patience, knowledge, hospitality and friendship during the SURF stay. Also, thanks for helping me out to collect the paleomagnetic data of this work. Thank you very much for all!

To Dr. Joe Kirschvink and all his staff for letting me do the paleomagnetic analysis for this thesis project at the Paleomagnetism Laboratory at Caltech.

Al Dr. Luis Alva y al cDr. Luis Velderrain por enseñarme a perforar *insitu* y a orientar los núcleos para paleomagnetismo.

Al M.C. Martín Pacheco por el apoyo técnico para la realización de algunos de los mapas de este trabajo.

Al M.C. Gabriel Mejía por el apoyo técnico para la realización e interpretación matemática de las gráficas para el análisis estructural-cinemático.

A mi compañero Romario (Gerardo) por toda su ayuda en la obtención de datos en el campo y en el procesado de muestras para geoquímica.

A la Dra. Diana Meza y la c.Dra. Belén González Grijalva por permitirme realizar el análisis geoquímico en su laboratorio.

A los técnicos del laboratorio de laminado del Departamento de Geología Sheyla y Jorge por la elaboración de las láminas delgadas y superficie pulida.

A mis amigos, el M.C. Javier Hernández y el M.C. Sebastián Jurado por ayudarme a obtener las imágenes multiespectrales para la realización de los diferentes mapas de este trabajo.

A mis compañeros y amigos Paola, Jorge y Rafael por ayudarme a tomar los datos para el análisis estructural de este trabajo. Se necesitan más estudiantes como ellos, con tantas ganas de aprender y disponibilidad.

A los compañeros de Geología de Campo II y III 2018-1, Temas Avanzados en Petrología Endógena 2018-2, Petrología de Rocas Ígneas 2018-2 y Geología estructural 2019-1 por la ayuda para la obtención de datos de campo para este proyecto de tesis. Sin ustedes este trabajo no hubiera sido posible.

Al Sr. Manuel Escobar por brindarnos las facilidades de acceso al área de estudio y por su gran hospitalidad en su rancho El Palmar, durante las diferentes expediciones realizadas.

A mis hermanos: Carolina y Waldo, por siempre estar preocupados por mi formación académica.

Dedicatorias

A mi mayor fuente de inspiración: Agustín. Sean siempre el Universo, el Cosmos y la Fuerza eternos para tu alma.

Para la persona más adorable, amorosa y dedicada a sus hijos que puedo conocer: mi mamá. El Universo a lado de tu amor se vuelve finito y microscópico. ¡Te amo, mamá!

A mis papás: Conchita y Agustín. Gracias por ser los principales y más grandes maestros en mi vida.

A mis hermanos: Agustín, Karla, Carolina, Danna, Waldo, Marc y Pamela.

A mis principales profesores en la universidad: El profesor Jesús Vidal y la profesora Alejandra Gómez. Muchas gracias por todos sus consejos, conocimientos, amistad, paciencia y, sobre todo, por transmitirme el amor y pasión por lo que aman: La Geología.

A mi mayor ejemplo a seguir, la científica y profesora que más admiro: Dra. Joann Miriam Stock. Gracias por ser una guía para mí durante estos años y por siempre alentarme a crecer profesional y personalmente.

Al Dr. Arturo Martín Barajas, por ser una guía y ejemplo para mí durante estos años. Por tener siempre un consejo para mí y por transmitirme sus conocimientos con tanta paciencia y amabilidad.

A mi querida amiga Rocío.

A mis mejores amigos: Martín Flores y Kathia Ruiz. Gracias por estar en las buenas y en las no tan buenas, por su apoyo incondicional.

A Gabriel, por estar aquí conmigo a pesar de esos 930.6 kilómetros.

A mis amigos y compañeros de esta aventura: Kathia, Martín, Omar, Majo Borbón, Israel, Leezzlie, Pancho, Luis Rubén, Rafa, Jorge, Luis, Navarro y Paola. Muchas gracias por su apoyo incondicional en este viaje (y por aguantar tanto drama).

A mis muy queridos amigos del CICESE: Martín Pacheco, Javi, Thalia, Sebas, Rocío, Eliana, Abi, Armando, Oswaldo, Cris, Manuel y Eleyra.

A mi muy estimada Condesa, por su amistad y cariño.

A esa Fuerza encargada de regir al Universo, algunos la llaman Dios, Destino, para mí:
Fuerza. Gracias por conspirar a mi favor y ayudarme a lograr cada uno de mis sueños.

“No se sabe todo, nunca se sabrá todo, pero hay horas en que somos capaces de creer que sí, tal vez porque en ese momento nada más podrá caber en el alma, en la conciencia, en la mente, comoquiera que se llame eso que nos va haciendo más o menos humanos”

Las pequeñas memorias

José Saramago

Para Agustín

ÍNDICE

Abstract.....	v
Resumen	vi
Agradecimientos.....	viii
Dedicatorias	xi
ÍNDICE.....	xv
Lista de figuras	xvii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Localización de la zona de estudio	4
1.3 Vías de acceso	5
1.4 Marco tectónico	7
2 METODOLOGÍA.....	13
2.1 Obtención de datos	13
2.1.1 Trabajo de gabinete.....	13
2.1.2 Trabajo de campo.....	13
2.2 Procesamiento de datos	14
2.2.1 Cartografía y estratigrafía	14
2.2.2 Análisis petrográfico.....	14
2.2.3 Análisis geoquímico	14
2.2.4 Análisis estructural	15
2.2.5 Análisis paleomagnético	15
3 RESULTADOS	16
3.1 Cartografía geológica y estratigrafía de la Sierra Los Algodones.....	16
3.1.1 Cartografía geológica.....	16
3.1.1.1 Mapa geológico integrado.....	16
3.1.1.2 Secciones geológico-estructurales.....	18
3.1.2 Columna estratigráfica compuesta.....	19
3.1.3 Descripción litológica de unidades	21
3.2 Análisis geoquímico de la Ignimbrita Los Algodones	34
3.2.1 Caracterización geoquímica.....	34
3.2.2 Correlación geoquímica.....	36
3.3 Geología Estructural.....	37

3.3.1 Fallas medidas en las unidades litológicas.....	41
3.3.2 Análisis cinemático del área	43
3.4 Análisis paleomagnético de algunas unidades volcánicas.....	50
4 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.....	56
4.1 Discusiones.....	56
4.2 Conclusiones.....	67
5 LITERATURA CITADA.....	69
ANEXOS.....	77

Lista de figuras

Figura		Página
1	Localización tectónica regional de la zona de estudio.	4
2	Vías de acceso al área de estudio.	5
3	Equipo de fluorescencia de rayos X Niton FXL.	14
4	Equipo del laboratorio de paleomagnetismo en Caltech.	15
5	Mapa geológico integrado del área de estudio.	17
6	Secciones geológico-estructurales de la sierra Los Algodones.	18
7	Columna estratigráfica de la sierra Los Algodones.	20
8	Sección delgada de la unidad T-Jms- Metasedimento.	21
9	Unidad Kgr-Granodiorita a nivel afloramiento, muestra de mano y sección delgada.	22
10	Unidad Tmfb-Flujo basáltico a nivel afloramiento, muestra de mano y sección delgada.	24
11	Afloramiento de la unidad Tmfa-Flujo andesítico.	24
12	Sección delgada de la unidad Tmdbc-Depósito de bloques y ceniza.	25
13	Afloramientos de las facies de la unidad Tmila-Ignimbrita Los Algodones.	27
14	Secciones delgadas de las facies de la unidad Tmila-Ignimbrita Los Algodones.	28
15	Unidad Tmda-Dique andesítico a nivel afloramiento, muestra de mano y sección delgada.	29
16	Unidad Tmiea-Ignimbrita El Aguaje a nivel afloramiento y muestra de mano.	30
17	Unidad Tmdr-Dique riolítico a nivel muestra de mano y sección delgada.	31
18	Unidad Tmfrd-Flujo riodacítico a nivel afloramiento y sección delgada.	32

19	Vista panorámica de uno de los afloramientos de la unidad Tmla-Lahar.	33
20	Diagrama multielemental de normalización a MORB (Pearce, 1983) para la Tmila.	34
21	Diagrama XY (Vidal-Solano <i>et al.</i> 2013) utilizado para conocer las variaciones de las concentraciones de Nb vs Zr en la unidad Tmila.	35
22	Diagrama ternario Sr-Rb-Fe de Vidal-Solano <i>et. al.</i> , (2013) para la Tmila.	36
23	Representación gráfica de las estructuras primarias en la Sierra Los Algodones.	37
24	Localización tectónica regional de las zonas estructurales de este estudio con las fallas principales.	39
25	Algunos rasgos estructurales encontrados en la Sierra Los Algodones.	40
26	Representación gráfica de las fallas en la unidad Kgr-Granodiorita.	41
27	Representación gráfica de las fallas en la unidad Tmfb-Flujo basáltico.	42
28	Representación gráfica de las fallas en la unidad Tmila-Ignimbrita Los Algodones.	42
29	Representación gráfica de las fallas en la unidad Tmda-Dique andesítico.	43
30	Histograma de frecuencias de las orientaciones de las fallas.	44
31	Representación gráfica de la familia de fallas Fk1.	45
32	Clasificación de las fallas de la familia Fk1.	45
33	Representación gráfica de la familia de fallas Fk2.	46
34	Clasificación de las fallas de la familia Fk2.	46
35	Representación gráfica de la familia de fallas Fp1.	47

36	Clasificación de las fallas de la familia Fp1.	47
37	Representación gráfica de la familia de fallas Fp2.	48
38	Clasificación de las fallas de la familia Fp2.	48
39	Representación gráfica de la familia de fallas Fp3.	49
40	Clasificación de las fallas de la familia Fp3.	49
41	Diagramas de áreas iguales y Zijderveld para la unidad Tmila-Ignimbrita Los Algodones en el sitio 1.	51
42	Diagramas de áreas iguales y Zijderveld para la unidad Tmila-Ignimbrita Los Algodones en el sitio 2.	51
43	Diagramas de áreas iguales y Zijderveld para la unidad Tmida-Dique andesítico.	52
44	Diagramas de áreas iguales y Zijderveld para la unidad Tmiea-Ignimbrita El Aguaje.	53
45	Diagramas de áreas iguales y Zijderveld para la unidad Tmdr-Dique riolítico.	55
46	Diagrama de multielemental de normalización a MORB (Pearce, 1983) para la caracterización geoquímica de la Tmila.	60
47	Diagrama ternario Rb-Fe-Sr de Vidal-Solano <i>et. al.</i> , (2013) para la correlación geoquímica de la Tmila.	61
48	Diagrama XY (Vidal-Solano <i>et al.</i> 2013) utilizado para conocer las variaciones de las concentraciones de Nb vs Zr en la unidad Tmila.	62
49	Rotaciones en los ejes X y Y para la IGH-TSF, modificado de Bennet & Oskin (2014).	63
50	Modelo tectónico esquemático modificado de Hu, Z <i>et. al.</i> , 2019, que explica la deformación ocurrida en la Sierra Los Algodones.	67

1. INTRODUCCIÓN

La evolución tectónica del Golfo de California puede explicarse con dos modelos. El primer modelo se divide en dos etapas donde la primera de ellas (~12.3-6 Ma.) involucró el desarrollo de un rift ortogonal que propició la formación de un proto-golfo y la acumulación de ~90 km de extensión en dirección NE-SE (Stock y Hodges, 1989). En la segunda etapa (~6 a 0 Ma) cuando la subducción en la zona de falla Tosco-Abreojos comenzó a cesar, inició una deformación transtensional dentro del proto-golfo de California que ha acumulado ~280 km de piso oceánico en la cuenca de Guaymas (Oskin *et al.*, 2001; Lizarralde *et al.*, 2007). El segundo modelo, se basa en el análisis de proveniencia de circones del abanico magdalena y sólo incluye una etapa de deformación transtensional que ocurrió en ambos lados de la microplaca de Baja California. Este modelo propone menos de 150 km de desplazamiento de cizalla lateral en la zona de falla Tosco-Abreojos y otros ~310 km dentro de la Provincia Extensional del Golfo con una rotación de bloques en sentido horario. (Umhoefer *et al.*, 2002; Fletcher *et al.*, 2007).

Los productos magmáticos correspondientes al cese de la subducción del NW de México y al inicio de la extensión del Golfo de California corresponden a una erupción anorogénica típica de un ambiente extensivo poco antes de la apertura del Golfo de California. Este volcanismo involucró la ocurrencia de lavas máficas con firmas transicionales, pero estuvo principalmente gobernado por la producción de rocas hiperalcalinas (Vidal-Solano, 2005; Vidal-Solano *et al.* 2007), las cuales están representadas por lavas y depósitos de flujos piroclásticos que se encuentran en ampliamente distribuidos en la costa y centro de Sonora y en menor proporción dentro de Baja California Dentro de la Baja California se reporta a esta unidad como Toba de San Felipe (Stock *et al.* 1999) y en Sonora es conocida como Ignimbrita de Hermosillo (Paz-Moreno, 2000).

[La Sierra Los Algodones se ubica al norte de la localidad de San Carlos, Sonora, México y está representada por dos secuencias volcánicas que documentan el cambio de régimen de subducción a uno de transtensión. La primera secuencia está representada por lavas del Mioceno temprano-medio, de composición intermedia a máfica en la base, que sobreyacen a un basamento cristalino laramídico del Cretácico tardío. En esta secuencia se

reconocen tres unidades, dos de ellas de carácter lávico y una piroclástica. La segunda secuencia corresponde a un episodio transtensional y está representada por lavas y flujos piroclásticos del Mioceno tardío, de composición félsica a intermedia y dos intrusiones hipovolcánicas.

Este proyecto de tesis pretende responder las siguientes interrogantes: ¿Cuáles son las características petrológicas de la cobertura volcánica de la Sierra Los Algodones? ¿Existe una correlación entre los depósitos ignimbríticos presentes en la cobertura volcánica del área de estudio con unidades similares reportadas en Sonora y/o Baja California? ¿Qué relación guardan las unidades volcánicas con respecto al Proto-Golfo de California? ¿Cuáles son los eventos deformacionales presentes en la zona de estudio y a que episodios de carácter regional pueden estar asociados?

Para dar respuesta a estas preguntas se tiene como objetivo caracterizar y correlacionar petrológicamente a las unidades volcánicas presentes, un análisis estructural que de identidad a los episodios deformacionales que afectan el área y finalmente, proponer un modelo tectónico que explique el estilo de extensión en la zona de estudio.

1.1 Objetivos

a) Objetivo general

Hacer una aportación al conocimiento de la evolución geodinámica del Protogolfo de California con base en estudios petrológicos y paleomagnéticos realizados en la sierra Los Algodones.

b) Objetivos específicos

Para poder cumplir con el objetivo general de esta investigación, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Cartografía detallada de las unidades volcánicas.
2. Caracterización y correlación petrográfica de las unidades volcánicas.
3. Caracterización y correlación geoquímica de una de las unidades ignimbríticas clave para este estudio.
4. Análisis estructural detallado.
5. Análisis paleomagnético de algunas de las unidades claves de este estudio para conocer la rotación en el eje vertical en el bloque de San Carlos, Sonora.
6. Proponer un modelo tectónico que explique la deformación que afecta a la región.

1.2 Localización de la zona de estudio

La Sierra Los Algodones se encuentra en la costa de Sonora a una distancia de 153 km al sur de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México. Esta zona forma parte del municipio de Guaymas y de la comisaría de San Carlos Nuevo Guaymas, Sonora y se encuentra a 7 kilómetros del poblado de San Carlos Nuevo Guaymas, además cubre un área de aproximadamente 6.5 km².

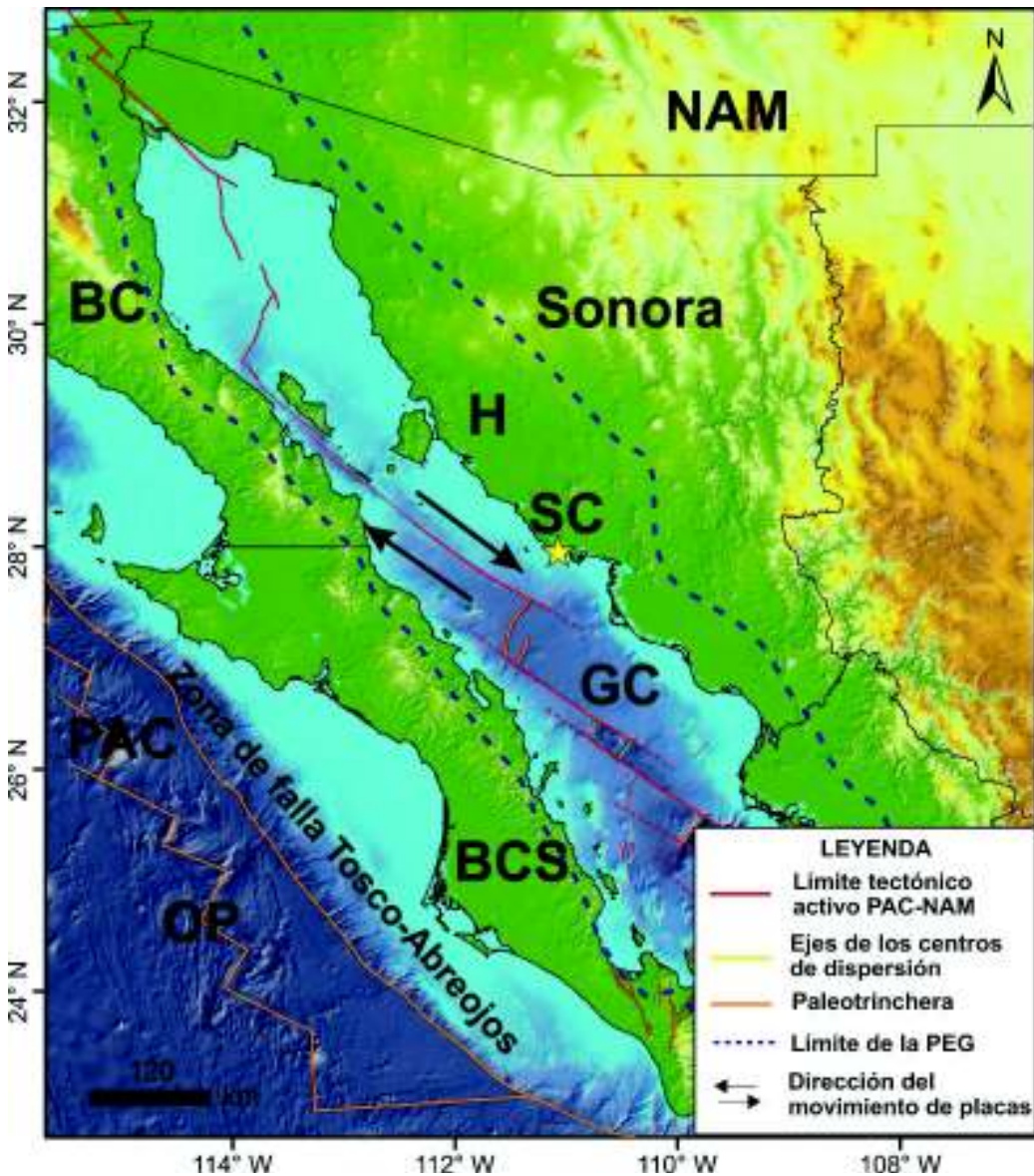


Figura 1. Representación de la ubicación tectónica regional de la zona de estudio (estrella amarilla); Límite de placas Pacífico-Norteamérica (PAC-NAM) tomado de Aragón-Arreola y Martín-Barajas (2007). Límite de la PEG tomado de Stock y Hodges (1989); Martín-Barajas (2000); Calmus *et al.* (2010) y Darin *et al.* (2016). BC= Baja California; BCS= Baja California Sur. H= Hermosillo, Sonora. GC= Golfo de California. OP= Océano Pacífico. PEG= Provincia Extensional del Golfo.

1.3 Vías de acceso

a) *Hermosillo-San Carlos*

Partiendo desde la ciudad de Hermosillo hacia el sur y siguiendo la carretera internacional número 15, a 126 kilómetros se toma la carretera estatal número 124 hasta llegar a San Carlos (Figura 2A).

b) *Vías de acceso a Sierra Los Algodones*

Los Algodones se encuentra al norte del cerro Tetakawi y está sobre la carretera estatal número 124 (Blvd. Manlio Flavio Beltrones) (Figura 2B).

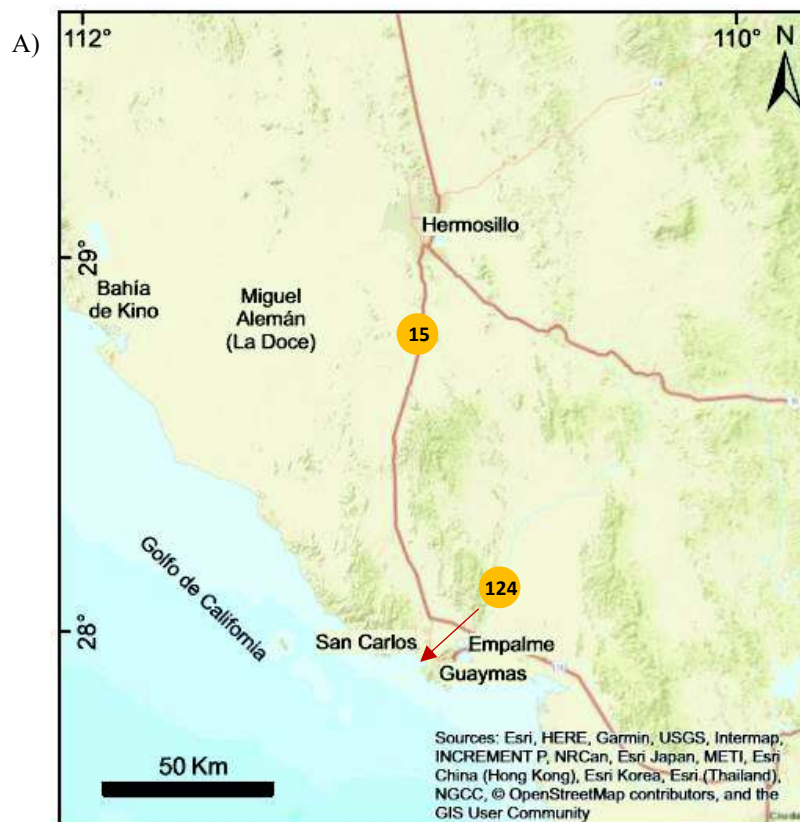
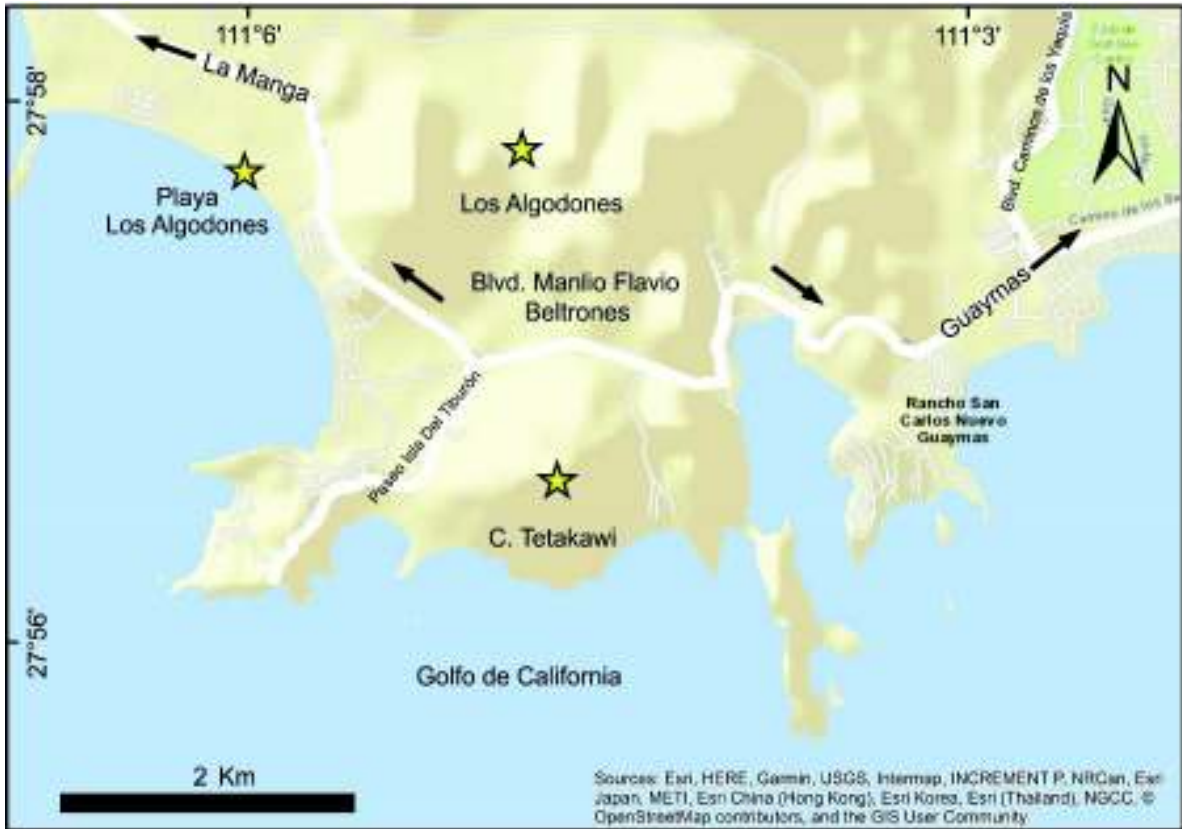


Figura 2. A) Vías de acceso Hermosillo-San Carlos, Sonora, México. B) Vías de acceso para la zona de Los Algodones en San Carlos, Sonora, México. (Siguiente página).

B)



1.4 Marco tectónico

La geología del Neógeno en el Noroeste de México está marcada por dos procesos principales: el primero corresponde a un contexto de subducción con volcanismo de arco, mientras que el segundo involucra una deformación transtensional con un volcanismo de composición más diversa (Gastil *et al.* 1975; Delgado-Argote. 2000; Martín-Barajas. 2008).

a) Proceso de subducción

Durante el Cenozoico temprano la cuenca del Pacífico estaba dividida en varios segmentos, como lo son Kula, Farallón, Cocos y Nazca y sistemas de extensión. Dichas placas estaban alojadas en el norte, este y sur de la placa Pacífico; una de ellas correspondía a la extinta placa Farallón, que durante el Pérmico tardío comenzó a subducirse debajo de la Placa Norteamericana hasta aproximadamente los 14 Ma. La colisión de la dorsal Pacífico-Farallón con la trinchera Farallón-Norteamérica creó una zona de fallamiento lateral a lo largo de la línea de costa que se extendió de norte a sur y que progresivamente se transformó de un límite de placas convergente a una falla transformante intraplaca (Gómez-Valencia *et al.*, 2015, Atwater, 1989; Hausback, 1984).

Las últimas etapas de la subducción de la placa oceánica debajo de Norte América está documentada en un registro geológico caracterizado por la presencia de magmas de arco que corresponden a flujos de lavas e ignimbritas de composición riolítica con intercalaciones de flujos de basaltos y andesitas basálticas que formaron la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental (SMO) (Atwater, 1989; Aranda-Gómez *et al.* 2000; Ferrari *et al.* 2005). Este magmatismo de arco comenzó con una identidad calcoalcalina hasta el Pleistoceno tardío (Demant, 1984; Sawlan, 1986), pero después evolucionó a un volcanismo bimodal (SCORBA), simultáneamente ocurrieron distintos tipos de magmas que generaron basaltos tipo MORB (*Mid Ocean Ridge Basalts*), tipo OIB (*Ocean Island Basalts*) y basaltos toleíticos (Aguillón-Robles *et al.*, 2001), andesitas magnesianas (Saunders *et al.*, 1987; Calmus *et al.*, 2003), adakitas (Aguillón-Robles *et al.*, 2001; Calmus *et al.*, 2008; Gómez-Valencia *et al.*, 2015), riolitas hiperalcalinas e islanditas (Vidal-Solano *et al.*, 2008a, 2008b).

b) Proceso de extensión

Cuando la actividad en la zona de falla Tosco-Abreojos comenzó a cesar, dio paso a la apertura del Golfo de California que está atribuida a dos etapas extensionales: la primera corresponde a la formación de un Protogolfo durante el Mioceno medio-tardío (Moore y Buffington, 1968; Karig y Jensky, 1972; Moore, 1973) y la segunda involucra el desarrollo del límite de placas Pacífico-Norteamérica desde el Plioceno hasta el presente (Larson *et al.*, 1968; Curray y Moore, 1984).

La primera etapa que corresponde al desarrollo de un protogolfo, incluye a todo el fallamiento extensional y sedimentos marinos del Mioceno tardío de las áreas cercanas al norte y centro del Golfo de California (Karig y Jensky, 1972; Moore, 1973; Gastil *et al.*, 1979; Bennet *et al.*, 2015) los cuales están expuestos en la Provincia Extensional del Golfo (PEG) (Gastil *et al.*, 1975) al lado este de la península de Baja California y en la costa oeste de Sonora y Sinaloa. Con lo que respecta a la costa de Sonora, el fallamiento extensional afectó al registro geológico volcánico y sedimentario anterior a los 10 Ma, el cual actualmente presenta inclinaciones de casi 90° hacia el este a lo largo de una serie de fallas normales con dirección NNW (Gastil *et al.*, 1974).

Cuando la actividad en la zona de falla Tosco-Abreojos comenzó a contenerse, dio inicio una segunda etapa donde se desarrollaron grandes fallas laterales derechas que se relevan esporádicamente mediante cuencas de separación (pull-apart basins), hasta culminar en el actual límite de placas Pacífico-Norteamérica (PAC-NAM) que corresponde a una zona de deformación transtensional que ha acumulado aproximadamente 280 kilómetros de desplazamiento lateral derecho con desarrollo local de piso oceánico en algunas de las cuencas del Golfo de California (Oskin *et al.*, 2001; Lizarralde *et al.*, 2007).

1.5 Geología regional

Dentro de la localidad de San Carlos, Sonora se han realizado distintos trabajos de investigación que han permitido reconocer diferentes episodios magmáticos claves para la historia geológica del NW de México y la costa Sur de Sonora.

En esta zona la unidad más antigua corresponde a un metasedimento del Triásico-Jurásico descrito como un hornfels silíceo en forma de lomeríos suaves que afloran alrededor del cerro Los Algodones y al sur del cerro Tetakawi y se encuentra cubierto por lavas del Mioceno (Vega-Granillo *et al.*, 2004). Por el carácter litológico y ubicación de esta unidad, Mora (1992) sugiere que estos metasedimentos pueden correlacionarse con sedimentos del Grupo Barranca. El basamento ígneo corresponde al Batolito Laramide de Sonora, con edades entre los 90 y 40 Ma. (Cochemé, 1985, Damon *et al.*, 1983). Este intrusivo granodiorítico tiene una edad de 83 y 81 Ma. en el área de San Carlos, Sonora (Mc Dowell *et al.*, 1979), está expuesto ampliamente en la Costa de Sonora debido al levantamiento generado por el basculamiento de los bloques a lo largo de fallas normales asociadas a la tectónica distensiva que afecta a la región (Vega-Granillo *et al.*, 2004).

El basamento ígneo-metamórfico está sobreyacido por una secuencia de lavas que varían de intermedias a máficas. Este volcanismo del Oligoceno-Mioceno está asociado a un arco continental y fue nombrado Unidad Básica intermedia (Vega-Granillo *et al.*, 2004) y posteriormente se le denominó formalmente por Gómez-Valencia (2014) como Grupo San Carlos. Las edades absolutas de este volcanismo intermedio-máfico se le atribuyen a lo reportado por Till *et al.* (2009) con edades para una andesita basáltica de 16.5 Ma. y 21 Ma. para una andesita. Este volcanismo de carácter intermedio-máfico está ampliamente distribuido en Baja California Sur y se reporta como Grupo Comondú con edades entre los 24 y 14.5 Ma. (Heim, 1922; Hausback, 1984; Sawlan, 1991; Umhoefer *et al.*, 2001). Durante este episodio de magmatismo de arco, ocurrió simultáneamente el evento *Basin and Range*, dando origen a la típica fisiografía de sierras y valles paralelos con direcciones NW-SW que se extienden desde Nevada, E.U.A. hasta la parte norte del Eje Neovolcánico Mexicano.

Posteriormente, cuando el arco volcánico miocénico asociado a la subducción en el NW de México comenzó a cesar, ocurrieron una serie de eventos magmáticos caracterizados por la erupción de magmas máficos de firmas transicionales seguido por un importante

volcanismo hiperalcalino, los cuales han sido interpretados como anorogénicos ya que se consideran típicos de un ambiente extensivo previo a la apertura del Golfo de California (Vidal-Solano, 2005)

En la Sierra Libre ubicada al SE de Hermosillo, las rocas hiperalcalinas están representadas por lavas y depósitos de flujos piroclásticos. El miembro con mayor distribución de este magmatismo corresponde a un flujo piroclástico que se ha descrito tanto en Baja California como en Sonora. En Baja California se ha reportado a esta unidad como Toba de San Felipe (Stock *et al.* 1999; Oskin *et al.* 2001; Bennett, 2009; Olguin-Villa, 2010; Olguin-Villa *et al.*, 2013) y en Sonora es conocida como Ignimbrita de Hermosillo (Paz-Moreno, 2000; Vidal Solano *et al.*, 2005, 2007, 2008; Barrera-Guerrero y Vidal-Solano, 2010; Gómez-Valencia y Vidal-Solano, 2010). Por la extensión regional de esta unidad, que se considera cubrió un área aproximada de 50,000 km², bien podría haber sido originada por una mega-erupción durante el Mioceno medio (Vidal-Solano *et al.*, 2008).

En las regiones de San Agustín y Cataviña, en Baja California, Olguín- Villa *et al.* (2013) reportan que ocurre en grandes mesas que se van adelgazando hacia el oeste y está caracterizada por oleadas poco soldadas en la capa basal, con colores que varían de beige a gris, ricos en pómez. Comúnmente, existen facies vitroclásticas poco soldadas donde se desarrollan columnas de enfriamiento. El grado de soldadura se incrementa hacia la cima y finalmente está cubierta por facies tobáceas y poco soldadas, con espesores >30 m.

En la Sierra San Pedro Mártir (Desde el frente de la sierra hacia el Este hasta la costa de Baja California), San Felipe y Puertecitos, Stock *et al.* (1999) reportan a la IGH-TSF como un depósito de flujo piroclástico que corresponde a una toba de lapilli lítica rica en cristales fuertemente soldada. En esta región la unidad se caracteriza por un vitrófido negro en su base y por su grado de soldadura la cual se incrementa hacia la cima hasta presentarse fuertemente soldada con un contenido de 5-16% de fenocristales de feldespato alcalino, el cual es el rasgo más distintivo en muestra de mano.

Con lo que respecta a Sonora, la IGH-TSF presenta una distribución más amplia que en Baja California y puede encontrarse en Rayón, Río Yaqui, Bahía de Kino, La Sierra Libre, Hermosillo y la Sierra El Aguaje (Vidal *et al.*, 2013; Velderrain-Rojas, 2014; Gómez-Valencia, 2014). Paz-Moreno *et al.* (2000) reportaron por primera vez a esta unidad en el

oeste y sur de Hermosillo, Sonora. Los afloramientos ocurren como mesetas y cuevas alargadas y están ligeramente basculadas hacia el este y, en algunos casos hacia el oeste como en Las Norias, además los espesores que presenta la unidad difícilmente alcanzan los 50 metros. Petrológicamente corresponde a una ignimbrita reomórfica, de color beige y una fluidez marcada. Con respecto a su petrografía, está descrita como una ignimbrita con textura eutaxítica, con diferentes grados de soldadura. Es porfídica de feldespatos alcalinos, clinopiroxeno verde y escasa fayalita (Paz-Moreno *et al.*, 2000).

Vidal-Solano *et al.* (2005) reportan que es en la ciudad de Hermosillo donde mejor está preservada esta unidad. En la base es posible observar un vitrófido negro, que varía en colores marrones debido al contacto con conglomerados del paleocanal que siguió el flujo piroclástico. La parte central del depósito y más abundante de la unidad corresponde a una ignimbrita eutaxítica soldada, donde las flamas dan un aspecto laminado a la roca. Finalmente, la parte superior del flujo piroclástico es más vesicular y está desvitrificado y silicificado localmente. Al Oeste de la región de Rayón, Sonora está reportada la IGH-TSF con una extensión de aproximadamente 50 km N-S y se presenta en forma de mesas con espesores de entre 2 y 22 metros. Se presentan cinco facies distintas que varían de menor a mayor grado de soldadura desde la base a la cima, respectivamente (Gómez-Valencia, 2014).

Después de esta secuencia ignimbrítica ocurrieron una serie de lavas y diques de composiciones diversas, que van desde máficas a félsicas. Distintos autores han nombrado y clasificado a estas rocas. Johnpeer (1977) las clasificó como lavas toleíticas con olivino que afloran este del cerro El Vigía, Herman (2013) reporta tres grupos de basaltos y andesitas que afloran en la Sierra Tinaja del Carmen. El estudio más reciente en la Sierra El Aguaje (Velderrain-Rojas, 2014) menciona la existencia de numerosos diques hipovolcánicos dentro de la Formación Volcánica El Parral (11 a 10 Ma.). En los cerros Carricito y El Potrerito en Guaymas, Sonora ocurren unas series de lavas que van de composiciones intermedias a félsicas nombradas Formación Guaymas Inferior (14?-12.5 Ma.) que consta de dos unidades nombradas Miembro Volcánico Traquiandecítico y Miembro Magmático Intermedio (12.59 +/- 0.70 Ma.) por Velderrain-Rojas (2016). Sobreyaciendo a la Formación Guaymas Inferior está presente la Formación Guaymas Superior (12.59-10.12 Ma.), que se compone de un magmatismo de composición félsica que varía de traquitas-traquidacitas, dacitas y riolitas.

Esta formación está dividida en dos miembros denominados como Miembro Volcánico Félsico (11.056-10.12 \pm 0.69 Ma.), que corresponde a flujos de lava; y el Miembro Toba Soldada El Vigía (Velderrain-Rojas, 2016).

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan las distintas etapas y análisis realizados para cumplir los objetivos de esta investigación. Este trabajo se dividió primordialmente en dos etapas, una corresponde a la obtención de datos y la segunda al procesamiento de estos. Cada una de las etapas se describen a continuación y para conocer más ampliamente los procedimientos realizados y las técnicas de laboratorio efectuadas se pueden consultar en el apartado de Anexos.

2.1 Obtención de datos

2.1.1 Trabajo de gabinete

Con anterioridad a cada expedición de campo realizada se analizaron imágenes satelitales por medio del software libre Google Earth Pro para hacer un reconocimiento de las posibles áreas a visitar.

2.1.2 Trabajo de campo

Este proyecto de tesis involucró cinco expediciones de campo, las cuales se enlistan y describen a continuación.

1° Expedición (5 días): El objetivo principal de esta expedición fue hacer un reconocimiento litológico y estructural general del área. Se obtuvieron datos para petrografía, geoquímica y análisis estructural.

2° Expedición (2 días): Durante esta campaña se obtuvieron parte de los núcleos para paleomagnetismo.

3° Expedición (2 días): Se obtuvieron más datos para petrografía y geoquímica de las unidades faltantes.

4° Expedición (2 días): Se extrajeron dos muestras orientadas para una perforación posterior y obtener núcleos para paleomagnetismo, asimismo se recaudaron más datos estructurales.

5° Expedición (2 días): Se obtuvieron nuevos datos para el análisis estructural y se verificaron contactos y actitudes en las unidades del área de estudio.

2.2 Procesamiento de datos

2.2.1 Cartografía y estratigrafía

El mapa geológico y la columna estratigráfica primeramente se realizaron en papel y a mano alzada y posteriormente se digitalizaron. Para la elaboración del mapa geológico digitalizado se utilizó el software ArcMap versión 10.3 de la plataforma ArcGIS y la columna estratigráfica y la edición de todas las figuras de este trabajo se realizaron en Corel Draw X7.

2.2.2 Análisis petrográfico

Se analizaron bajo un microscopio petrográfico *Leyca* 41 secciones delgadas, las cuales se clasificaron por medio del análisis modal.

2.2.3 Análisis geoquímico

Se analizaron las superficies pulidas de 66 muestras de roca bajo el método de fluorescencia de rayos X en el equipo portátil Niton FXL con el programa *Test All Geo* y se clasificaron por distintos diagramas ternarios de elementos traza para su discriminación.



Figura 3. Equipo portátil de fluorescencia de rayos X *Niton FXL* utilizado para el análisis geoquímico de este trabajo. Este equipo se encuentra en el laboratorio de geoquímica de la Universidad de Sonora

2.2.4 Análisis estructural

El análisis estructural involucró un análisis estadístico y cinemático de las estructuras primarias y fallas medidas en el área. Estos datos fueron procesados en los softwares libres Stereonet versión 10.1.1. y Faultkin (Marrett y Allmendinger, 1990; Allmendinger *et al.*, 2012).

2.2.5 Análisis paleomagnético

El análisis paleomagnético de este trabajo se realizó en el laboratorio de paleomagnetismo del California Institute of Technology (CALTECH). Se analizaron un total de 91 especímenes bajo el método de desmagnetización por campos alternos utilizando el magnetómetro Shoemaker. Posteriormente, los datos obtenidos se procesaron en el software PMag31b3.

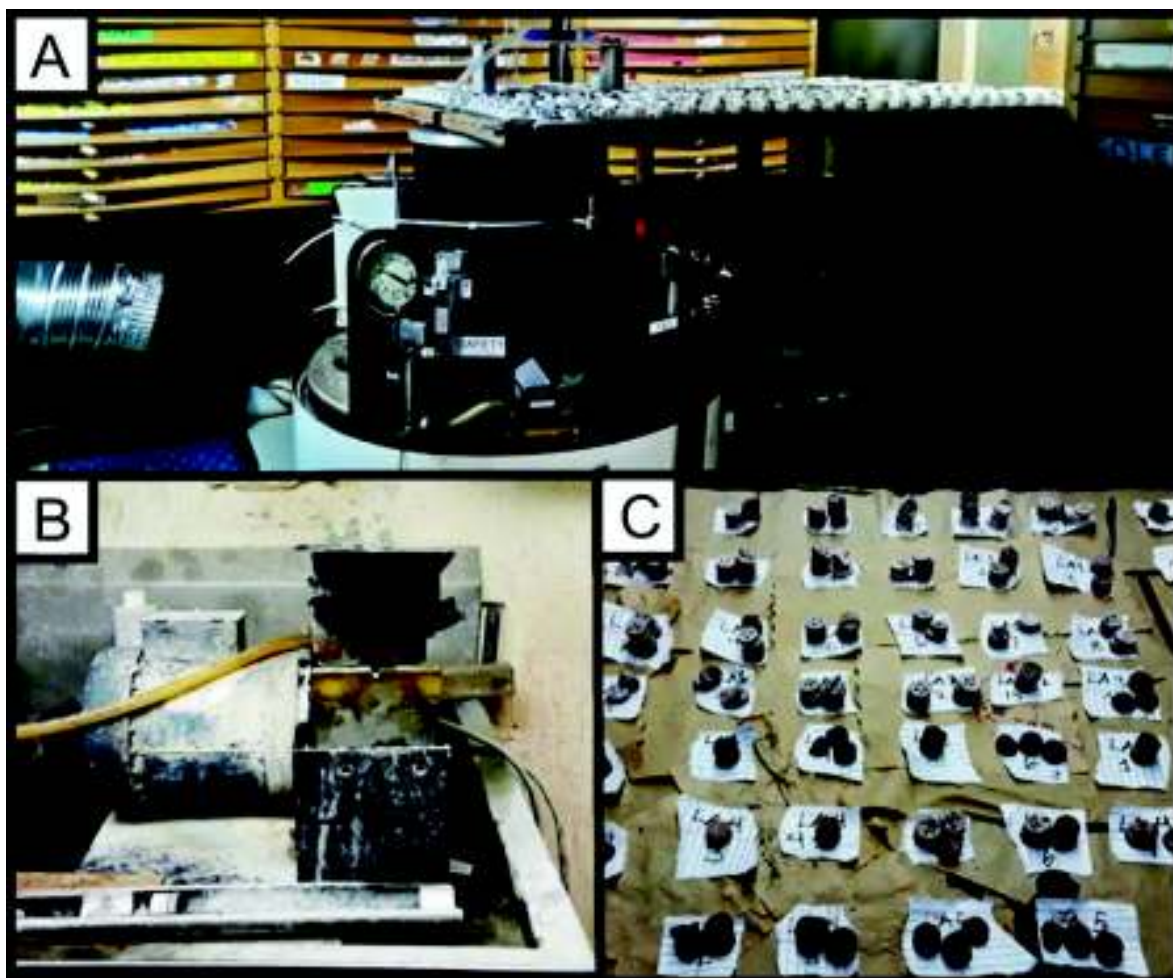


Figura 4. Equipo del laboratorio de paleomagnetismo de Caltech que se utilizó para el análisis paleomagnético de este estudio: A) Magnetómetro Shoemaker; B) Sierra para cortar especímenes; y C) cortes cilíndricos rebanados de los especímenes listos para ser analizados en el magnetómetro Shoemaker.

3 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados más representativos para esta investigación obtenidos de los distintos análisis y procedimientos efectuados. Primero se presentarán los resultados de la cartografía, estratigrafía, las relaciones de campo y las descripciones litológicas de las unidades presentes en el área; en seguida se muestran los resultados del análisis geoquímico, el análisis estructural y el análisis paleomagnético. Dentro de los anexos de este trabajo se incluyen distintas bases de datos que compilan toda la información obtenida en el análisis petrográfico, geoquímico, estructural y paleomagnético.

3.1 Cartografía geológica y estratigrafía de la Sierra Los Algodones

3.1.1 Cartografía geológica

3.1.1.1 Mapa geológico integrado

Como resultado de la cartografía se obtuvo un mapa geológico (Figura 5) que integra todas las unidades litológicas y estructuras presentes en el área de estudio. Este mapa compilado, incluye un total de 12 litológicas que están divididas en un basamento ígneo-metamórfico y dos secuencias volcánicas. El basamento cristalino ígneo (Cretácico) y metamórfico (Triásico-Jurásico), es sobreyacido por la secuencia de arco (Terciario Mioceno inferior-medio) y esta es sobreyacida por la secuencia de rift (Terciario Mioceno superior). El mapa geológico integrado también incluye un Modelo Digital de Elevaciones (*Hillshade*) y el trazo de las fallas principales.

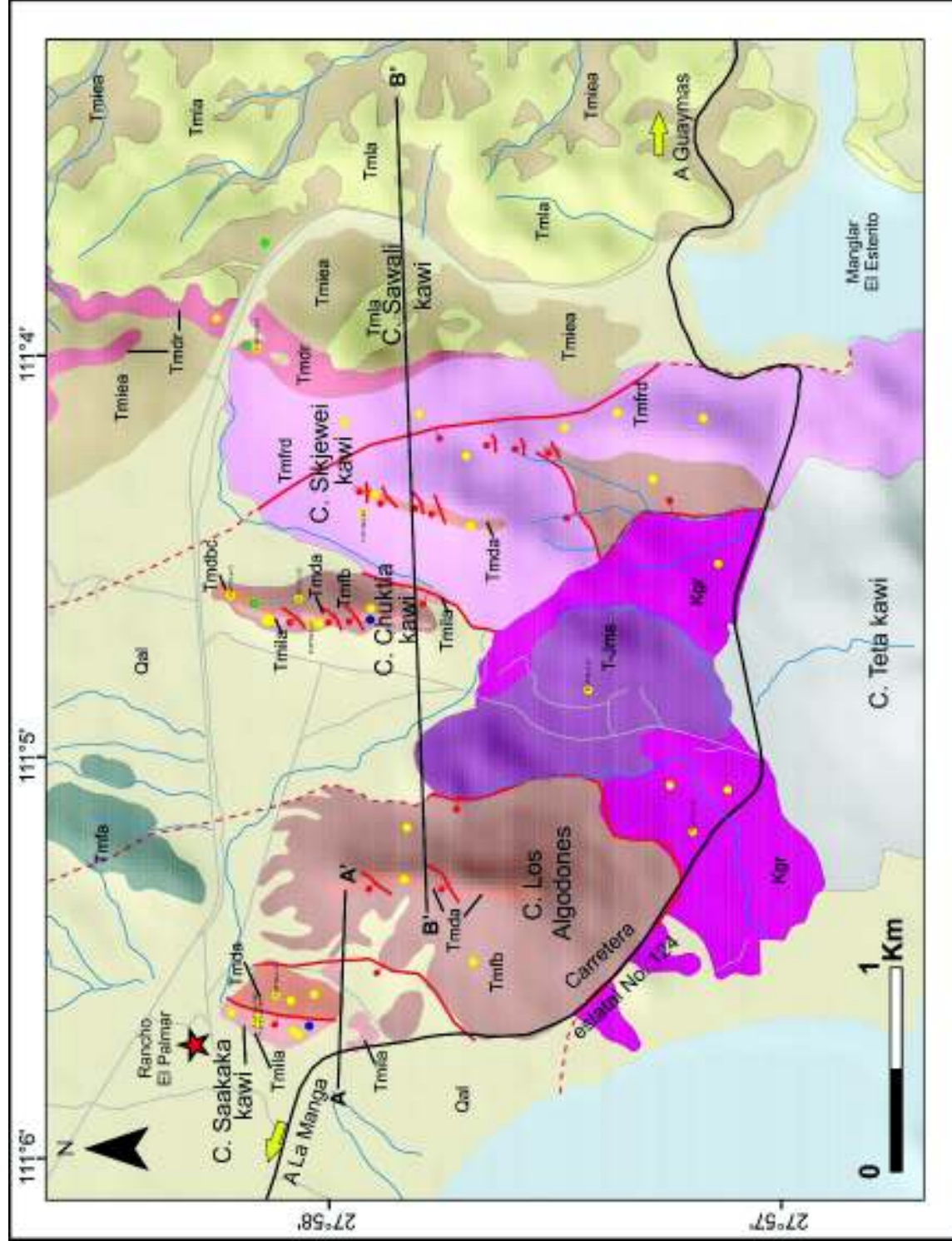


Figura 5. Mapa geológico integrado de la Sierra Los Algodones. Aclaraciones: El Cerro Teta Kawi no forma parte de este estudio. Los círculos de color azul corresponden a los sitios donde se obtuvieron muestras orientadas de la unidad Tm1a-Ignimbrita Los Algodones para el análisis paleomagnético. El nombre de los cerros está en lengua Yaqui y tiene el siguiente significado: Saakaka kawi= Cerro naranja; Chuktia kawi= Cerro cortado; Sikjewe kawi= Cerro rosado; Sawali kawi= Cerro amarillo.

3.1.1.2 Secciones geológico estructural

Las secciones geológico-estructurales A-A' y B-B' con un orientación W-E (Figura 6), exhiben la posición espacial de las distintas unidades litológicas presentes en la Sierra Los Algodones y las relaciones de corte de las fallas presentes en el área.

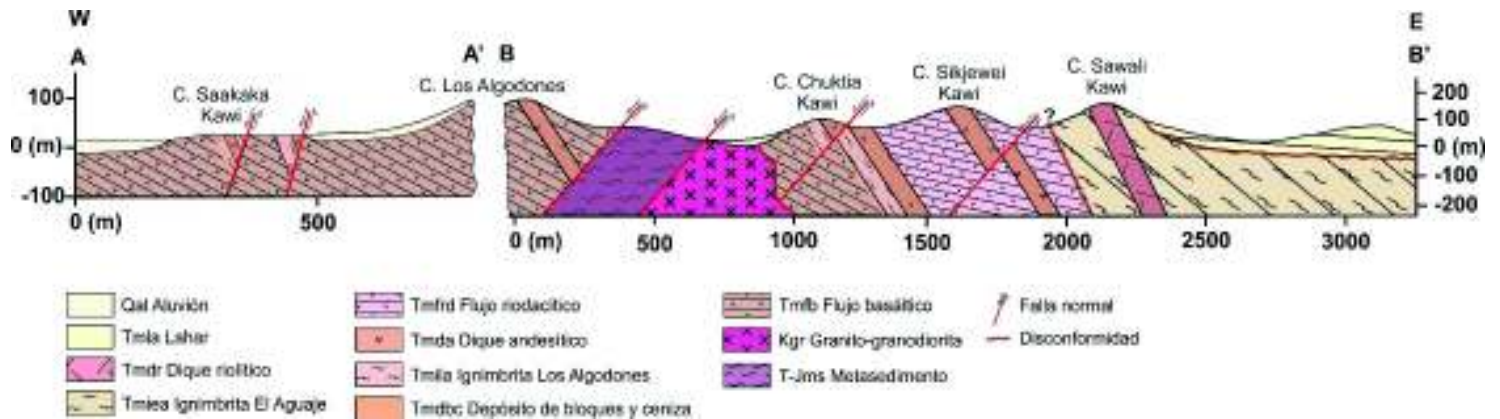


Figura 6. Secciones geológico-estructurales de la Sierra Los Algodones donde se muestra claramente la diversidad de las relaciones de corte y los tipos de contactos entre las distintas unidades litológicas presentes en el área. Aclaraciones: Debido a que la unidad Tmdbc- Depósito de bloques y ceniza no tiene una buena representación en el área, pero se encontró que subyace discordantemente a la unidad Tmila- Ignimbrita Los Algodones, su representación en esta sección es esquemática. Para revisar en donde se ubican los segmentos A-A' y B-B' ir a la figura 5.

3.1.2 Columna estratigráfica compuesta

La columna estratigráfica compuesta (Figura 7), que se presenta a continuación, muestra cómo están posicionadas en el tiempo las unidades litológicas presentes en el área de estudio. Se divide en un basamento ígneo-metamórfico y dos secuencias volcánicas. El basamento es de edad triásico-cretácico e incluye dos unidades, una de carácter ígneo reconocida como Kgr-Granodiorita y otra metamórfica nombrada T-Jms-Metasedimento.

La primera secuencia se trata de un episodio de arco del Terciario Mioceno inferior-medio que se encuentra de manera discordante sobre el basamento triásico-cretácico. Esta secuencia incluye 3 unidades litológicas: Tmfb-Flujo basáltico, Tmfa-Flujo andesítico con una brecha de avance y Tmdbc-Depósito de bloques y ceniza. Estos dos últimos se encuentran mejor expuestos en la porción norte del área de estudio. La unidad Tmfb-Flujo basáltico está muy bien representada en el cerro Los Algodones y con afloramientos menos extensos en el cerro Chuktia kawi y al SW del cerro Sikjewe kawi.

De manera discordante con la secuencia de arco, se encuentra un importante marcador estratigráfico para esta área, que está representado por la unidad Tmila-Ignimbrita Los Algodones. Esta unidad puede encontrarse en el lado oeste del cerro Saakaka kawi y en la cima del cerro Chuktia kawi.

La tercera secuencia corresponde a una etapa de rift, es un poco más compleja y diversa que las anteriores. Esta incluye seis unidades litológicas, dos de carácter ignimbrítico (Tmila-Ignimbrita Los Algodones y Tmiea-Ignimbrita El Aguaje), un flujo lávico (Tmfrd-Flujo riódacítico), dos inyecciones hipovolcánicas (Tmda-Dique andesítico y Tmdr-Dique riolítico) y finalmente esta secuencia está coronada por un lahar (Tmla-Lahar). Con lo que respecta a las unidades Tmiea-Ignimbrita El Aguaje y Tmdr-Dique riolítico se encuentran mejor representadas en la zona norte del área de estudio. La unidad Tmfrd-Flujo riódacítico se presenta ampliamente en el cerro Sikjewe kawi, la unidad Tmda-dique andesítico está muy bien expuesta en toda la Sierra Los Algodones y la unidad Tmla-lahar tiene una amplia representación al este del área de estudio.

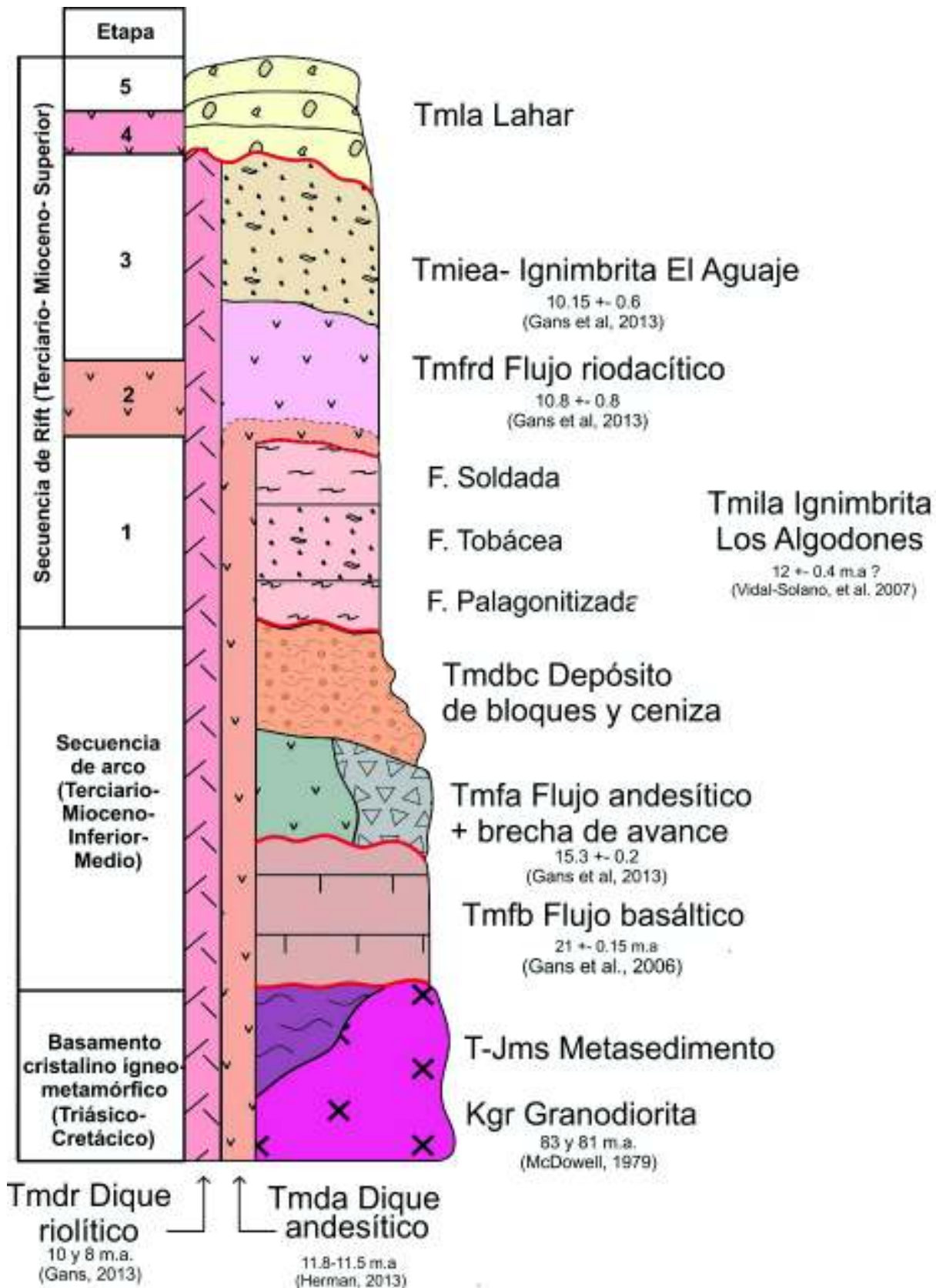


Figura 7. Columna estratigráfica compuesta de la Sierra Los Algodones. En la parte izquierda de esta figura se presentan los distintos episodios magmáticos presentes en la zona de estudio. La secuencia de rift está dividida en 5 etapas: 1) Depósito piroclástico ignimbrítico representado por la unidad Tmila; 2) Múltiples inyecciones de la unidad Tmda; 3) Flujo de lava representado por la unidad Tmfrd y depositación de la unidad piroclástica Tmiea; 4) Emplazamiento de la inyección Tmdr y 5) Destrucción de edificio volcánico (Tmla). El orden cronológico del emplazamiento de la unidad Tmda y Tmfrd es controversial debido a que no se pudo determinar en este estudio qué ocurrió primero, esto es representado por la línea discontinua que pone en contacto a estas unidades en la columna estratigráfica.

3.1.3 Descripción litológica de unidades

a) Basamento ígneo-metamórfico

T-Jms-Metasedimento: En contacto intrusivo por parte de la Kgr se encuentra la unidad T-Jms, que aflora al este del cerro Los Algodones. Se trata de un hornfels verde cuyo protolito podría ser una limolita. Bajo el microscopio esta unidad presenta una textura granoblástica y por su mineralogía $Qz > FA > Anf > Ox$ podría corresponder a un hornfels verde o a una anfibolita (Figura 8).

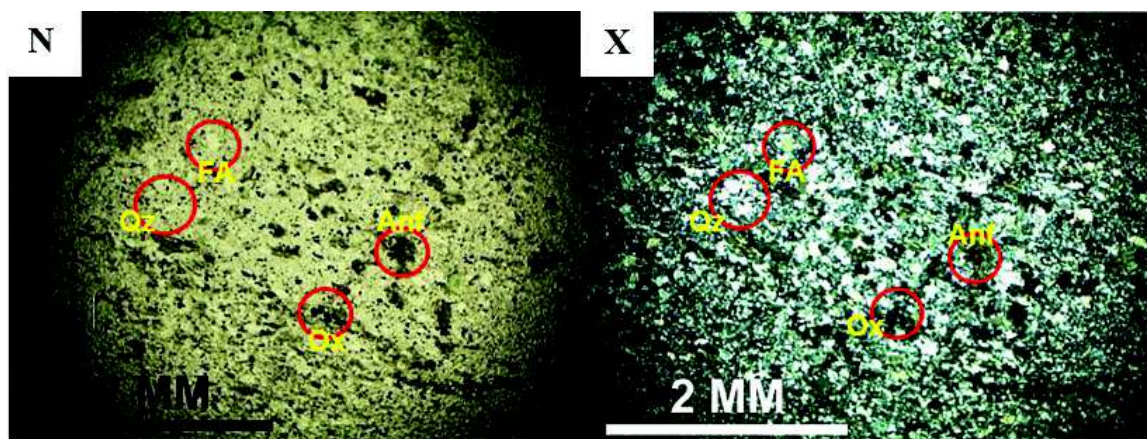


Figura 8. Sección delgada de la muestra P-AP19LA-32 correspondiente a la unidad T-Jms-Metasedimento observada bajo el microscopio petrográfico con luz natural (N) y luz polarizada (X). Esta unidad corresponde a un hornfels verde en facies cuarzo-feldespática. Qz= Cuarzo; FA= Feldespato alcalino; Anf= Anfíbol; Ox= Oxido.

Kgr-Granodiorita: Corresponde a una granodiorita de biotita y anfíbol, cuyos afloramientos son visibles sólo en los cortes realizados para la construcción de la carretera estatal no. 124 a lo largo de ~5km. Esta unidad muestra distintos grados de cristalización, la facies presente en la Sierra Los Algodones se caracteriza por ser de grano grueso con cristales de biotita y mega cristales de anfíbol, los afloramientos de esta unidad están representados por lomas que tienen un grado de intemperismo alto lo que hace a la muestra muy deleznable. La Kgr intrusión a la unidad metasedimentaria T-Jms y es cubierta en discordancia por la unidad Tmfb y en general, estructuralmente presenta fallas orientación preferencial al SE (Figura 9).

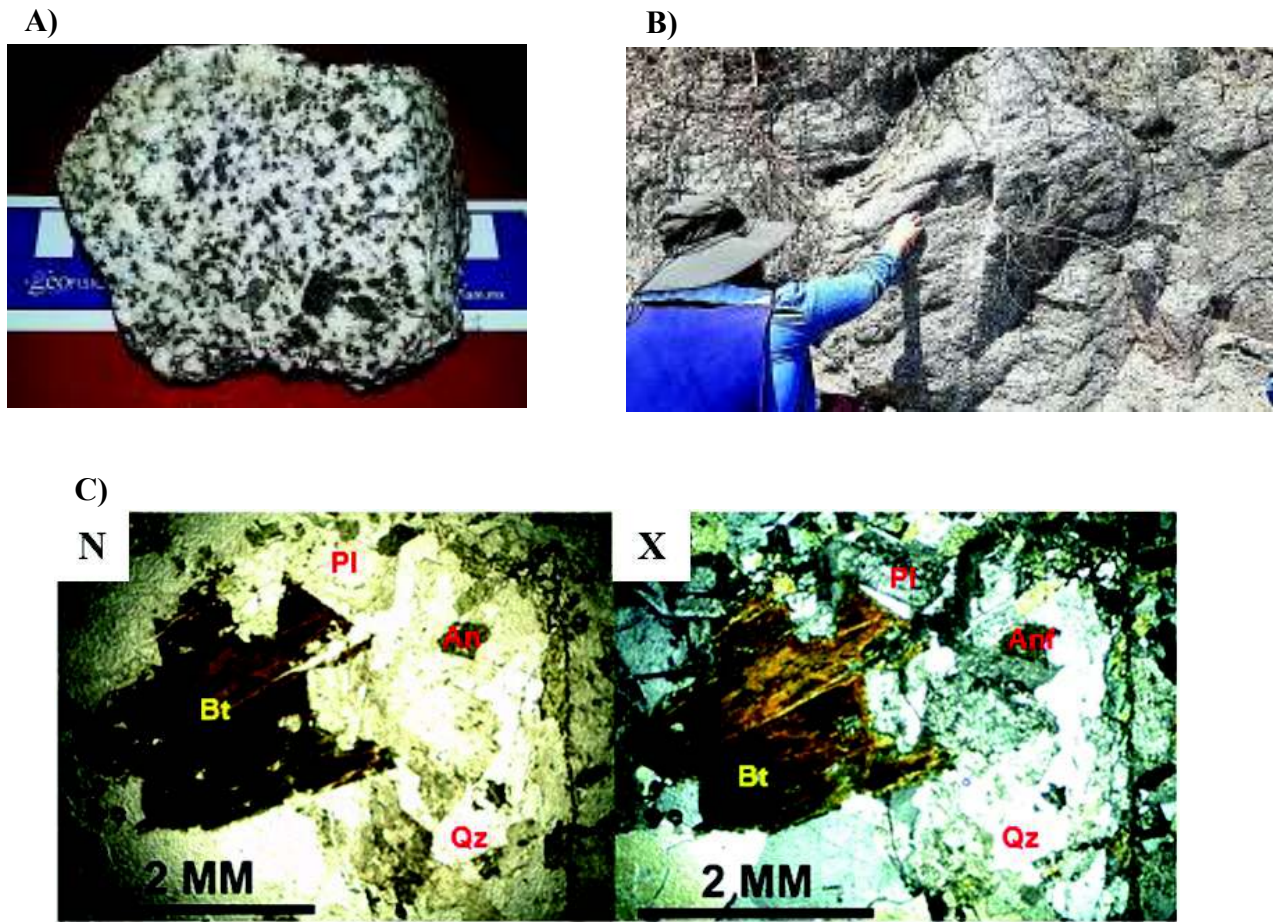


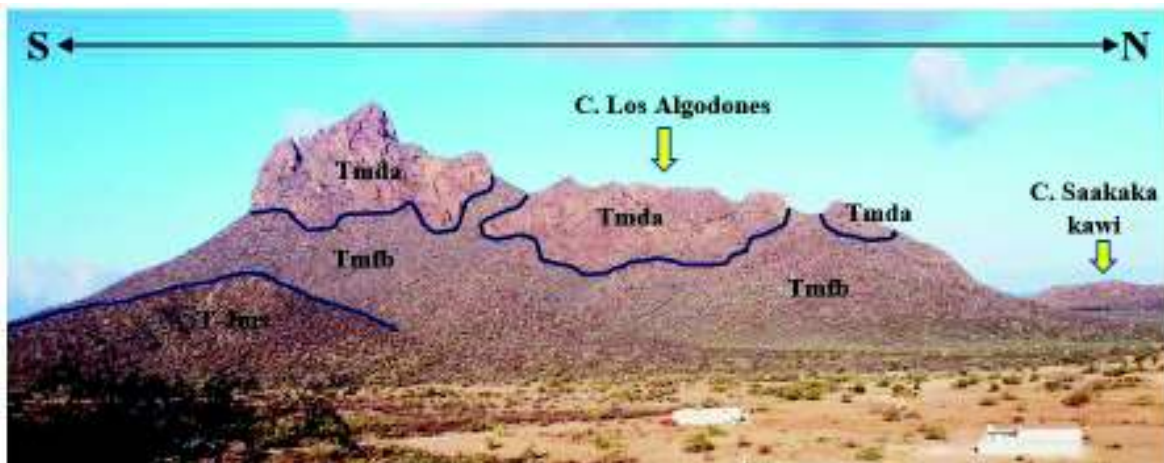
Figura 9. A) Muestra de mano de la unidad Kgr-Granodiorita; B) Afloramiento de la unidad Kgr-Granodiorita que se encuentra sobre el Blvd. Manlio Flavio Beltrones; C) Sección delgada de la muestra P-AP19LA-35 correspondiente a la unidad Kgr-Granodiorita observada bajo el microscopio petrográfico con luz natural (N) y luz polarizada (X). Esta unidad corresponde a una granodiorita de biotita y anfíbol. Bt= Biotita; Qz= Cuarzo; Anf= Anfíbol; Pl= Plagioclasa.

b) Secuencia de arco

Tmfb-Flujo basáltico: Esta unidad se encuentra aflorando en gran parte del área de estudio principalmente en el cerro Los Algodones (Figura 10. A), en campo se observa muy fracturada y fallada (Figura 10. B) con orientaciones preferenciales al NW para las fallas, además está intrusionada por las unidades Tmdr y Tmda, sus espesores no sobrepasan los 15 metros. Para esta unidad se agrupó un conjunto de facies de rocas intermedias-máficas a máficas que presentan fenocristales de olivinos y anfíboles oxidados y plagioclasas, además de presentar amígdalas de hasta 3 centímetros que se encuentran parcialmente rellenas de zeolitas (Figuras 10. C y D) Bajo el microscopio puede observarse que se trata de un basalto con fenocristales de olivino iddingsitizado

embebidos en una matriz afieltrada con una relación mineralógica de $Pl > Cpx > Ox$ (Figura 10. E).

A)



B)



C)



D)



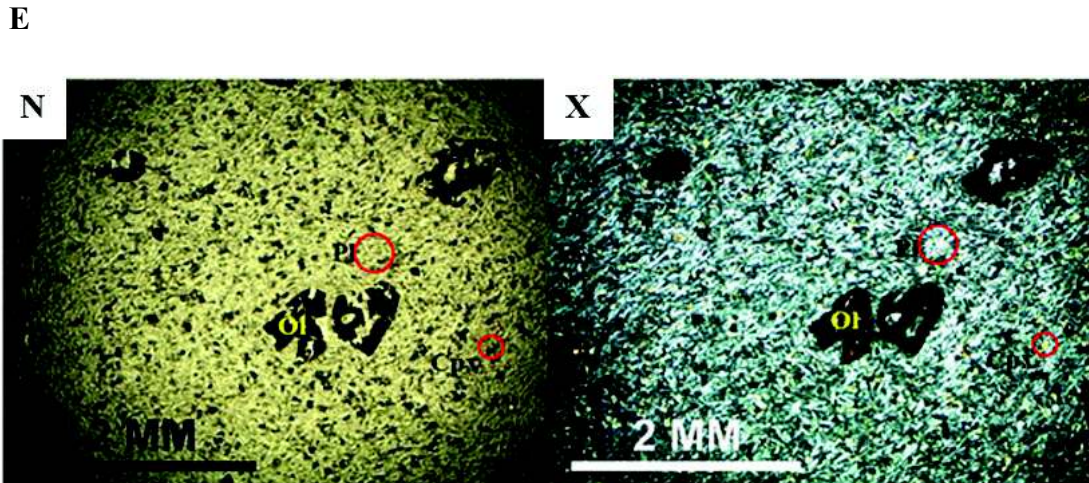


Figura 10. A) Vista del lado este del cerro Los Algodones, donde se encuentran aflorando la unidad Tmfb en la base, con evidencia de las intrusiones hipolcánicas nombradas en este trabajo como Tmda. Al sur del cerro Los Algodones, en la base por contacto por falla se encuentra la unidad Kms, correspondiente al basamento ígneo-metamórfico laramídico; B) Afloramiento en el cerro Sikjeweí Kawi. En la fotografía se observa el alto grado de fracturamiento que presenta la unidad Tmfb- Flujo basáltico (Escala: martillo largo); C) Muestra de mano de la unidad Tmfb en facies amigdalár; D) Muestra de mano de la unidad Tmfb en facies lávica masiva; E) Sección delgada de la muestra P-AP19LA-20 de la unidad Tmfb-Flujo basáltico observada bajo el microscopio petrográfico con luz natural (N) y luz polarizada (X). Esta unidad presenta fenocristales de olivino embebidos en una matriz afieltrada con una relación mineralógica de $Pl > Cpx > Ox$. Ol= Olivino; Pl= Plagioclasa; Cpx= Clinopiroxeno; Ox= Óxidos de Fe-Ti.

Tmfa- Flujo andesítico: Los afloramientos de esta unidad se observan al Norte del área más ampliamente en la Sierra El Aguaje. Tmfa agrupa a un flujo andesítico color gris porfídico de plagioclasas y a una brecha de avance con las mismas características, ambos presentan un intemperismo esferoidal (Figura 11).



Figura 11. Afloramiento de la unidad Tmfa-Flujo andesítico al norte del área de estudio (Escala: martillo largo).

Tmdbc-Depósito de bloques y ceniza: Esta unidad corresponde a un depósito de bloques y ceniza de color naranja con cristales plagioclasa y con líticos de composición intermedia porfídicos de plagioclasa. Los espesores de esta unidad no sobrepasan los 2 metros. Bajo el microscopio esta unidad se observa que tiene una textura tobácea con un grado de soldadura menor, es de composición riolítica y presenta una relación mineralógica de FA>Pl>Cpx>Anf>Ox con una oxidación incipiente (Figura 12).

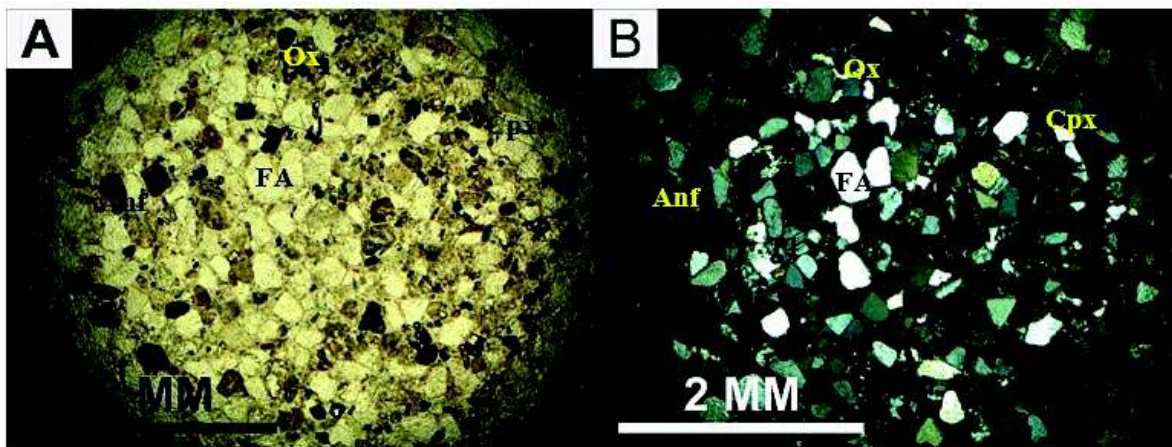


Figura 12. Sección delgada de la muestra P-API9LA-23 de la unidad Tmdbc-Depósito de bloques y ceniza observada bajo el microscopio petrográfico con luz natural (A) y luz polarizada (B). Esta unidad presenta una textura tobácea y una relación mineralógica FA>Pl>Cpx>Anf>Ox con una oxidación incipiente. FA= Feldespato alcalino; Pl= Clinopiroxeno; Anf= Anfíbol; Ox= Óxidos.

c) Secuencia de rift

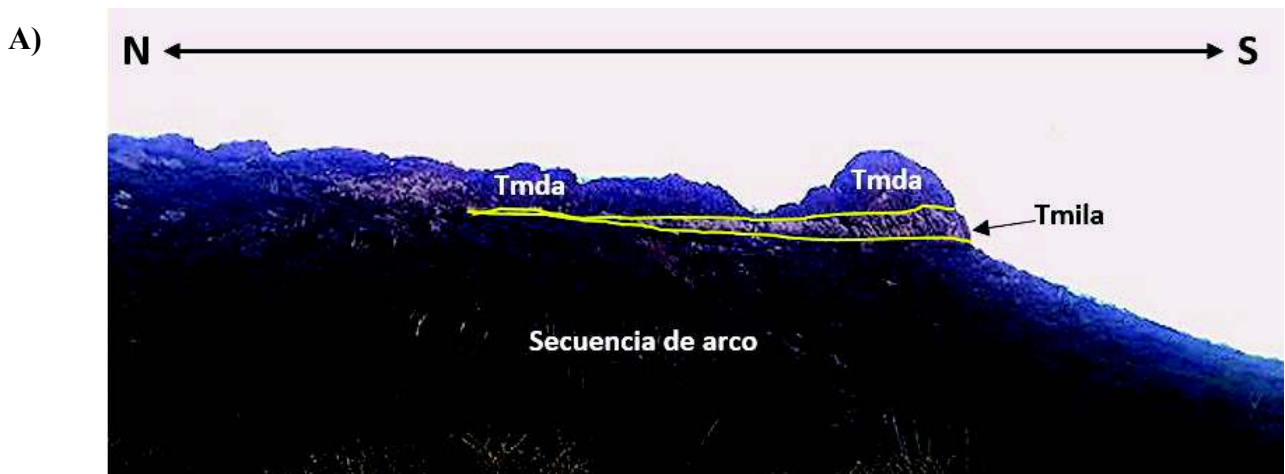
Tmila-Ignimbrita Los Algodones: En contacto discordante a la unidad Tmdbc se presenta un depósito ignimbrítico nombrado para este trabajo como Ignimbrita Los Algodones. Esta unidad no alcanza más de 3 metros de espesor y puede encontrarse en forma de mesas que se acuñan hacia el norte (Figura 13 A).

Para esta unidad se logró identificar 3 facies; en la base del depósito se encuentra una facies no soldada palagonitizada de color naranja con líticos de composición intermedia porfídicos de plagioclasa (Figura 13 B). Petrográficamente esta facies se reconoce como una toba palagonitizada de composición riolítica porfídico de FA> Cpx> Ox de origen ignimbrítico. Presenta líticos de composición intermedia porfídicos de Pl (Figura 14 A).

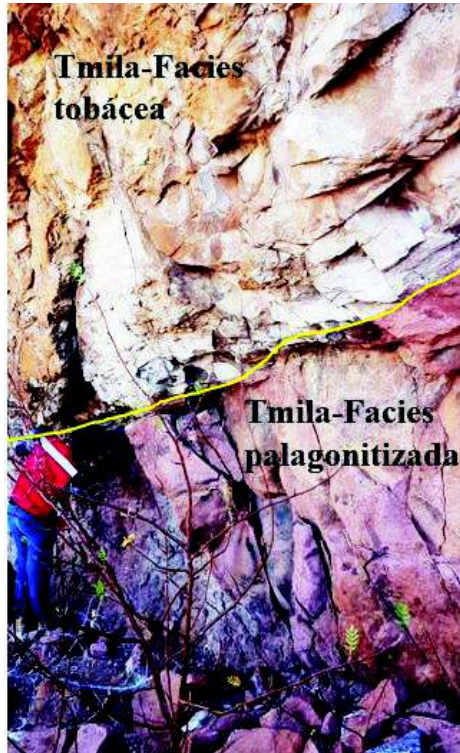
Sobreyaciendo a la facies palagonitizada, se encuentra esta misma unidad, pero en facies tobácea con una coloración entre rosa y beige y con los mismos líticos de composición intermedia, el grado de soldadura aumenta, pero no significativamente (Figura 13 C). Bajo el microscopio este depósito presenta una textura vitroclástica con un grado menor de soldadura y de composición riolítica. Existe la presencia de fenocristales de FA>Ol>Cpx verde> Ox, líticos de composición intermedia de Pl y Anf y oxidación (Figura 14 B).

En la cima del depósito de esta unidad, se tiene una facies soldada, de colores entre rosa y gris y con los mismos líticos de composición intermedia y enclaves traquíticos (Figura 13 D). Petrográficamente se observa a una toba de ceniza soldada de composición riolítica porfídica de FA> Ol> Cpx> Ox. Presenta líticos de composición intermedia porfídicos de Pl y Anf muy oxidados (Figura 14. C).

Finalmente, todo este depósito se encuentra intrusionado por las unidades Tmdr y Tmda, con contactos visibles con la Tmda. Las fallas que afectan a este depósito tienen orientaciones preferenciales hacia el NE.



B)



C)



D)



Figura 13. A) Vista del lado oeste del cerro Chuktia kawi, donde en la base de este cerro aflora la secuencia de arco, sobreyacida por la unidad Tmila-Ignimbrita Los Algodones. En esta fotografía se observa como la unidad Tmila se acuña hacia el norte. Tanto la secuencia de arco como la unidad Tmila se encuentran cortadas por la intrusión Tmda y que se encuentra florando ampliamente en la cima de este cerro; B) Afloramiento de la Tmila en facies palagonitizada en contacto con facies tobácea en el cerro Chuktia Kawi; C) Afloramiento de la unidad Tmila en facies tobácea en el cerro Chuktia Kawi; D) Afloramiento de la unidad Tmila en facies soldada en el cerro Saakaka kawi. En este afloramiento se puede observar la verticalidad de esta unidad y la presencia de enclaves traquíticos (círculo rojo) y pómez (círculo azul).

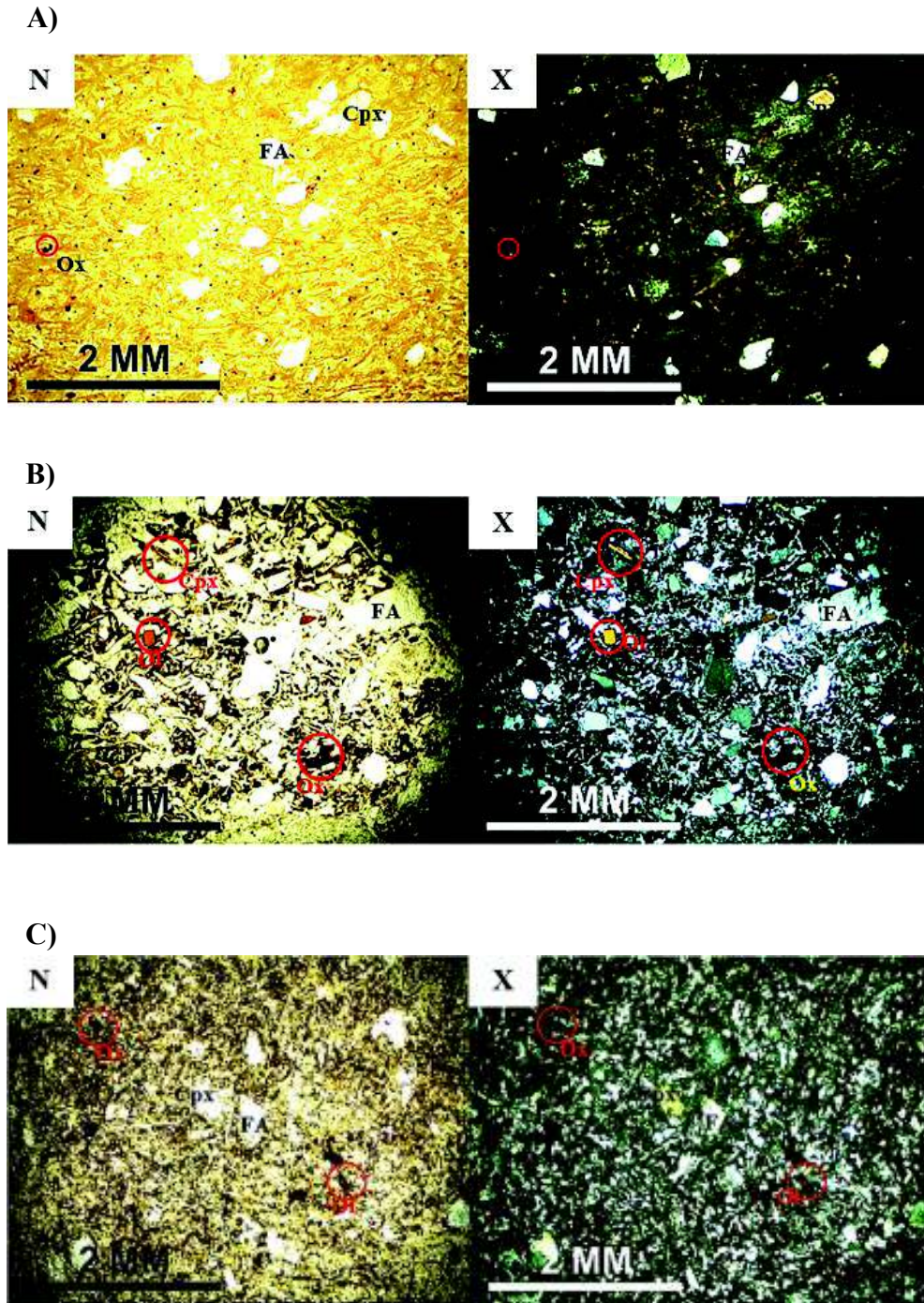


Figura 14. Secciones delgadas de la unidad Tmila-Ignimbrita Los Algodones. A) Facies palagonitizada (Muestra P-API9LA-08C): Toba de ceniza palagonitizada de composición riolítica porfídica de FA> Cpx> Ox de origen ignimbrítico. Presenta líticos de composición intermedia porfídicos de Pl; C) Facies tobácea (Muestra P-API9LA-03): Toba de ceniza porfídica de FA>Ol>Cpx verde> Ox con líticos de composición intermedia de Pl y Anf; C) Facies soldada (muestra P-API9LA-08C): Toba de ceniza soldada de composición riolítica porfídica de FA> Ol> Cpx> Ox. Presenta líticos de composición intermedia porfídicos de Pl y Ang muy oxidados. Ol= Olivino; FA= Feldespato alcalino; Cpx= Clinopiroxeno; Pl= Plagioclasa; Ox= Óxidos; N= Luz Natural; X= Luz Polarizada.

Tmda-Dique andesítico: Esta intrusión hipabisal se trata de numerosos diques que se pueden observar en toda el área de estudio cortando a toda la secuencia de arco (Figura 15. A) y también a la Tmila-Ignimbrita Los Algodones (Figura 15. B), sus espesores pueden ir desde algunos centímetros, pero también a varios metros. Petrográficamente corresponde a un basalto-andesita glomeroporfídico de $Pl > Cpx > Ox$ con textura traquítica afieltrada de Pl y Cpx, presenta oxidación. Las Pl presentan un intercrecimiento en forma de cruz. Los cristales de óxidos están en forma de astillas (Figura 15. C)

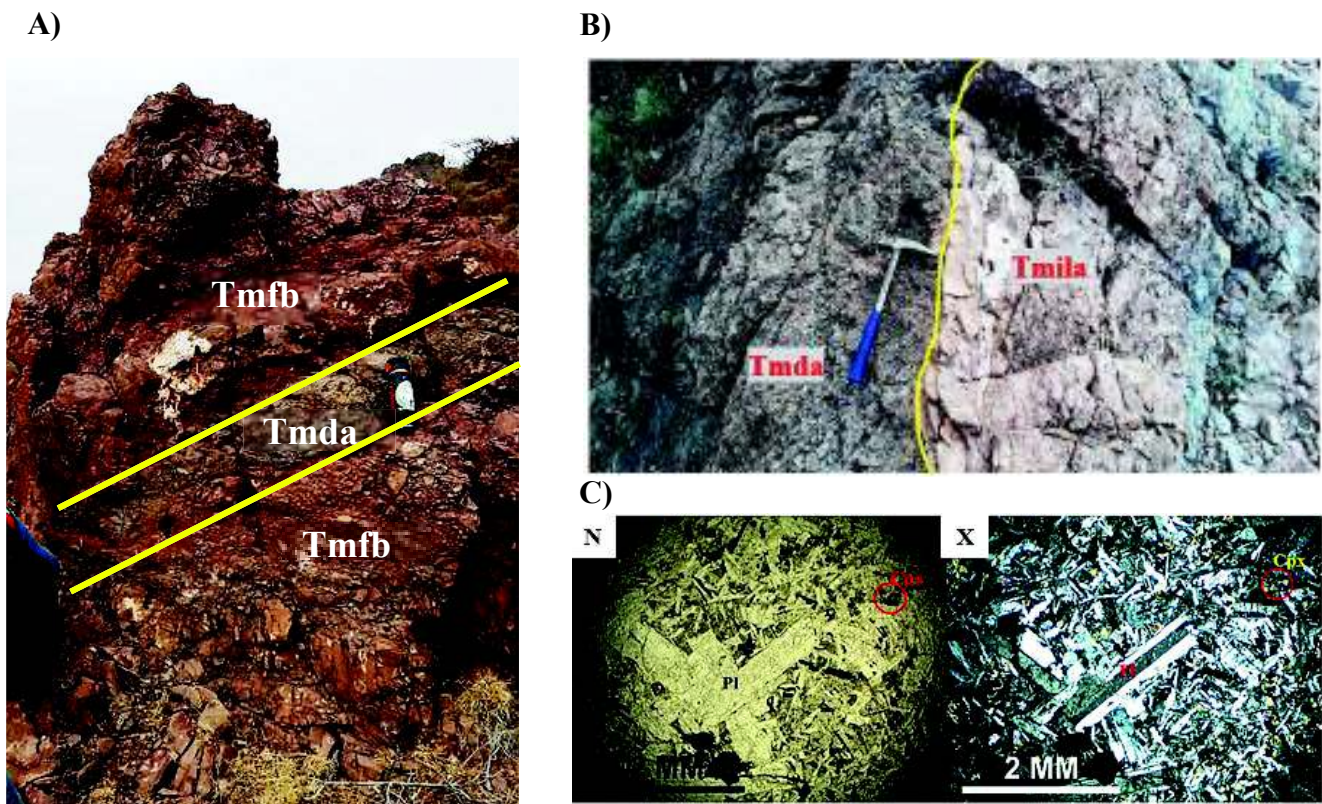


Figura 15. A) Dique Tmda intrusionando a la unidad Tmfb. Este afloramiento es observable en el sur del cerro Saakaka kawi; B) Contacto entre la unidad Tmila en facies soldada y el dique Tmda. Este afloramiento es observable en el cerro Saakaka kawi; C) Sección delgada de la muestra P-AP19LA-13 de la unidad Tmda-Dique andesítico observada bajo el microscopio petrográfico con luz natural (N) y luz polarizada (X). Este dique corresponde a un basalto-andesita glomeroporfídico de $Pl > Cpx > Ox$ con textura traquítica afieltrada de Pl y Cpx, presenta oxidación. Las Pl presentan un intercrecimiento en forma de cruz. Los cristales de óxidos están en forma de astillas. Pl= Plagioclasa; Cpx= Clinopiroxeno; Ox= Óxidos.

Tmfrd- Flujo riódacítico: Esta unidad se trata de un flujo riódacítico porfídico de plagioclasa, se encuentra silicificado y en algunas zonas tiene alteración a clorita. Los espesores de esta unidad no sobrepasan los 15 metros (Figura 16. A). Bajo el microscopio esta unidad presenta una textura porfídica de $Pl > FA > Cpx > Ox$ con una matriz ofítica afieltrada de Pl. (Figuras Figura 16 B.)

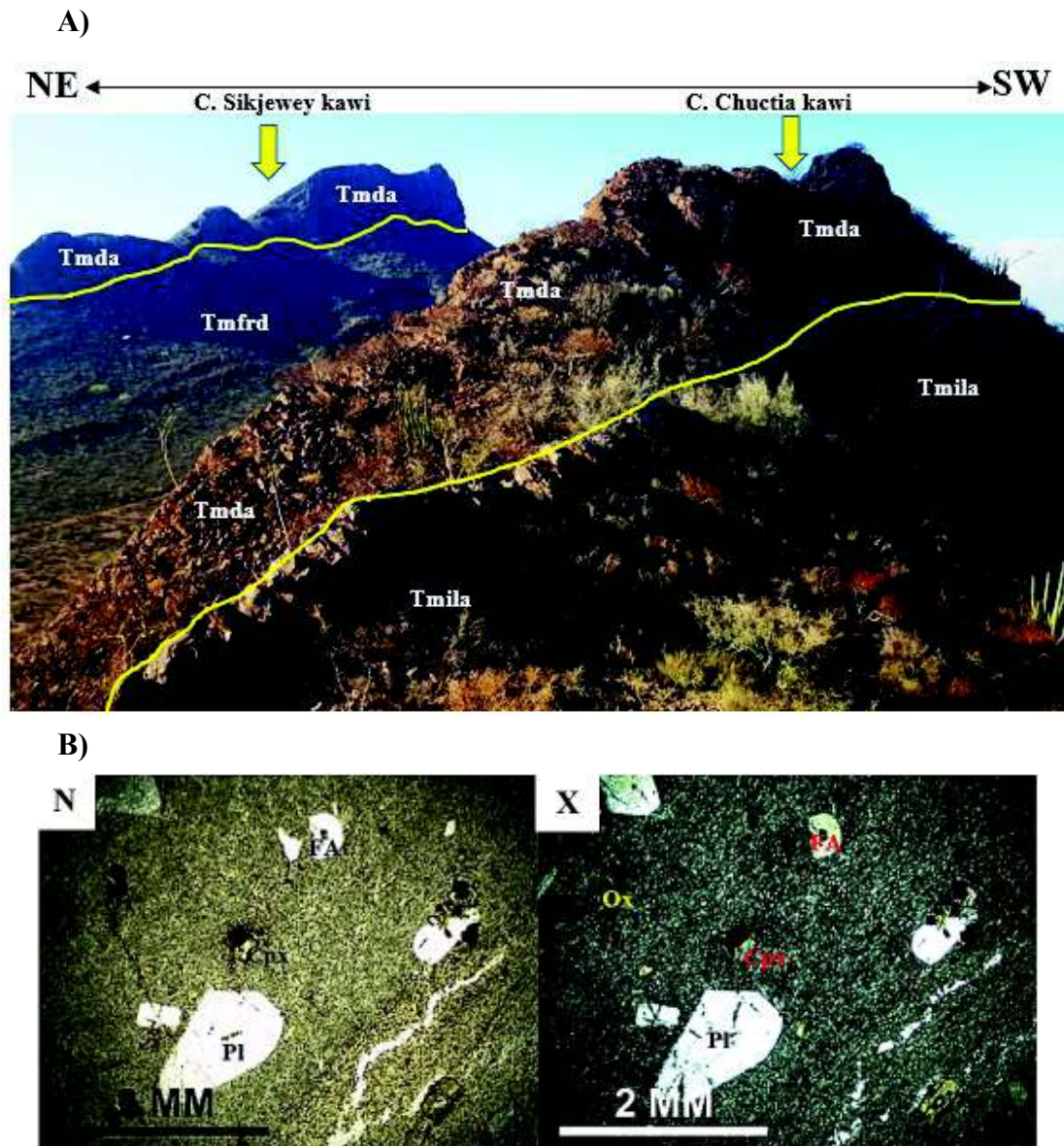


Figura 16. A) En primer plano se observa el cerro Chuctia kawi, que presenta en la cima a los depósitos de la unidad Tmila-Ignimbrita Los Algodones, coronado por Tmda-Dique andesítico, en segundo plano está el cerro Sikjewe kawi caracterizado por la presencia de los flujos de la unidad Tmfrd-Flujo riódacítico, coronado por la presencia de la unidad Tmda-Dique andesítico; B) Sección delgada de la muestra P-AP19LA-25 de la unidad Tmfrd-Flujo riódacítico observada bajo el microscopio petrográfico con luz natural (N) y luz polarizada (X). Este flujo riódacítico tiene una textura porfídica de $Pl > FA > Cpx > Ox$ con una matriz ofítica afieltrada de Pl. Pl= Plagioclasa; FA= Feldspato alcalino; Cpx= Clinopiroxeno; Ox= Óxidos.

Tmiea-Ignimbrita El Aguaje: Los afloramientos de esta unidad son muy heterogéneos porque presentan una gran cantidad de líticos con una muy mala clasificación y es común confundirla con un conglomerado, sus espesores no sobrepasan los 5 metros de altura (Figura 17. A) Petrológicamente esta unidad corresponde a una toba lítica de tonalidades entre amarillo y beige, tiene composición riolítica y es de origen ignimbrítico sin soldar, los líticos que presenta se tratan de fragmentos de vidrio y rocas de composición intermedia (Figura 17. B)

C)



B)



Figura 17. A) Afloramiento de la unidad Tmiea al norte del cerro Sikjeweí Kawi. En la fotografía se puede observar como los depósitos de esta unidad son muy heterogéneos, presentando un gran contenido de líticos con una muy mala clasificación; B) Muestra de mano de la unidad Tmiea donde puede observarse la heterogeneidad de su naturaleza.

Tmdr-Dique riolítico: Está intrusión ocurre después de la depositación de la unidad Tmiea, y corta de manera discordante a todas las unidades de la secuencia de arco y de rift. Este dique de composición riolítica tiene textura perlítica y es porfídico de plagioclasas (Figura 18. A). Bajo el microscopio se observa muy bien representada la textura perlítica de esta unidad y con una gran ausencia de cristales, por lo que en algunas zonas tiene una textura afanítica mientras que en otras presenta una textura porfídica de clinopiroxeno oxidado (Figura 18. B).

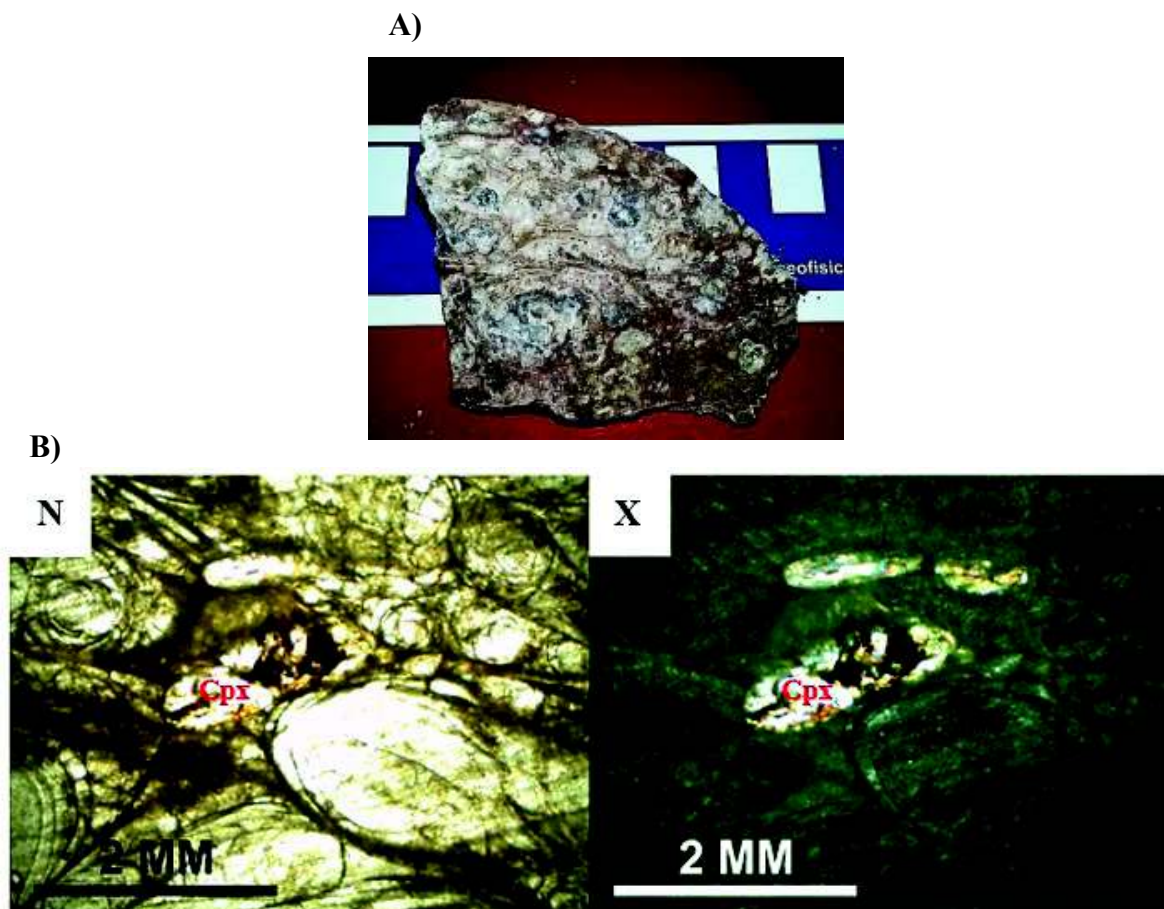


Figura 18. A) Muestra de mano del dique Tmdr donde se pueden observar líneas de flujo y la textura perlítica característica de esta unidad; B) Sección delgada de la muestra P-AP19LA-21 de la unidad Tmdr-Dique riolítico observada bajo el microscopio petrográfico con luz natural (N) y luz polarizada (X). En las micrografías es posible observar una textura perlítica muy marcada con apenas unos cuantos fenocristales de clinopiroxeno oxidado.

Tmla-Lahar: Esta unidad se encuentra coronando a la secuencia de rift y sobreyace a la Tmiea. Los depósitos de esta unidad tienen coloraciones entre amarillas y beige y no sobrepasan los 5 metros de espesor. Vega-Granillo *et. al* (2000) reportan a esta unidad como brechas laháricas de color crema, estratificación gruesa a fina y clastos angulosos a subredondeados de rocas distintas rocas volcánicas, como andesitas, riolitas y tobas ignimbríticas (Figura 19).

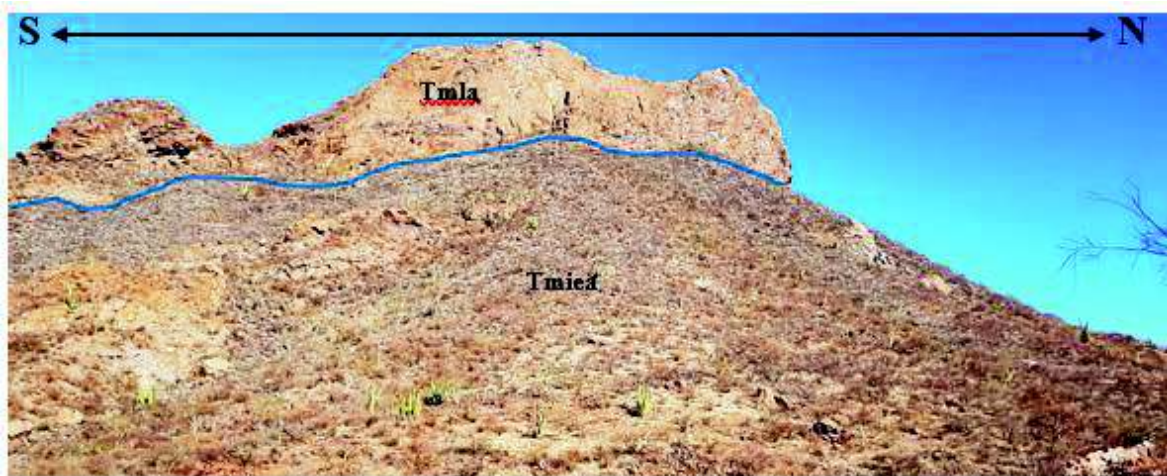


Figura 19. Vista oeste del cerro Sawali Kawi donde se observa del depósito de lahares en la cima, sobreyaciendo a la unidad Tmiea-Ignimbrita El Aguaje.

3.2 Análisis geoquímico de la Ignimbrita Los Algodones

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en el análisis geoquímico de la unidad Tmila-Ignimbrita Los Algodones, debido a que es de particular interés para este trabajo, sin embargo, también se practicaron estudios químicos a algunas de las otras unidades volcánicas, para conocer sus contenidos elementales consultar el capítulo de Anexos.

3.2.1 Caracterización geoquímica

Para la caracterización geoquímica de la Tmila se utilizaron dos tipos de diagramas. El diagrama multielemental de normalización a MORB de Pearce (1983), y el diagrama XY de Nb vs Zr de Vidal-Solano *et. al.*, (2013). Los análisis geoquímicos se realizaron para un grupo de 26 muestras testigo donde se clasificó para este conjunto en tres divisiones según el área que cubría la medición: matriz, enclaves y vetillas de cuarzo, esto con el fin de comprender las variabilidades de la composición química en cada muestra según el tipo de área que se analizó, para conocer más a fondo la metodología de los análisis geoquímicos consultar el apartado de Anexos.

El diagrama de normalización a MORB (Pearce, 1983) muestra que la Tmila con áreas cubiertas mayormente por matriz presentan anomalías negativas en Sr, Ba, P y Ti y picos pronunciados en elementos como Rb y Th, mientras que la Tmila con áreas donde existía la presencia de enclaves traquíticos, los resultados son muy parecidos a los de la Tmila con mediciones en la matriz, con excepción de que en este caso no hay anomalía negativa en P (Figura 20).

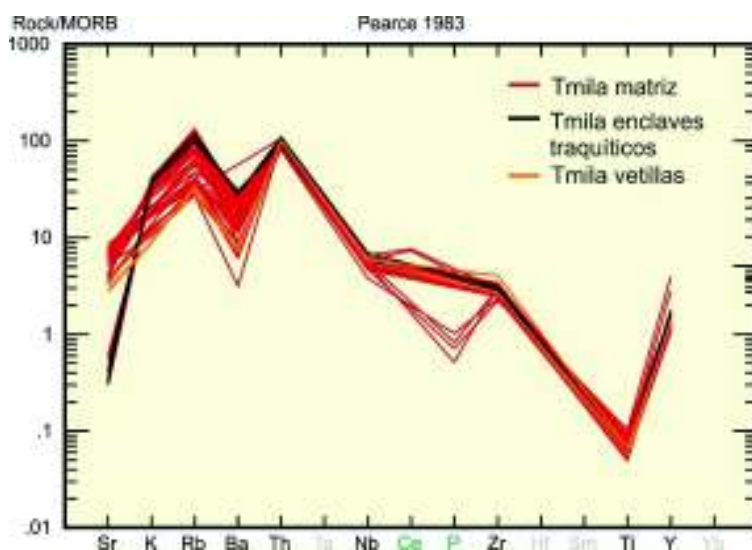


Figura 20. Diagrama multielemental de normalización a MORB (Pearce, 1983) para la Tmila que muestra anomalías negativas en Sr, Ba y Ti y picos pronunciados en Rb y Th. Los elementos en tipografía de color negro son los que presentan buena medición en el equipo, los elementos en color gris no fueron medidos y los elementos en verde son los que no presentan una buena medición en el equipo.

El diagrama XY de Nb vs Zr muestra que la Tmila en mediciones en áreas que involucran a la matriz principalmente tiene valores de Zr entre ~200-360 (ppm) y ~15-30 (ppm) para el Nb, mientras que, para áreas con la presencia de enclaves, los valores para estos elementos permanecen más constantes, para el Zr entre ~250-260 ppm y ~20-25 ppm para el Nb. En el caso de las áreas con la presencia de vetillas de cuarzo, los valores para el Nb permanecen constantes (~ 20 ppm) y valores altos de Zr (~ 380 ppm) en comparación con los otros dos tipos de áreas (Figura 21).

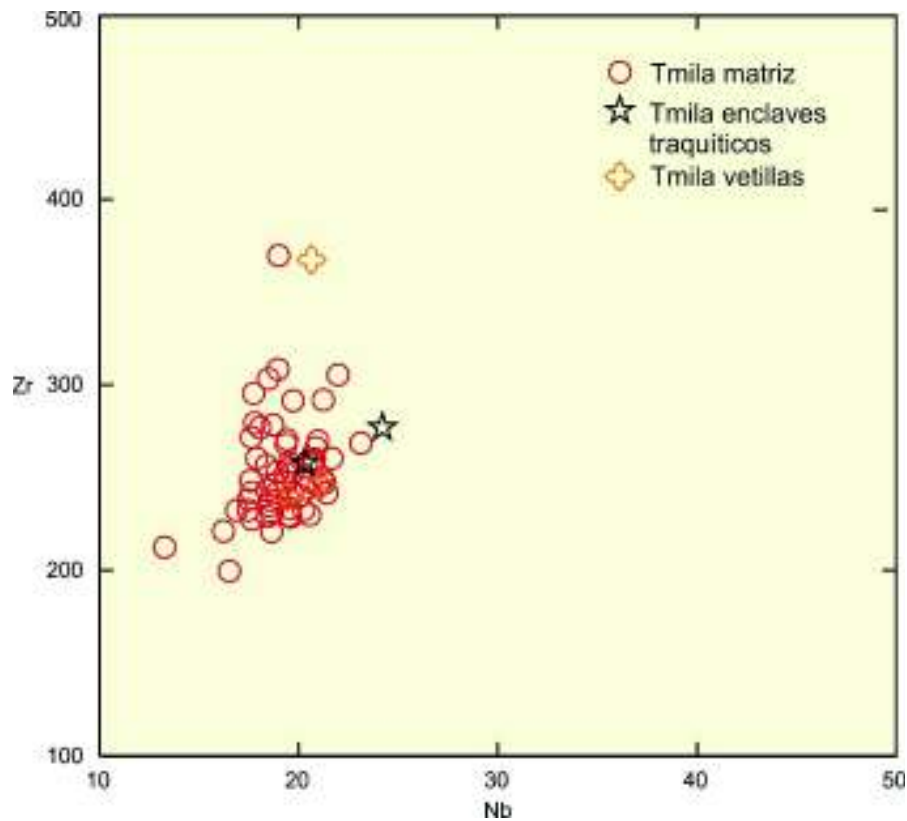


Figura 21. Diagrama XY (Vidal-Solano *et al.* 2013) utilizado para conocer las variaciones de las concentraciones de Nb vs Zr en la unidad Tmila.

3.2.2 Correlación geoquímica

Para la correlación geoquímica de la Tmila se utilizó el diagrama ternario de Sr-Rb-Fe publicado por Vidal-Solano *et. al.*, (2013). Al ubicar a la Tmila dentro de este diagrama ternario presenta variaciones en el contenido de Sr permitiendo dividirla en dos grupos donde el grupo 1, que corresponde a análisis realizados en áreas que involucraban principalmente a la matriz y algunos otros con la presencia de enclaves traquíticos presentan variaciones medias con respecto al Rb/K_2O y Fe_2O_3 , mientras que el segundo grupo, que engloba una parte de las muestras donde se analizaron áreas que cubrían principalmente la matriz y otras que presentaban vetillas, tienen variaciones muy altas de Sr en relación Rb/K_2O y Fe_2O_3 (Figura 22).

Con base en lo anterior, el grupo 1 puede ubicarse perfectamente en el campo que corresponde a la localidad de Cataviña, Baja California, mientras que al grupo 2 no es posible asignarle una ubicación, dentro de lo publicado anteriormente por Vidal-Solano *et al.* (2013).

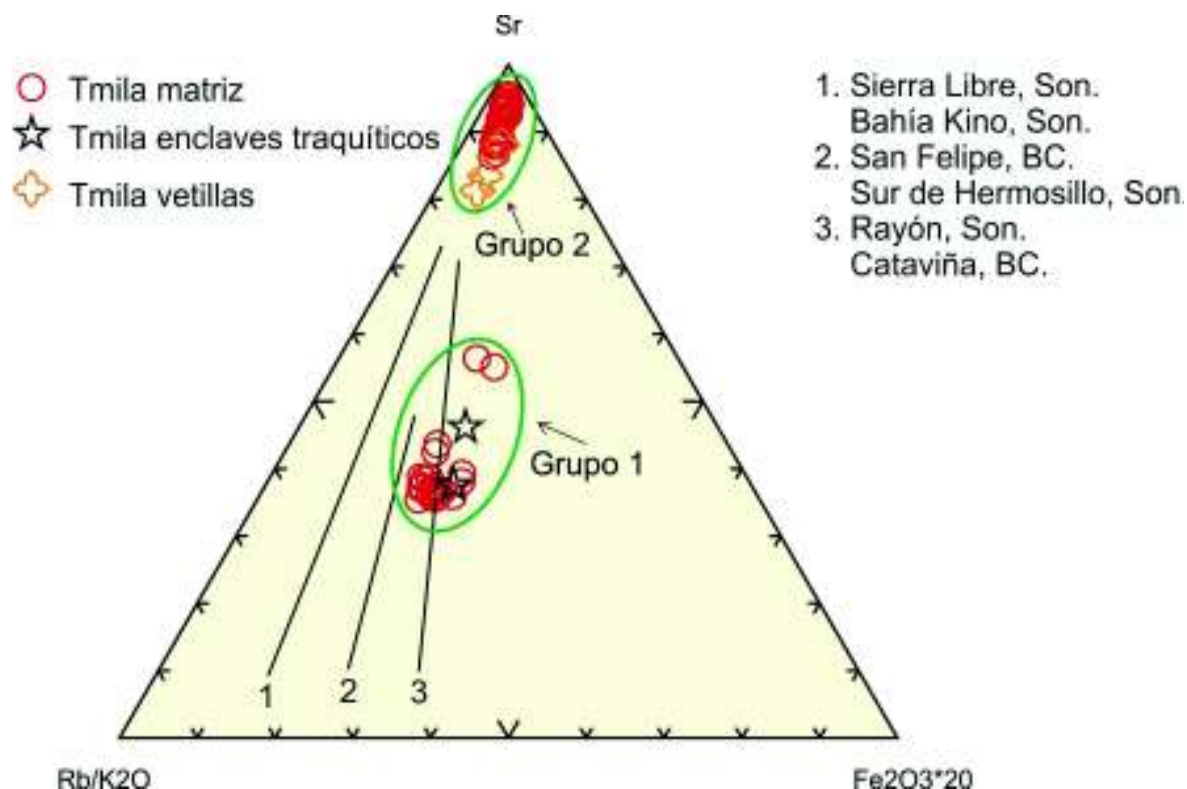


Figura 22. Diagrama ternario Sr-Rb-Fe de Vidal-Solano *et. al.*, (2013) para la Tmila. En este diagrama se observa que la Tmila está dividida en dos grupos donde sólo es posible ubicar al grupo 1 en las localidades de Cataviña (Zona 3) y San Felipe, Baja California (Zona 2). Las líneas 1, 2 y 3 que aparecen en el diagrama corresponden a las distintas localidades donde se ubica la unidad IGH-TSF.

3.3 Geología Estructural

Las estructuras geológicas medidas en el área de estudio corresponden contactos entre unidades litológicas, planos de estratificación y fallas que cortan a las estructuras anteriores. Las mediciones se realizaron utilizando la regla de la mano derecha con una brújula no declinada y posteriormente se hicieron los ajustes de declinación magnética correspondientes a la zona de estudio.

Las estratificaciones de las unidades volcánicas Tmfb, Tmila, Tmfrd y Tmiea presentan rumbos cercanos al Norte y al Sur con inclinaciones variantes entre 25 y 90°. De acuerdo a la regla de la mano derecha (RMD): a) el grupo volcánico más antiguo (Tmfb) muestra un rumbo 325-335° con echados de 26 a 54°, b) la unidad Ignimbrítica Los Algodones (Tmila) muestra rumbos de 355-9° con inclinaciones de 70 a 90°, c) la unidad riódacítica (Tmfrd) presenta rumbos del 329 al 332° con echados de 25 a 27°, d) la unidad ignimbrítica El Aguaje (Tmiea) contiene actitudes con 350-356° en rumbo y 44-46° en echado, e) las inyecciones hipovolcánicas intermedias (Tmda) presentan contactos de actitudes distintas entre la Tmila y la Tmda, en el primer caso muestran rumbos de 7-13° con inclinaciones de 63-72°, sin embargo en el segundo caso los valores son 150-180° con 39-68°, por otro lado los planos de flujo muestran en ambos casos un rumbo del 180-220° y echado de 35-40°, finalmente, f) las inyecciones riolíticas (Tmdr) muestran contactos con rumbo 18-25° y 51-63° de echado mientras que sus planos de flujo tiene rumbos 166-175° y echados de 36-40°.

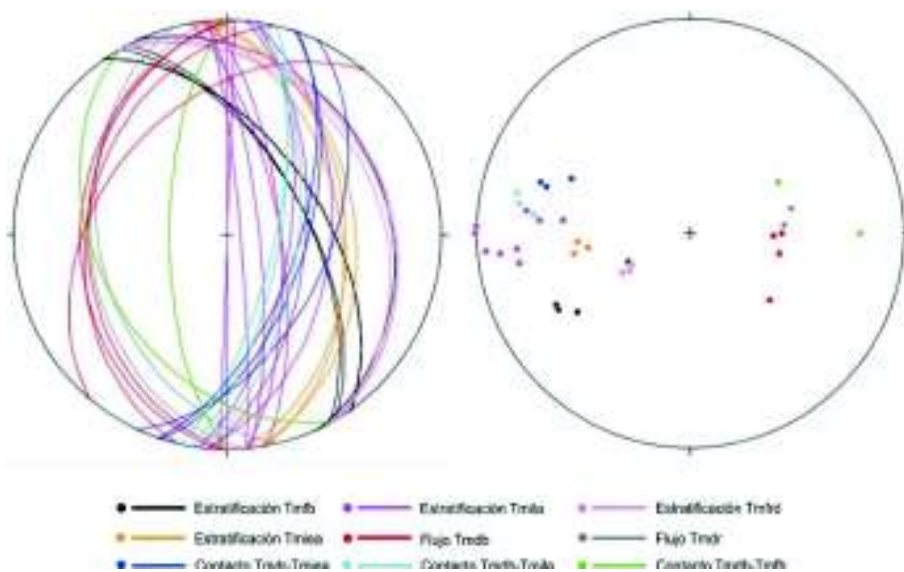


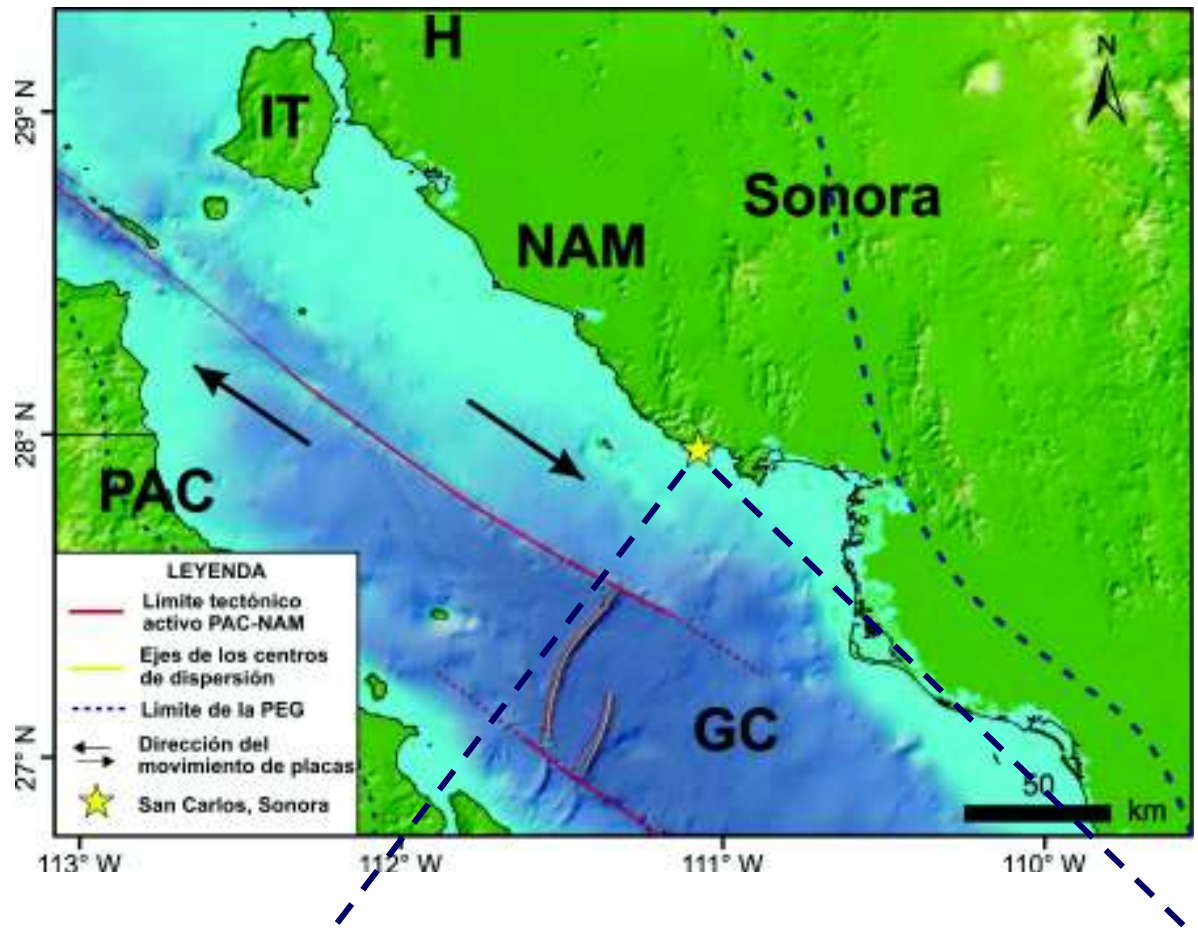
Figura 23. Representación gráfica en red estereográfica de áreas iguales de los planos de estratificación, actitudes de flujo y contactos de las unidades volcánicas de la Sierra Los Algodones (Izquierda), con sus respectivos polos (Derecha).

Las fallas que cortan a las estructuras primarias en la Sierra Los Algodones se midieron en dos zonas, en estas áreas se encuentran aflorando las unidades Kgr-Granodiorita, Tmfb-Flujo basáltico, Tmila-Ignimbrita Los Algodones y Tmda-Dique basáltico.

La zona 1 se caracteriza por la presencia de bloques dislocados, donde se encuentran aflorando y son afectadas las unidades Tmfb, Tmila y Tmda (Figura 25. A). Las fallas medidas en este sitio afectan principalmente a la unidad Tmila y existen estructuras muy interesantes, como lo son fallas lítricas y fallas en cola de caballo (Figura 25. B), que permiten darle una identidad más diversa a la actitud de las fallas que cortan a esta unidad. La orientación preferencial de las estructuras presentes en esta área es NE-SW.

La zona 2 presenta una litología más diversa y se encuentran aflorando las unidades Kgr, Tmfb, Tmila y Tmda. En esta área se encontró que existe una zona de falla de tipo normal entre el cerro Saakaka Kawi y el cerro Los Algodones (Figura 25. C). Se observó que el dique Tmda aprovechó una zona de falla en la Tmfb para emplazarse, las vetillas presentes en los afloramientos muestran estrías laterales y estructuras en forma de cola de caballo y en X (Figura 25. D), que indican que se trata de una falla lateral izquierda que corta a toda la secuencia. La orientación preferencial de las estructuras presentes en esta área está dirigida SE-NW.

A)



B)

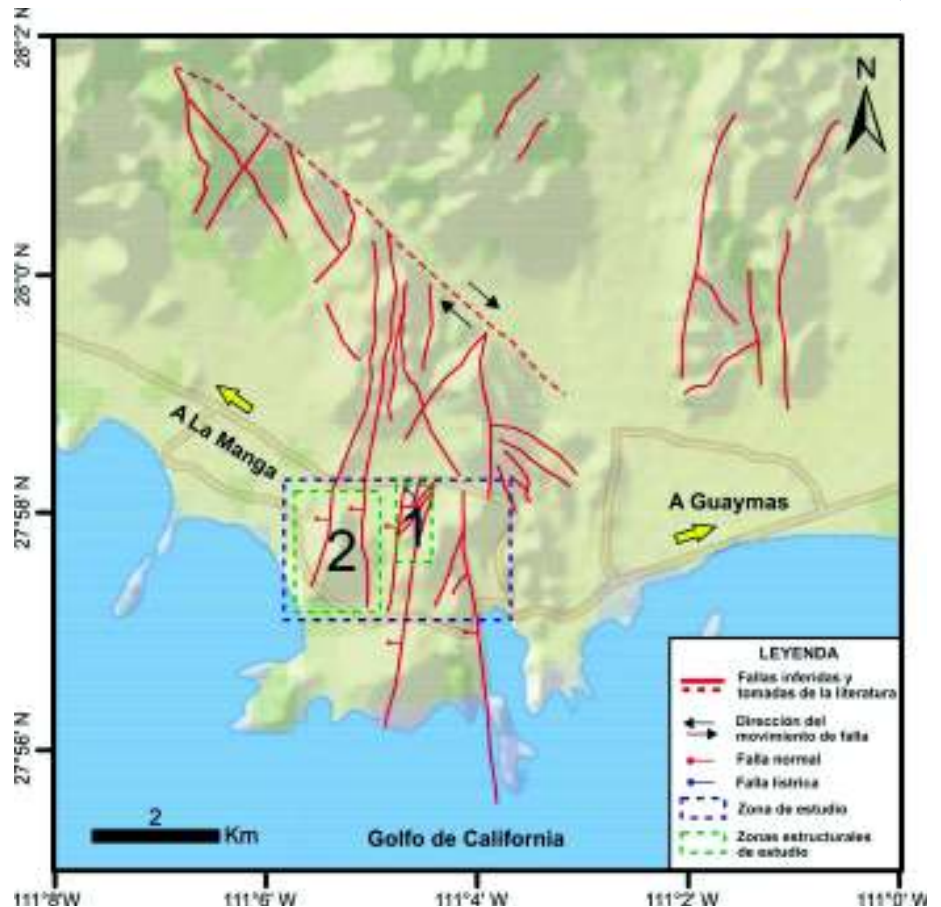


Figura 24. A) Localización tectónica regional del área de estudio. H= Hermosillo; IT= Isla Tiburón; GC= Golfo de California; B) Localización del área de estudio con las principales fallas presentes en la zona. Modificado de Velderrain-Rojas (2014).

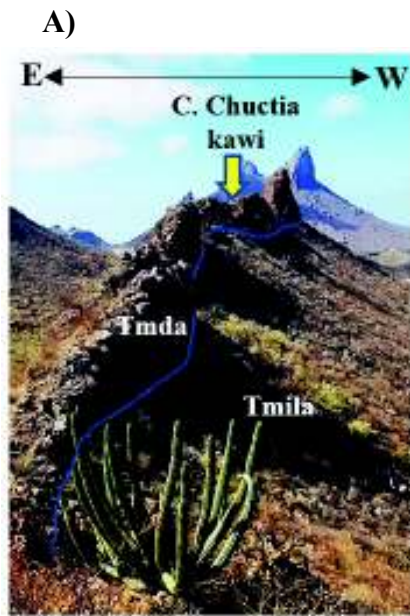


Figura 25. A) Bloques dislocados conformados por las unidades Tmila y Tmda en el cerro Chuctia kawi (zona 1). Al fondo se observa el cerro Tetakawi; B) Fallas listricas en forma de cola de caballo presentes en la unidad Tmila en el cerro Chuctia Kawi; C) Lado Este del cerro Saakaka kawi y cerro Los Algodones. Estos dos cerros conforman la zona 2 del análisis estructural. En medio de ellos se encuentra una importante zona de falla con dirección NW-SE; D) Estructura en X rellena por vetillas presente en la unidad Tmfb en las faldas del cerro Los Algodones.

3.3.1 Fallas medidas en las unidades litológicas

Kgr-Granodiorita

Para esta unidad se tomaron un total de 22 datos los cuales presentan una orientación preferencial SE-NW correspondiente a un sistema de fallas conjugado con esta dirección. Existe un sistema de fallas conjugado menor con dirección NE-SW (Figura 26).

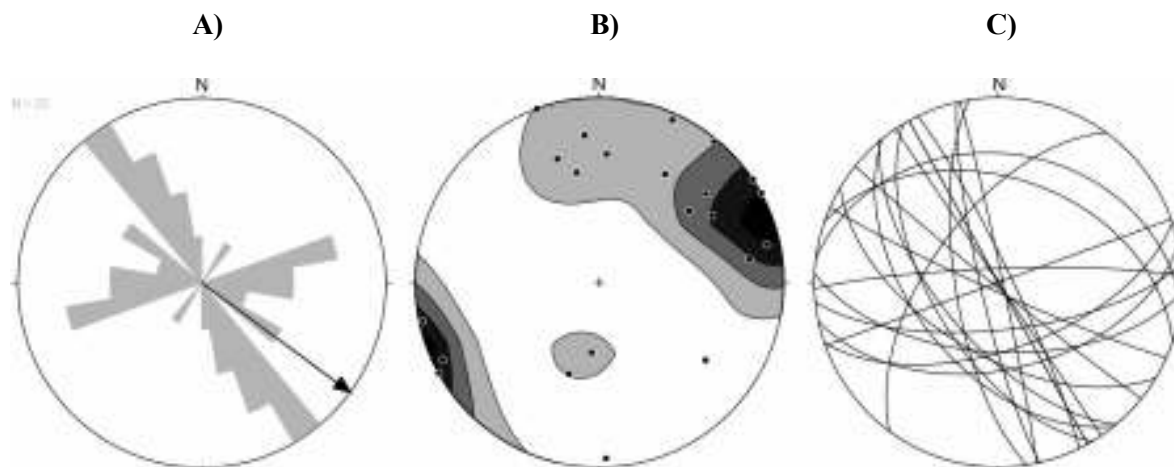


Figura 26. Representación en distintos diagramas los datos estructurales de la unidad kgr-granodiorita: A) Diagrama de rosetas de los rumbos de las fallas; B) Mapa de contornos de los polos de los planos de falla; y C) Representación gráfica de los planos de falla. Las fallas que cortan a esta unidad tienen una orientación preferencial SE-NW. N = 22

Tmfb-Flujo basáltico

Para esta unidad se tomaron un total de 23 datos los cuales presentan una orientación preferencial NW-SE, correspondiente a un grupo de fallas conjugadas con esta dirección (Figura 27).

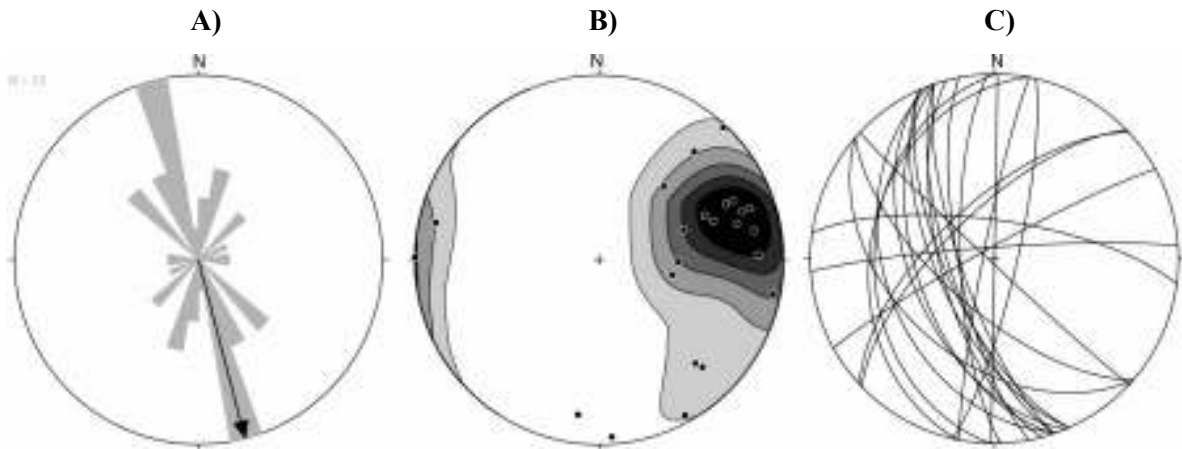


Figura 27. Representación en distintos diagramas los datos estructurales de la unidad Tmfb-Flujo basáltico. A) Diagrama de rosetas de los rumbos de las fallas; B) Mapa de contornos de los polos de los planos de falla; C) Representación gráfica de los planos de falla. Las fallas que cortan a esta unidad tienen una orientación preferencial SE-NW. N = 23

Tmila-Ignimbrita Los Algodones

En esta unidad se encontraron fallas listricas de movimiento lateral con estrías casi horizontales de 71° . Se tomaron un total de 58 datos los cuales evidencian la existencia de una familia principal de fallas conjugadas con dirección NE-SW (Figura 28).

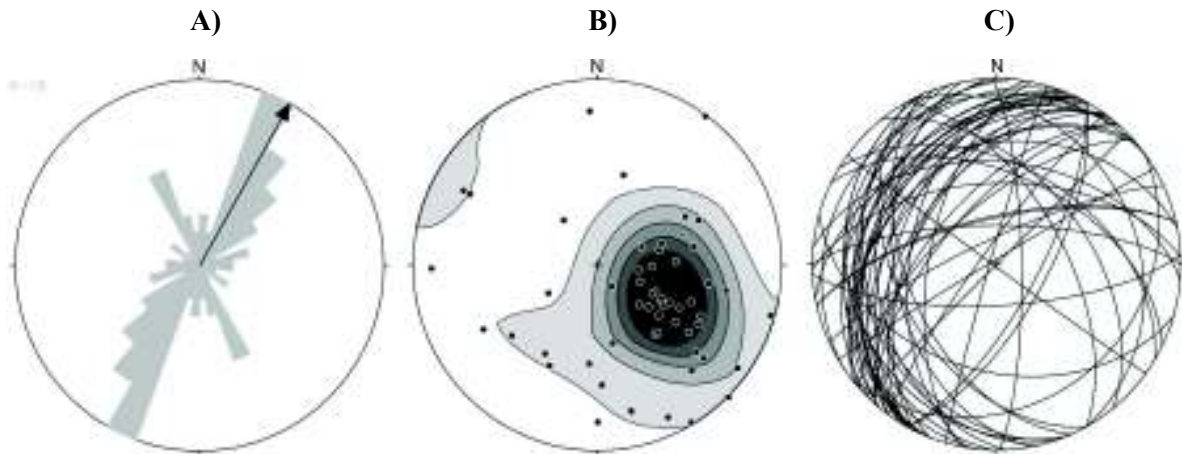


Figura 28. Representación en distintos diagramas los datos estructurales de la unidad Tmila: A) Diagrama de rosetas de los rumbos de las fallas; B) Mapa de contornos de los polos de los planos de falla; C) Representación gráfica de los planos de falla. Las fallas que cortan a esta unidad tienen una orientación preferencial NE-SW. N = 58.

Tmda-Dique andesítico

Para esta unidad se tomaron un total de 28 datos y las tendencias de direcciones son diversas. Existe una migración de datos que van del NW al SE correspondientes a varios grupos de familias de fallas conjugadas (Figura 29).

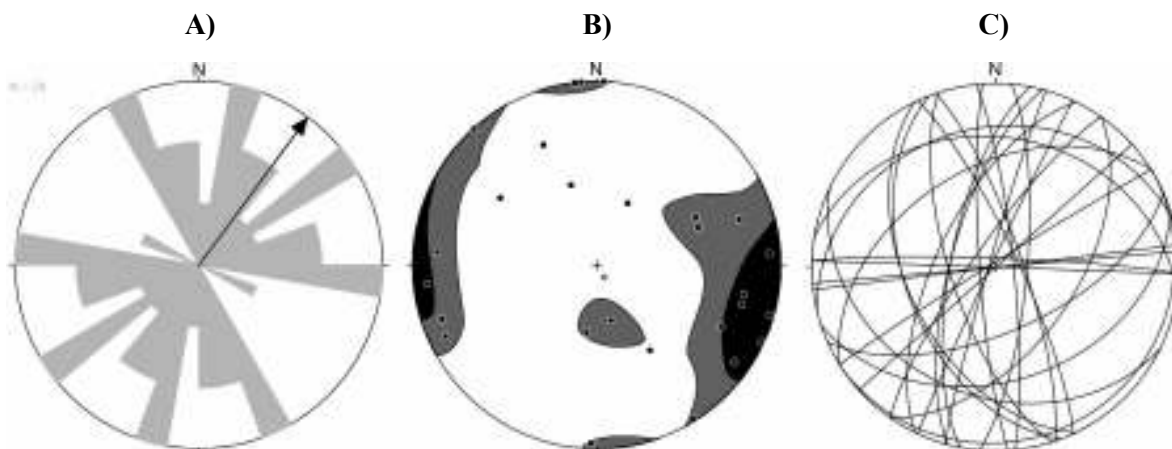


Figura 29. Representación en distintos diagramas los datos estructurales de la unidad Tmda-Dique andesítico: A) Diagrama de rosetas de los rumbos de las fallas; B) Mapa de contornos de los polos de los planos de falla; C) Representación gráfica de los planos de falla. Las fallas que cortan a esta unidad tienen orientaciones muy diversas. N = 28

3.3.2 Análisis cinemático del área

Para el análisis cinemático se tomaron en cuenta un total de 131 datos estructurales (Ver Anexos), los cuales presentaban como indicador estrías de falla. Para identificar el número de familias que dominan en el área, se realizó un histograma de frecuencias y en este diagrama se graficó la distribución de los datos por medio del cálculo de la función de densidad de Kernel (Zucchini, 2003; Vega-Granillo et al., 2015), así como la curva del polígono de frecuencias acumuladas. Con base en estos cálculos se determinó que: a) la función de densidad de kernel separa a las fallas en dos familias, donde el límite de la familia 1 va de 0° a 115° y la segunda de 115° a 180° con sus respectivos conjugados; por otro lado, b) el polígono de frecuencias separa a las fallas en 3 familias: 1) Con límites que van del 0° a 70° ; 2) 70° a 110° y 3) 110° a 180° respectivamente (Figura 30).

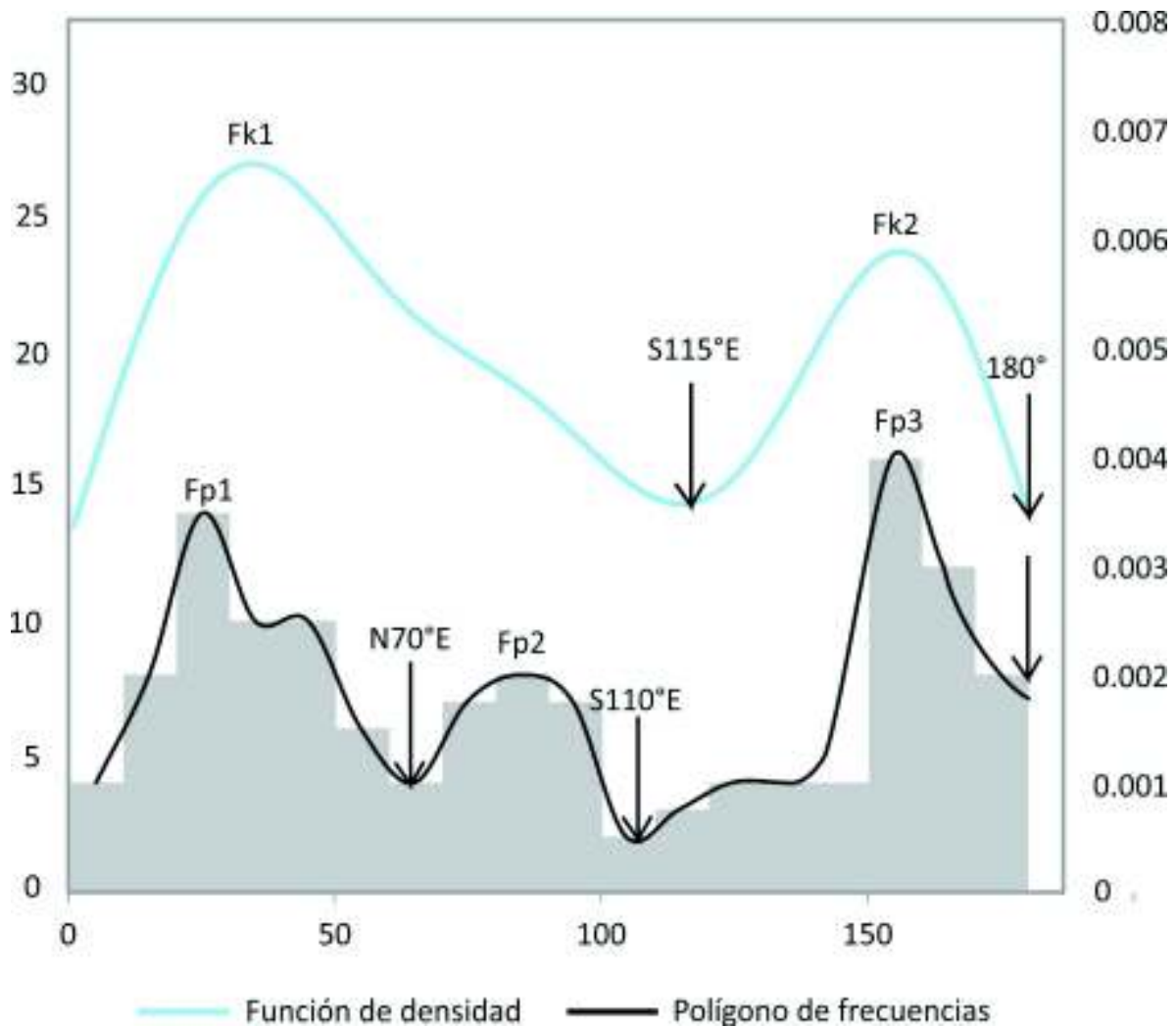


Figura 30. Histograma de frecuencias de los planos de falla. La línea azul corresponde a la función de estimación de densidad de Kernel (Zucchini, 2003) y la negra al polígono de frecuencias. Las flechas indican los límites entre cada familia. Número de fallas= 131.

a) Análisis cinemático según la función de densidad de Kernel

Bajo esta función, la familia 1 (Fk1, figura 31), corresponde a un grupo compuesto mayormente por fallas laterales (Figura 32) donde el esfuerzo tensional principal que generó esta deformación es casi vertical y el esfuerzo compresivo está dirigido hacia el NE. La segunda familia (Fk2, figura 33) también corresponde a un grupo de fallas laterales (Figura 34), donde el esfuerzo tensional es casi vertical y el esfuerzo compresivo está dirigido hacia el SW.

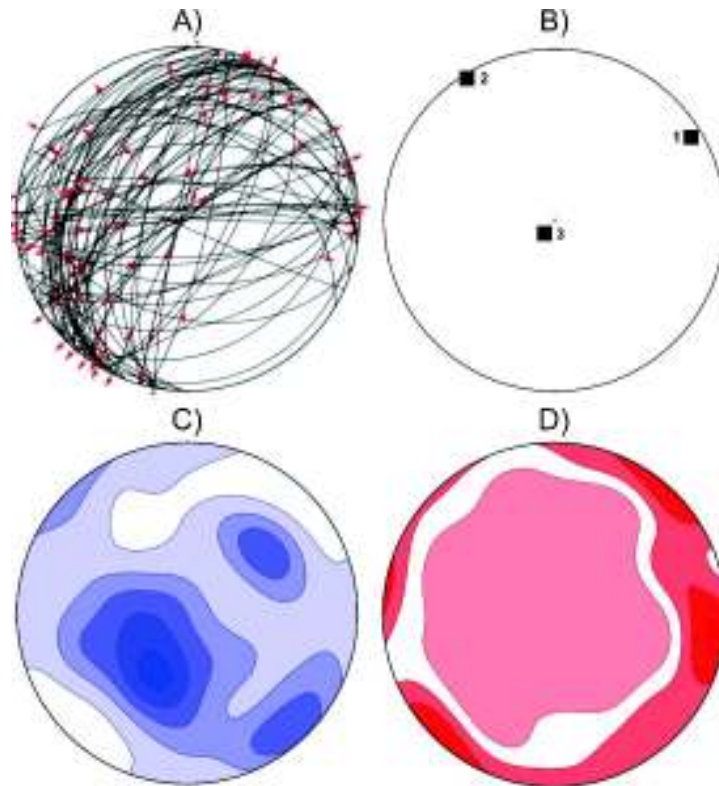


Figura 31. Resultados de los datos de falla de la familia 1 (Fk1) procesados con el software Faultkin: A) Planos de falla; B) Esfuerzos de falla calculados con la distribución estática de Bringham; C) Mapa de contornos de Kamb para el esfuerzo tensional; y D) Mapa de contornos de Kamb para el esfuerzo compresivo. Valores (Trend y plunge) de sigma 1= 58/9; 2= 328/2; 3= 226/81

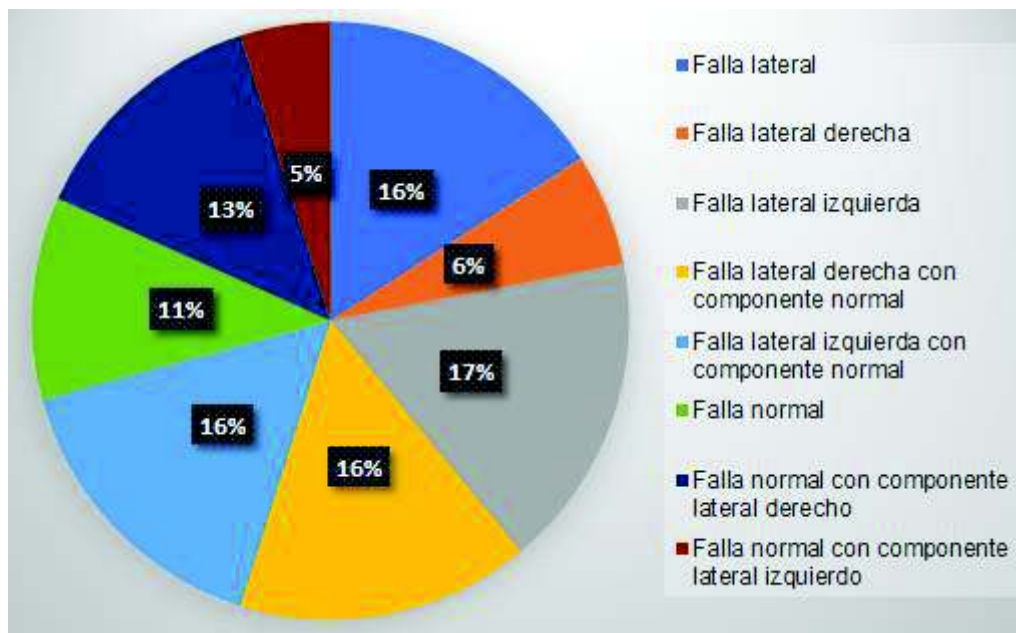


Figura 32. Porcentajes y clasificación de los tipos de fallas de la Familia Fk1 según Páez-Juárez (2010) y Pérez-Aguilar (2017).

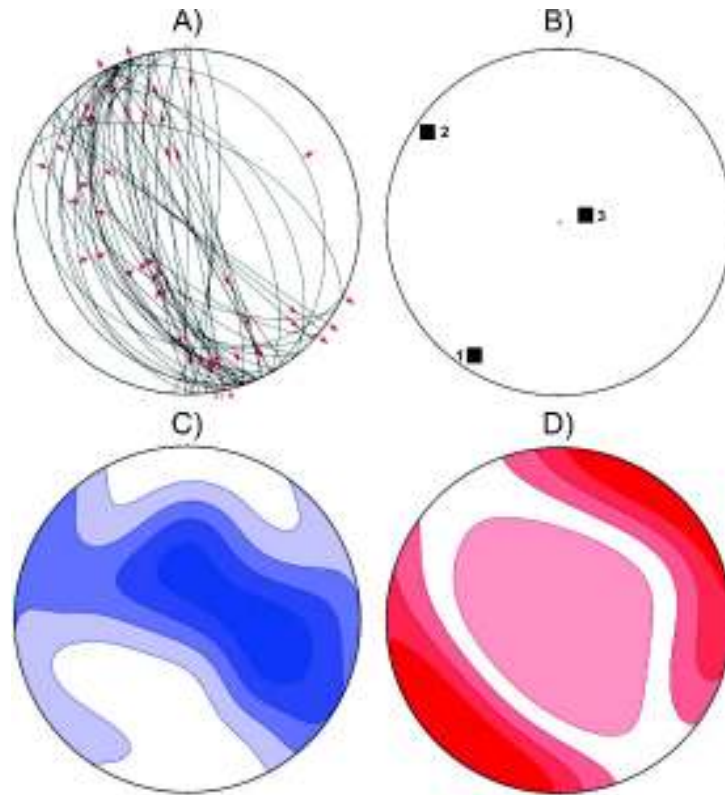


Figura 33. Resultados de los datos de falla de la familia 2 (Fk2) procesados con el software Faultkin A) Planos de falla; B) Esfuerzos de falla calculados con la distribución estática de Bringham; C) Mapa de contornos de Kamb para el esfuerzo tensional; y D) Mapa de contornos de Kamb para el esfuerzo compresivo. Valores (Trend y plunge) de sigma 1= 212/9; 2= 304/7; 3= 76/78.

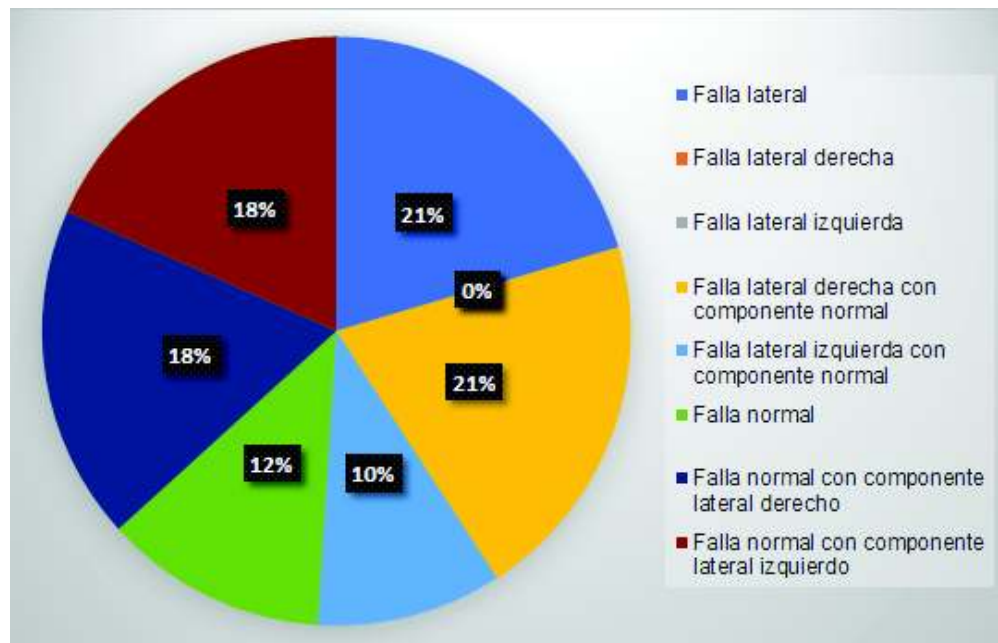


Figura 34. Porcentajes y clasificación de los tipos de fallas de la Familia Fk2 según Páez-Juárez (2010) y Pérez-Aguilar (2017).

b) Análisis cinemático según el polígono de frecuencias

Bajo esta distribución, la familia 1 (Fp1, figura 35), corresponde a un grupo de fallas principalmente laterales y normales derechas (Figura 36) donde el esfuerzo tensional principal que generó esta deformación está dirigido hacia el SW casi W y el esfuerzo compresivo hacia el SE casi S. La segunda familia (Fp2, figura 37), también corresponde a un grupo de fallas mayormente laterales con sentido de movimiento sinistral (Figura 38), donde el esfuerzo tensional está dirigido hacia el NW y el esfuerzo compresivo hacia el NE. Por último, la tercera familia (Fp3, figura 39), corresponde a fallas laterales dextrales (Figura 40), que presenta esfuerzos tensionales verticales y compresivos dirigidos hacia el SW.

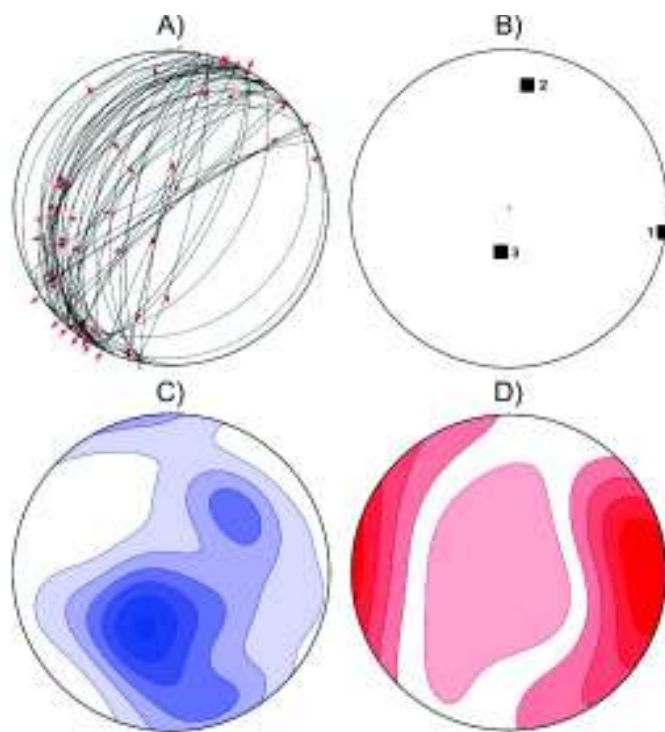


Figura 35. Resultados de los datos de falla de la familia 1 (Fp1) procesados con el software Faultkin: A) Planos de falla. B) Esfuerzos de falla calculados con la distribución estática de Bringham; C) Mapa de contornos de Kamb para el esfuerzo tensional; D) Mapa de contornos de Kamb para el esfuerzo compresivo. Valores (Trend y plunge) de sigma 1= 98/1; 8/22; 3= 192/68.

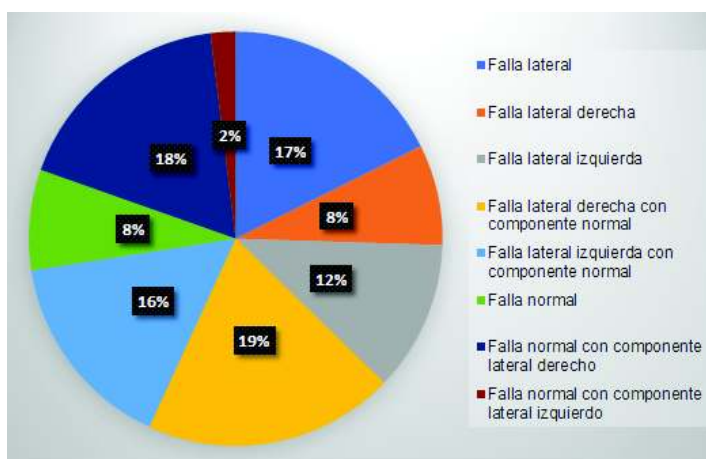


Figura 36. Porcentajes y clasificación de los tipos de fallas de la Familia Fp1 según Páez-Juárez (2010) y Pérez-Aguilar (2017).

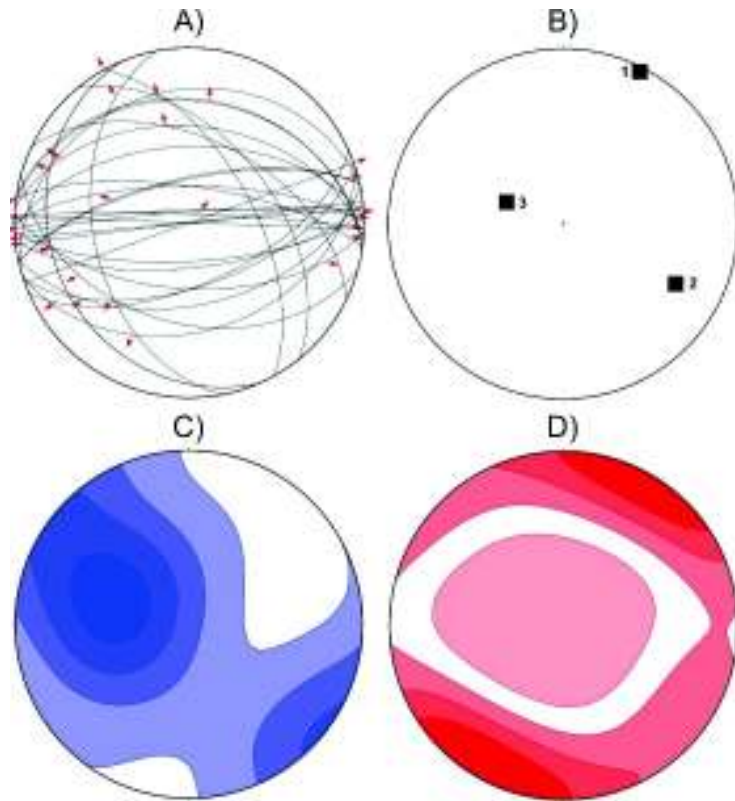


Figura 37. Resultados de los datos de falla de la familia 2 (Fp2) procesados con el software Faultkin: A) Planos de falla; B) Esfuerzos de falla calculados con la distribución estática de Bringham; C) Mapa de contornos de Kamb para el esfuerzo tensional; D) Mapa de contornos de Kamb para el esfuerzo compresivo. Valores (Trend y plunge) de sigma 1= 27/3; 2= 118/28; 3= 292/61.

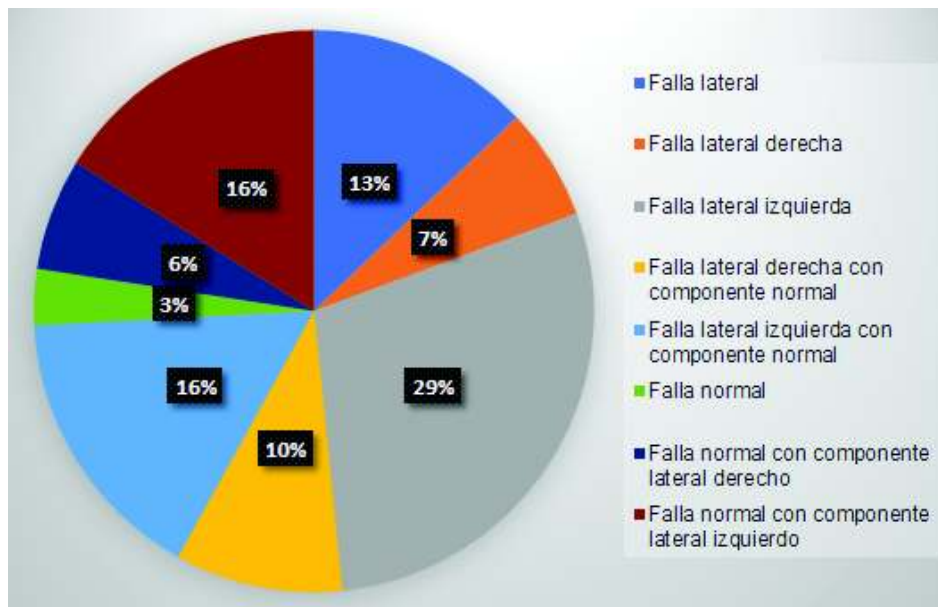


Figura 38. Porcentajes y clasificación de los tipos de fallas de la Familia Fp2 según Páez-Juárez (2010) y Pérez-Aguilar (2017).

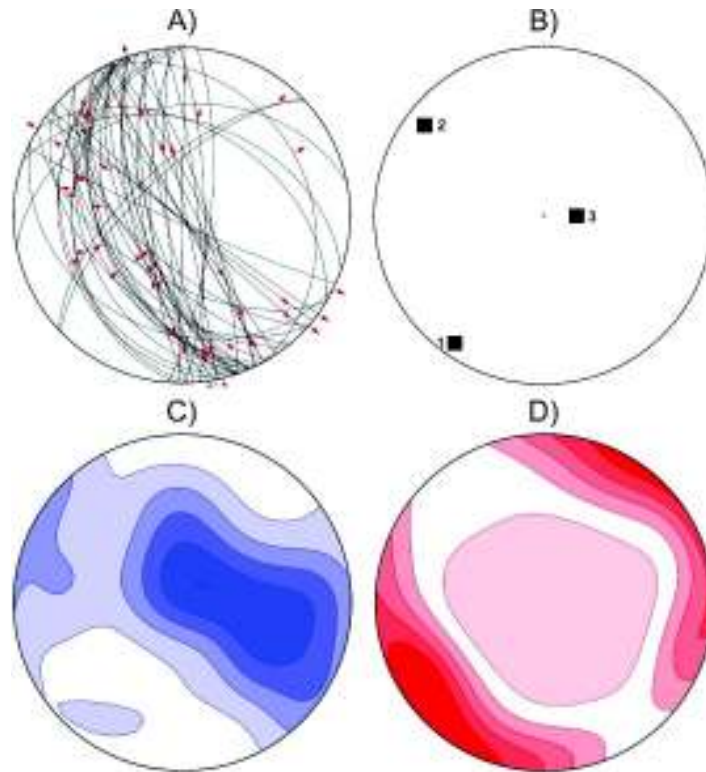


Figura 39. Resultados de los datos de falla de la familia 3 (Fp3) procesados con el software Faultkin: A) Planos de falla. B) Esfuerzos de falla calculados con la distribución estática de Bringham; C) Mapa de contornos de Kamb para el esfuerzo tensional; D) Mapa de contornos de Kamb para el esfuerzo compresivo. Valores (Trend y plunge) de sigma 1= 215/9; 2= 307/12; 3= 89/74.

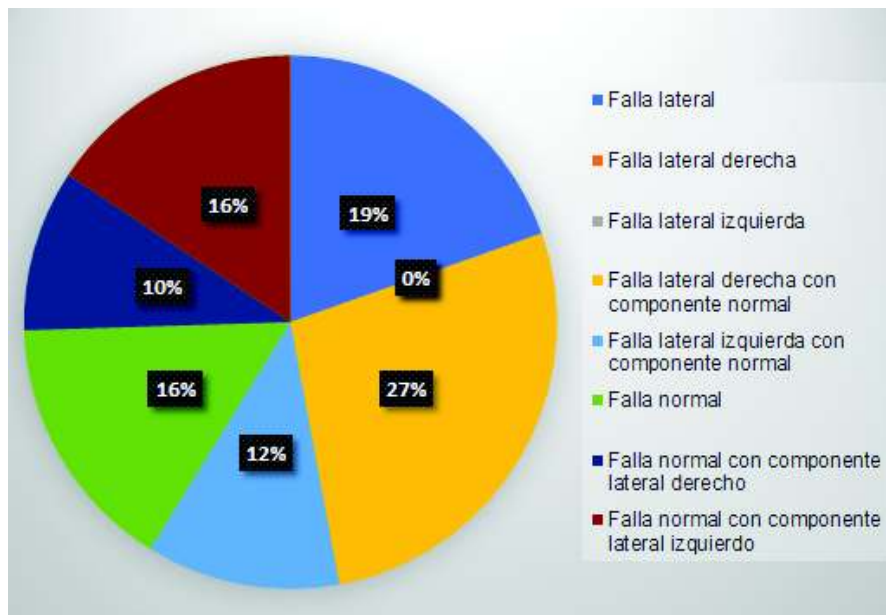


Figura 40. Porcentajes y clasificación de los tipos de fallas de la Familia Fp3 según Páez-Juárez (2010) y Pérez-Aguilar (2017).

3.4 Análisis paleomagnético de algunas unidades volcánicas

Para el análisis paleomagnético se efectuó una desmagnetización por campos alternos a baja temperatura a cuatro unidades volcánicas distintas que corresponden a la Tmila-Ignimbrita Los Algodones, al Tmda-Dique andesítico, al Tmdr-Dique riolítico y a la Tmiea-Ignimbrita El Aguaje.

El muestreo de los núcleos se realizó en cinco sitios distintos (Figura 2), dos corresponden a la extracción de dos muestras orientadas para la unidad Tmila-Ignimbrita Los Algodones, las cuales se reorientaron en laboratorio y se procedió a la perforación. Para las unidades Tmda-Dique andesítico, Tmdr-Dique riolítico y Tmiea-Ignimbrita-El Aguaje se perforó *in situ*.

La desmagnetización de estas muestras se realizó en 5 pasos, que van desde los 200 nano Teslas (nT) hasta los 800 nT. La proyección hacia el origen de la remanencia natural característica (NRM) fue calculada, por el software Paleomag v 3.1b3 (C.H. Jones, 2002), obteniendo lo siguiente:

a) Tmila-Ignimbrita Los Algodones

Los resultados obtenidos presentan comportamientos desiguales entre sí, a pesar de corresponder a la misma unidad. Para el sitio 1, se perforaron 13 núcleos y se analizaron 32 especímenes. El sitio 1 muestra una baja inclinación y una polaridad inversa, con una declinación e inclinación media de 231.2/24.8 (Figura 41). En el sitio 2, se extrajeron 10 núcleos y se analizaron 40 especímenes. Para el sitio 2, esta misma unidad presenta una declinación baja pero con una inclinación muy alta, con valores medios de 207.3/-55.5, respectivamente (Figura 42). La posible razón de esta diferencia en el vector característico de esta unidad se discutirá más adelante, en el capítulo 4.

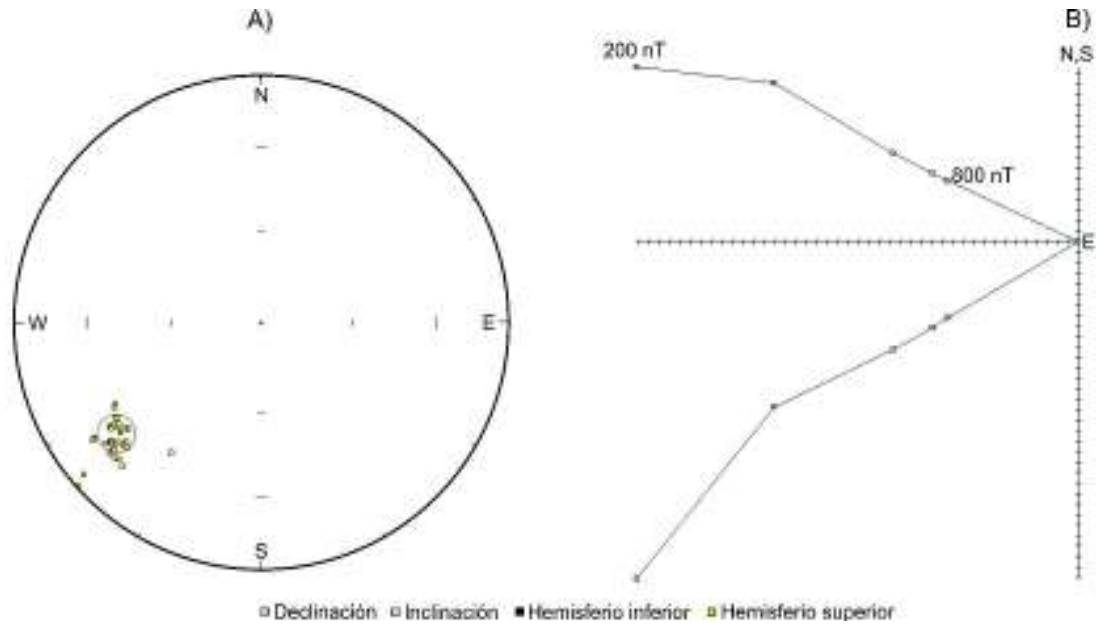


Figura 41. A) Diagrama de proyección de áreas iguales que muestra el campo promedio (círculo rojo); B) Diagrama de Zijderveld donde se tiene una declinación e inclinación promedio de 239/-23 para el sitio 1. Número de especímenes= 32.

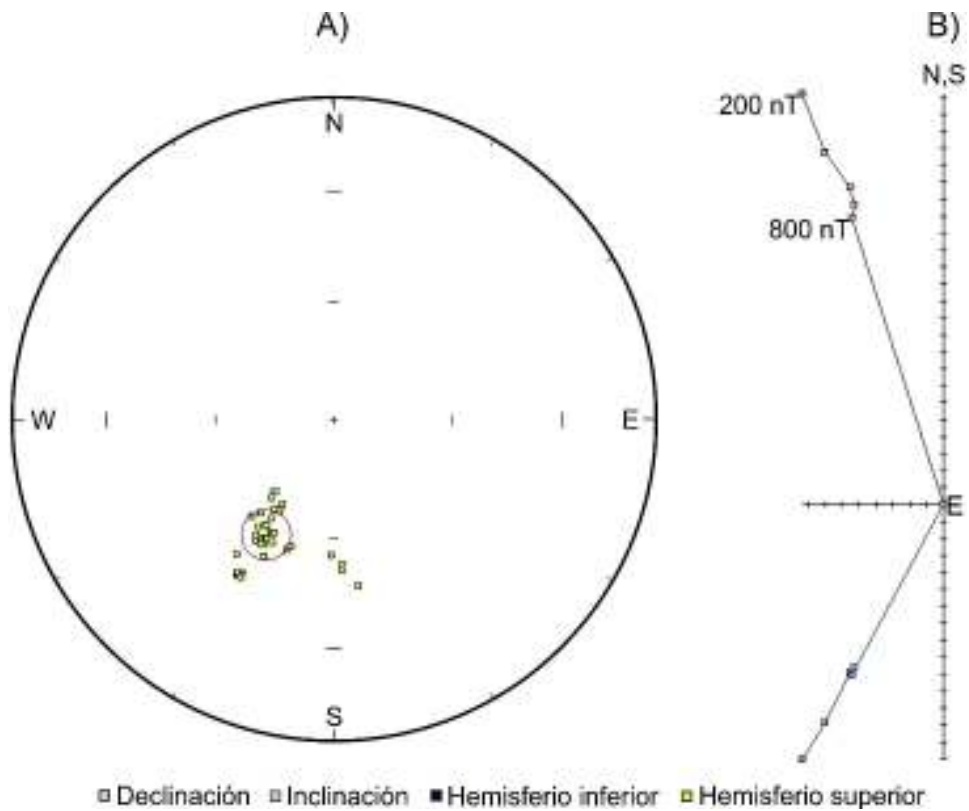


Figura 42. A) Diagrama de proyección de áreas iguales que muestra el campo promedio (círculo rojo); B) Diagrama de Zijderveld donde se tiene una declinación e inclinación promedio de 208.6/ -56.1 para el sitio 2. Número de especímenes= 40

b) Tmda-Dique andesítico

Para esta unidad sólo se perforó en un sitio, se extrajeron 5 núcleos y se analizaron 10 especímenes. Los resultados del análisis paleomagnético para esta unidad arrojaron datos que muestran un comportamiento estable, de los 10 especímenes analizados, nueve de ellos mostraron un vector característico muy similar y bien definido, donde sólo se observa una componente magnética primaria. Solamente uno de los especímenes (LA 41.1) mostró un vector característico diferente al resto, donde en el vector de inclinación muestra que existen por lo menos dos componentes secundarias, que no permiten conocer al vector característico. (Figura 43)

Con base en lo anterior, esta muestra presenta una declinación media de 113.3 y una inclinación media de -16.9, con polaridad normal.

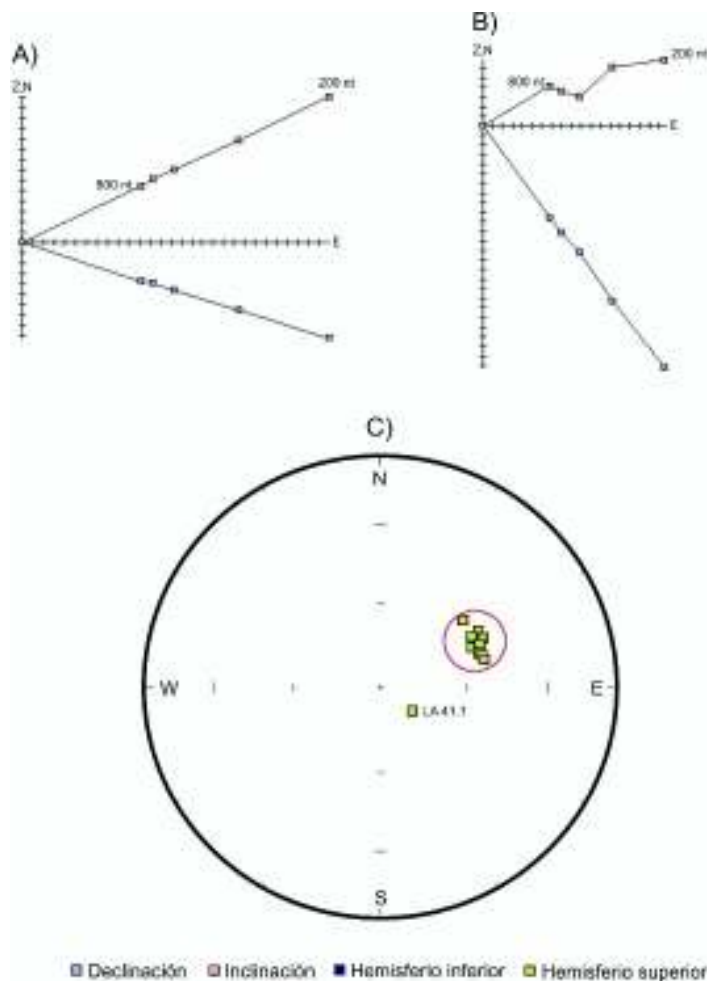


Figura 43. A) Diagrama de Zijderveld representativo de la unidad Tmda-Dique andesítico con una declinación e inclinación de 106.7/-16.7 respectivamente; B) Diagrama de Zijderveld de la muestra LA 41.1 con una declinación e inclinación de 143.9/-13.3 respectivamente; y C) Diagrama de proyección de áreas iguales donde se representan todos los especímenes de esta unidad. El círculo en rojo representa el campo promedio para esta unidad. Número de especímenes= 10

c) Tmdr-Dique riolítico

La naturaleza perlítica de este dique provoca que su perforación sea complicada, por lo tanto, sólo se pudo perforar en un sitio y se analizaron tres especímenes, pertenecientes a tres núcleos distintos (Ver anexos). Los resultados del análisis paleomagnético no arrojaron datos muy precisos. Cada uno de los especímenes muestra resultados distintos. Los especímenes LA 24.1 y LA 27.1 (Figura 44. A-B) presentan altas declinaciones e inclinaciones, y una polaridad normal, con valores de declinación e inclinación de 164.8/-19.1 y 175.2/-41.6 respectivamente. La inclinación y la declinación del espécimen 27.1 son más altas que las correspondientes del 24.1. Con lo que respecta al espécimen 29.1 (Figura 44. C), este presenta valores de declinación e inclinación de 330/49.3 y polaridad inversa.

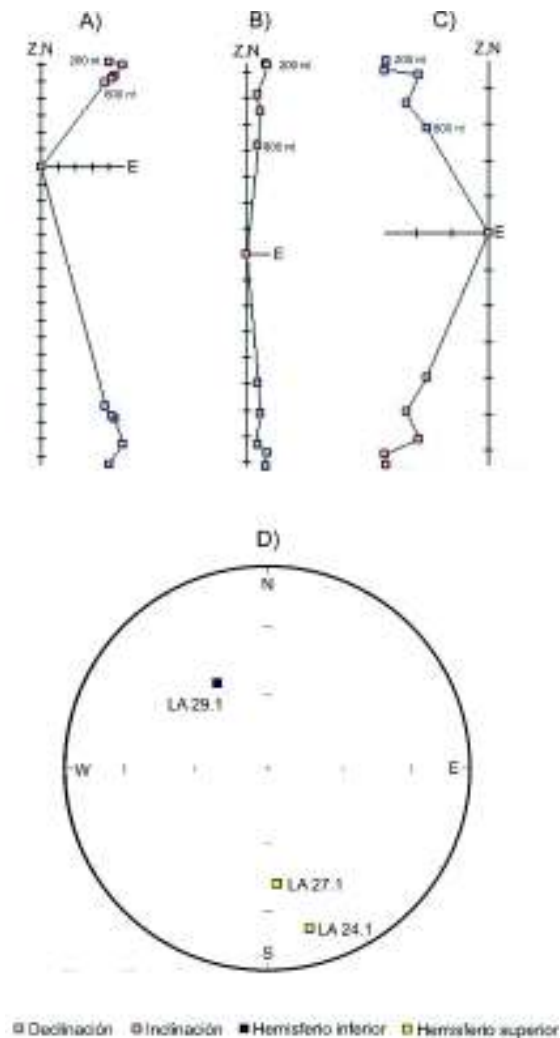


Figura 44. A), B), C) Diagramas de Zijderveld de la unidad Tmdr-Dique Riolítico: A) Espécimen LA 24.1; B) Espécimen LA 27.1; C) Espécimen 29.1; y D) Diagrama de proyección de áreas iguales donde se presenta cada uno de los especímenes de esta unidad. Número de especímenes= 3

d) Tmíca-Ignimbríta El Aguaje

Para esta unidad, se perforó en un sitio un total de seis núcleos y se analizaron seis especímenes. Los resultados del análisis paleomagnético para esta unidad no arrojaron datos muy precisos ya que cada uno de los especímenes arrojaron una información distinta para esta unidad (Figura 44). Los especímenes LA 34.2 y LA 35.1 (Figura 45 B y D) presentan altas declinaciones e inclinaciones, con valores de 169.8/56.2 y 158.3/38.2 respectivamente y con polaridad inversa, pero los vectores característicos correspondientes a cada espécimen resultan ser muy diferentes entre sí. Los especímenes LA 34.1, LA 34.3, LA 35.2 y LA 36.1 (Figura 45 A, C, E, F) presentan altas declinaciones e inclinaciones, con valores de 144.9/-37.5, 172.9/-23.5, 35.1/-57.2 y 79.3/-25.6, respectivamente, todos con una polaridad normal, pero los vectores característicos correspondientes a cada espécimen resultan ser muy diferentes entre sí.

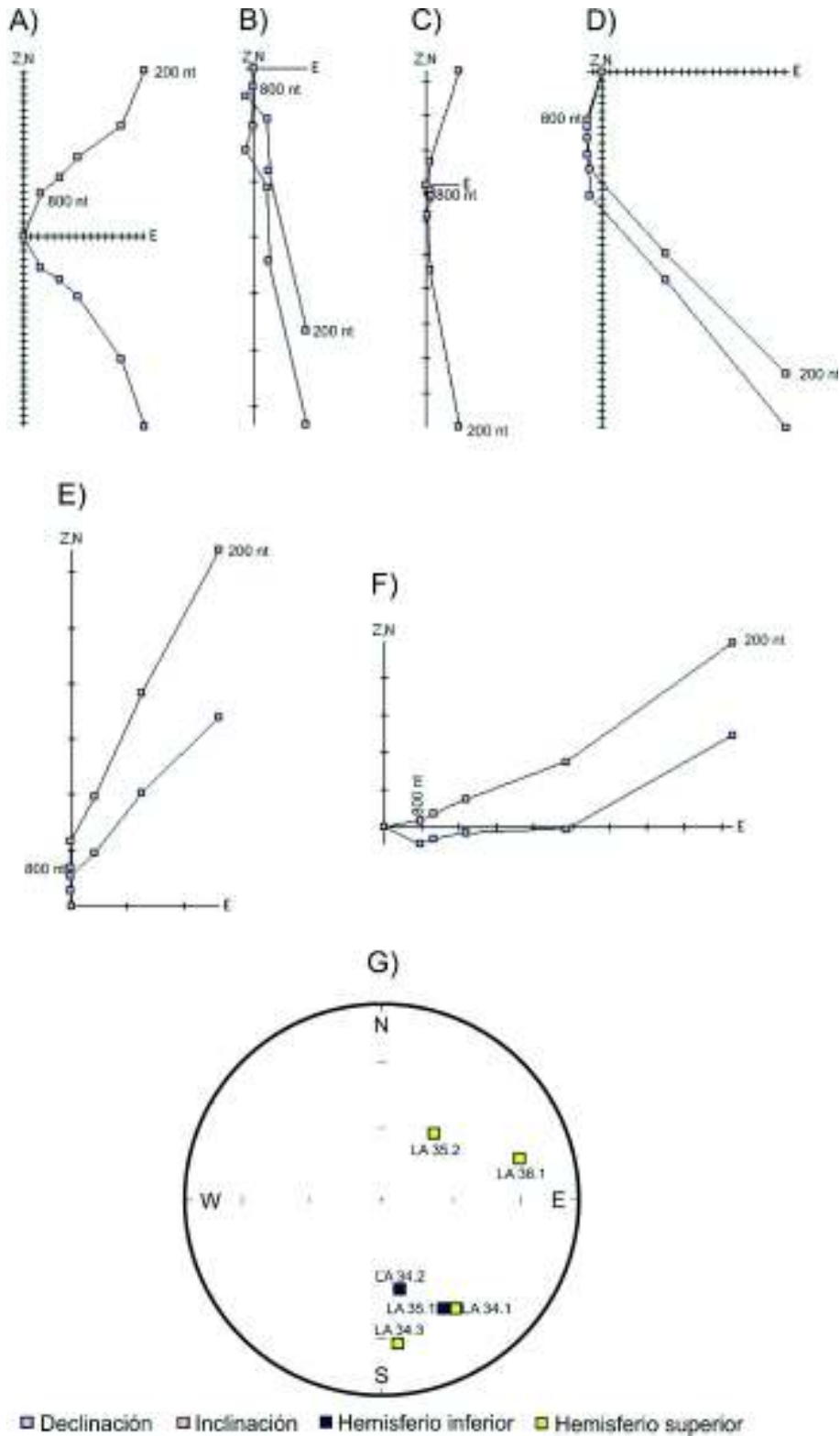


Figura 45. Diagrama de Zijderveld de la unidad Tmiea- Ignimbrita El Aguaje: A) Espécimen 34.1; B) Espécimen LA 34.2; C) Espécimen 34.3; D) Espécimen 35.1; E) Espécimen 35.2; F) Espécimen 36.1; y G) Diagrama de proyección de áreas iguales donde se presenta el promedio para cada uno de los especímenes de esta unidad. Número de especímenes= 6

4 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

4.1 Discusiones

Para este apartado se responderán las preguntas planteadas en la introducción de este trabajo.

1. ¿Existe una relación de las unidades volcánicas estudiadas con respecto a otras reportadas en el Proto-Golfo de California?

Para responder esta interrogante se compararon los resultados de los análisis petrográficos y paleomagnéticos de esta investigación con el mismo tipo de estudios reportados anteriormente para unidades volcánicas de edad Mioceno en áreas aledañas a la zona de estudio.

a) Tmfb-Flujo basáltico

Gómez-Valencia (2014) reporta una serie de coladas máficas a intermedias muy similares a la unidad Tmfb-Flujo basáltico aquí descrito. Estas coladas están denominadas informalmente como Grupo San Carlos, descritas anteriormente por Vega-Granillo *et. al.* (2004) y Till *et. al.* (2009) y afloran en las regiones de San Carlos y Guaymas, Sonora. El Grupo San Carlos fue definido como lavas grises muy porfídicas con fenocristales rojizos de ferromagnesianos oxidados (principalmente olivino iddingsitizado). Petrográficamente fue descrita como una andesita porfídica de fenocristales de Pl>Opx>Ol>OxFe-Ti, embebidos en una matriz vítrea a microcristalina de Pl>Opx>Ol>OxFe-Ti. Los cristales de olivino en algunos casos se presentan como pseudomorfos de óxido de hierro. Estas descripciones son coherentes con lo que en este trabajo se nombra informalmente como Tmfb-Flujo basáltico, asociado a un producto de la subducción de la placa Pacífico debajo de la placa Norteamericana, y está descrito petrográficamente como un basalto porfídico de olivino iddingsitizado con matriz ofítica afieltrada de plagioclasa y clinopiroxeno con oxidación (Figura 10 E).

b) Tmda-Dique andesítico

En el área de estudio de este trabajo se encontraron numerosos diques hipovolcánicos de composición máfica-intermedia nombrados informalmente como unidad Tmda-Dique andesítico. Estos pulsos magmáticos por sus características petrográficas, sus relaciones de corte y su ocurrencia en campo podrían correlacionarse con la Formación Guaymas Inferior (FGI), que reporta Velderrain-Rojas (2016) y que a su vez correlaciona a esta unidad con lo reportado por Till *et al.* (2005) en San Carlos y Mora-Alvarez (1992) en la Sierra Santa Úrsula. Velderrain-Rojas (2016) dividió a la FGI en dos unidades: a) Miembro Volcánico Traquiandecítico (MVT) y b) Miembro Magmático Intermedio (MVI). Esta formación corresponde a magmas de composiciones intermedias dominadas por fenocristales de plagioclasa, piroxeno y óxidos de Hierro-Titanio. El MVI ocurre en los cerros Carricito y El Potrerito del Puerto de Guaymas. Petrográficamente además de los fenocristales antes mencionados, la matriz es microcristalina y las plagioclasas presentan un intercrecimiento que forma una textura denominada como *Turkey Track*, también descrita por Velderrain-Rojas, (2016). Sin embargo, *Velderrain-Rojas (2016)* reporta al MVI de la FGI como derrames de lavas y no como intrusiones, como es el caso de Tmda.

c) Tmdr-Dique riolítico

Velderrain-Rojas (2014) en la Sierra El Aguaje reporta una serie de diques hipovolcánicos nombrados Formación Volcánica El Parral (DHFP). Estos pulsos magmáticos corresponden a un extenso enjambre de diques, que intrusión al basamento cristalino laramídico, aflorando de forma aislada gracias a la fuerte distensión y denudación del terreno en el desemboque del Arroyo Los Anegados en el Golfo de California. El 80% de los diques de DHFP son riolíticos y son de color crema a rosa con texturas sacaroides de grano fino a medio, porfídicos de cuarzo y feldespato alcalino. El resto de los diques son composición intermedia a máfica, muestran un color grisáceo en campo y son ligeramente porfídicos. Los diques hipovolcánicos de composición riolítica y textura perlítica nombrados informalmente como unidad Tmdr-Dique riolítico en el presente trabajo (Figura 18 B), por sus características petrográficas, sus relaciones de corte y su ocurrencia en campo podrían correlacionarse con la Formación Volcánica El Parral (DHFP).

d) Tmfrd-Flujo riódacítico

Las lavas de la unidad Tmfrd-Flujo riódacítico por sus características petrográficas pueden correlacionarse con una serie de depósitos volcánicos que reporta Velderrain-Rojas (2016) como Grupo Guaymas Superior (FGS). La FGS se compone de un magmatismo de composición félsica, que varía de traquitas-traquidacitas, dacitas y riolitas. Esta formación está dividida en dos miembros denominados: a) Miembro Volcánico Félsico (MVF), que corresponde a flujos de lava y; b) Miembro Toba Soldada El Vigía. El MVF corresponde a coladas félsicas con una textura porfídica a glomeroporfídica de feldespatos alcalinos, plagioclasa, clinopiroxeno y óxidos de Hierro-Titanio. La matriz varía de afanítica fluidal a vítrea con microlitos de FA. La Tmfrd-Flujo riódacítico (Figura 16 B), está clasificada como una andesita-dacita porfídica de plagioclasa, feldespatos alcalinos, clinopiroxeno y óxidos con matriz ofítica afieltrada de plagioclasa y oxidación, que bien podrían correlacionarse con el MVF de la FGS que reporta Velderrain-Rojas (2016).

2. ¿Existe una correlación entre los depósitos ignimbríticos presentes en la cobertura volcánica del área de estudio con unidades similares reportadas en Baja California?

Para poder responder esta interrogante se hizo uso de los resultados arrojados por el análisis petrográfico, geoquímico y paleomagnético efectuado al volcanismo piroclástico félsico, nombrado en este trabajo como Tmila-Ignimbrita Los Algodones.

a) Correlación petrográfica

En este trabajo se reportan dos depósitos piroclásticos félsicos, donde uno de ellos nombrado informalmente como Tmila-Ignimbrita Los Algodones, que por sus características petrográficas podría ser correlacionable con el depósito ignimbrítico reportado por Olguín-Villa (2010) en Cataviña, Baja California, correspondiente a la unidad conocida formalmente como Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San Felipe (IGH-TSF). Olguín-Villa (2010), agrupa al depósito ignimbrítico IGH-TSF en cuatro facies representativas de los afloramientos encontrados en Cataviña, Baja California; en la base se encuentra una facies denominada como “*Base surge*”, a continuación, una facies soldada, la parte media y finalmente la facies

de la cima. En la base de estos depósitos ignimbríticos, se observa una facies de tipo “*Ground surge*”, la cual se describe petrográficamente como un depósito ignimbrítico con textura vitroclástica porfídica de clinopiroxeno verde, sanidina y fayalita, con numerosos líticos de andesita porfídica de plagioclasa y anfíbol, así como xenocristales de estos mismos minerales arrancados del sustrato. La facies soldadas están descritas petrográficamente como un depósito ignimbrítico con textura vitroclástica de color café y varían hasta eutaxíticas. Este depósito es porfídico de sanidina, clinopiroxeno y fayalita. Existe una abundancia de fayalita, zircones en la matriz y bajo porcentaje de líticos. La facies soldada media muestra una textura porfídica de sanidina, clinopiroxeno y fayalita. En esta facies destaca la presencia de una textura eutaxítica y fiammes. Finalmente, la facies de la cima corresponde a un nivel poco soldado con presencia de fiammes, porfídico de feldespatos alcalinos, zircones y fayalita muy oxidada y líticos del basamento. Las facies “Base Surge” y soldada de la IGH-TSF presentan las mismas características petrográficas encontradas en las facies tobácea (Figura 14 B) y soldada (Figura 14 C) de la Tmila-Ignimbrita Los Algodones reportada en este trabajo.

b) Petrogénesis y correlación geoquímica entre la Ignimbrita Los Algodones y la Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San Felipe .

Para el estudio geoquímico se analizaron muestras tanto del depósito ignimbrítico de Los Algodones como del depósito de Cataviña. También, fueron analizados los enclaves traquíticos encontrados en las muestras. El diagrama multielemental de normalización a MORB (Pearce, 1983) muestra las anomalías encontradas en las muestras de ambos depósitos (Figura 46). En este se observa una similitud en los espectros y la presencia de anomalías negativas en Sr, Ba y Ti, las cuales pueden asociarse al grado de diferenciación del magma. Por un lado, las anomalías en Sr y Ba derivan de la cristalización fraccionada de plagioclasa, y por otro lado, la de Ti de la cristalización fraccionada de augita. Los enclaves muestran, de acuerdo con el paralelismo con los espectros de la ignimbrita, una concentración más elevada de elementos incompatibles y una anomalía menos acentuada de Ba, indicando que se trata de magmas genéticamente relacionados y con un grado de diferenciación menor.

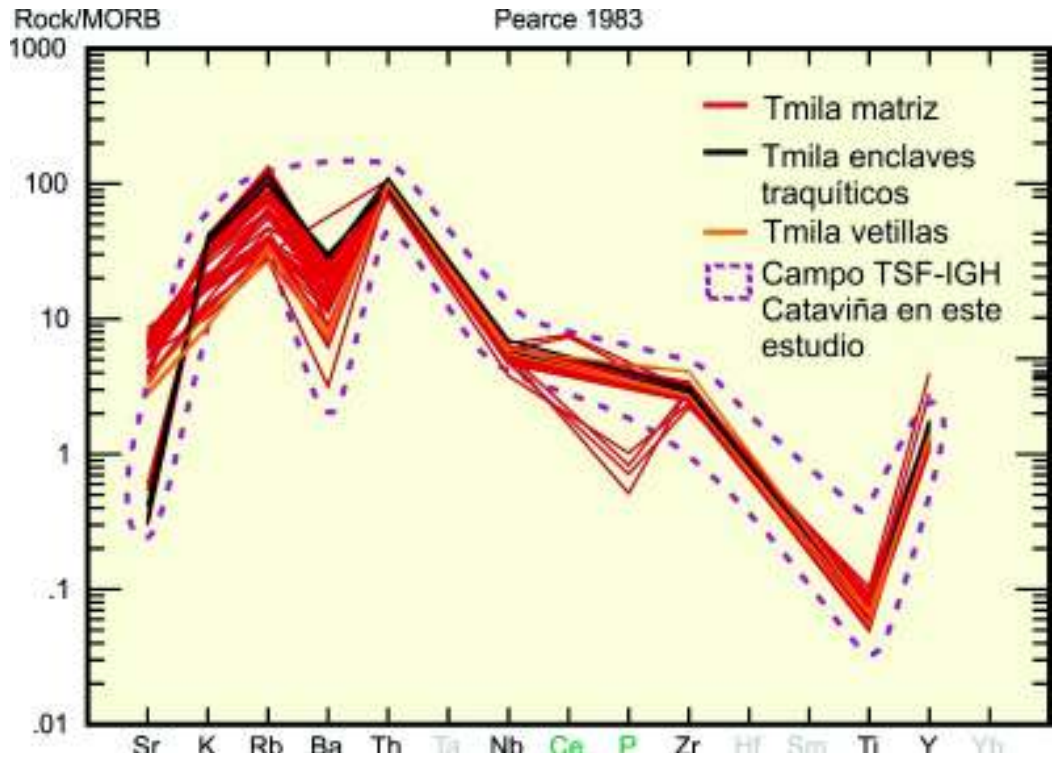


Figura 46. Diagrama de multielemental de normalización a MORB (Pearce, 1983) para la caracterización geoquímica de la Tmila. El espectro de color lila corresponde al campo de las muestras de la unidad IGH-TSF provenientes de Cataviña, Baja California que se analizaron en este estudio. Los elementos en tipografía de color negro son los que presentan buena medición en el equipo, los elementos en color gris no fueron medidos y los elementos en verde son los que no presentan una buena medición en el equipo.

Los elementos de correlación utilizados fueron basados en el diagrama ternario de Rb-Fe-Sr, publicado por Vidal-Solano *et. al.*, (2013), donde se analizaron los afloramientos de la IGH-TSF distribuidos en Sonora y Baja California, la Tmila corresponde a los campos 2 y 3. Esto permite correlacionarla con los depósitos de Cataviña y San Felipe, Baja California.

De acuerdo con el contenido obtenido de Sr en la Tmila, pueden obtenerse dos grupos; el grupo 1 presenta variaciones medias en este elemento, las cuales son características de la IGH-TSF, mientras que el grupo 2 mantiene variaciones muy altas, lo que no permite correlacionarlo con ningún otro depósito (Figura 47). Esto último rasgo es asociado a una mineralización secundaria por vetillas de cuarzo, las cuales fueron analizadas para saber la influencia en la identidad química de las muestras, por lo que dentro del método utilizado para el análisis geoquímico por medio del equipo portátil, es primordial tener un buen control de las áreas que fueron analizadas, con la finalidad de conocer más a fondo en qué consistió

detalladamente el protocolo seguido para la realización del análisis geoquímico ir al capítulo de Anexos.

Con respecto al contenido de Zr, la Tmila presenta valores entre los 200 y 300 (ppm) y entre 15-30 (ppm) de Nb. Los valores de Zr vs Nb en la IGH-TSF (Figura 48), que reporta Vidal-Solano *et. al.*, (2013), presenta valores entre los 280-480 de Zr y para el Nb entre los 20-35 (ppm). Los rangos de las concentraciones para estos elementos que mantiene la Tmila y los publicados por Vidal-Solano *et. al.*, (2013) son muy parecidos, siendo esto otro factor más para hacer posible la correlación entre la Tmila y la TSF-IGH.

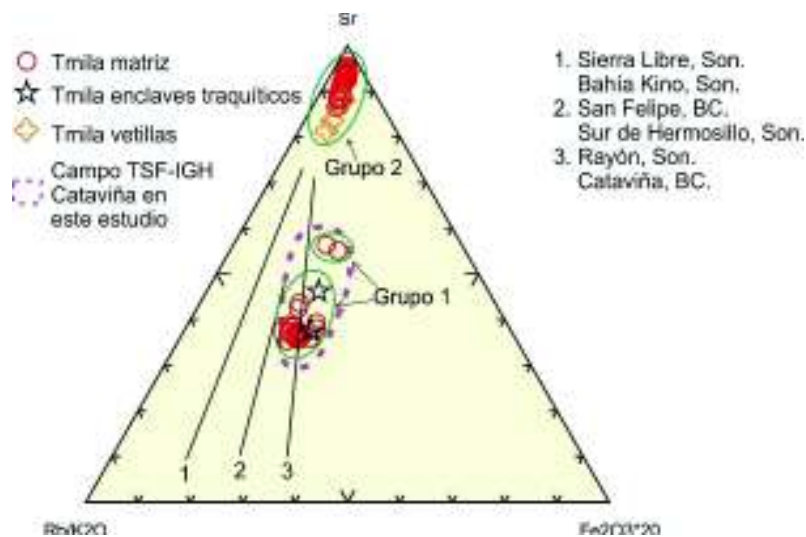


Figura 47. Diagrama ternario Rb-Fe-Sr de Vidal-Solano *et. al.*, (2013) para la correlación geoquímica de la Tmila. En este diagrama se observa que la Tmila está dividida en dos grupos donde sólo es posible ubicar al grupo 1 en las localidades de Cataviña (Zona 3) y San Felipe, Baja California (Zona 2). Las líneas 1, 2 y 3 que aparecen en el diagrama corresponden a las distintas localidades donde se ubica la unidad IGH-TSF. El espectro de color lila corresponde al campo de las muestras de la unidad IGH-TSF provenientes de Cataviña, Baja California que se analizaron en este estudio.

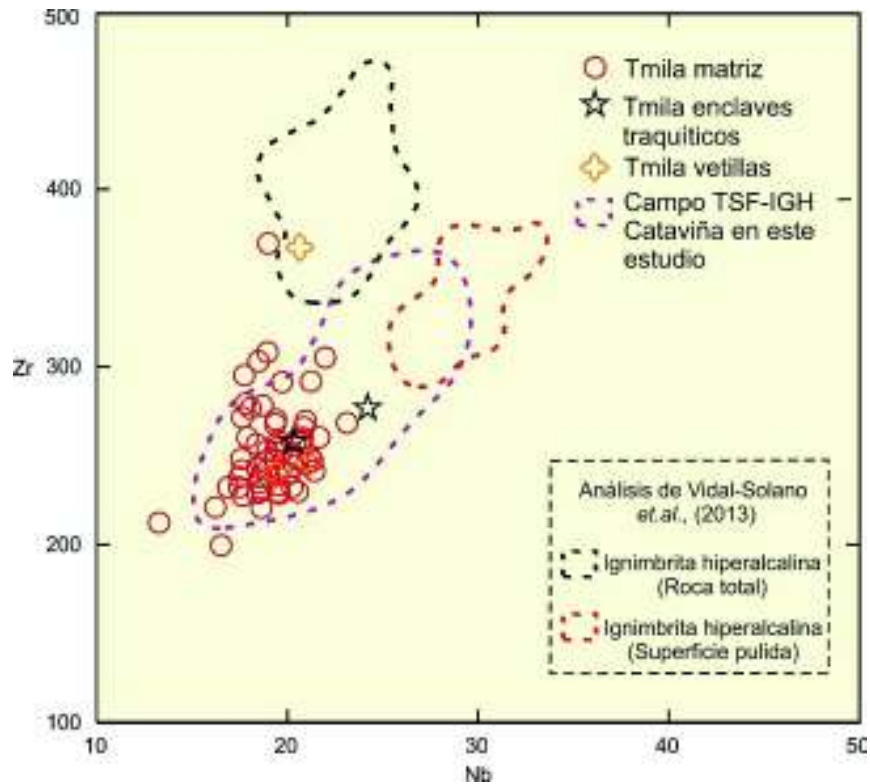


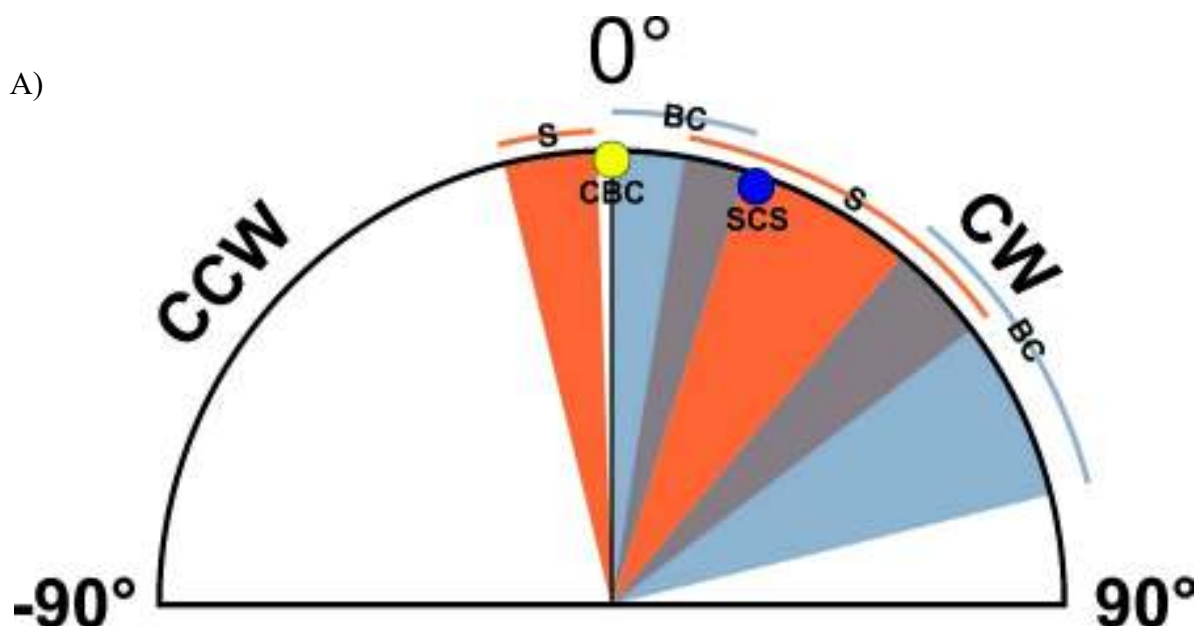
Figura 48. Diagrama XY (*Vidal-Solano et al. 2013*) utilizado para conocer las variaciones de las concentraciones de Nb vs Zr en la unidad Tmila. El espectro de color lila corresponde al campo de las muestras de la unidad IGH-TSF provenientes de Cataviña, Baja California que se analizaron en este estudio.

c) Correlación paleomagnética

Con base en los resultados de los análisis paleomagnéticos por campos alternos a baja temperatura obtenidos para la Tmila, se dividió la unidad en 2 grupos, uno de ellos presenta una polaridad inversa y valores medios de declinación e inclinación de 231/-24.8, respectivamente (Figura 41), lo que permite correlacionarla con los depósitos reportados en Sonora y Baja California (Lewis y Stock, 1998; Stock *et al.*, 1999; Oskin *et al.*, 2001; Oskin y Stock, 2003; Stock *et al.*, 2006; Hernández-Mendez *et al.*, 2008; Darin, 2011; Olguín-Villa, 2010; Olguín-Villa *et al.*, 2013; Bennet y Oskin, 2014). Los depósitos de la IGH-TSF con mayor inclinación hasta ahora reportados, se encuentran en Isla tiburón, con una inclinación de -15.8 en la Sierra Alta (Oskin *et al.*, 2001) y 16.4 en Bahía Vaporeta (Oskin y Stock, 2003) en la costa de Sonora, respecto a lo anterior y lo reportado en este trabajo, el bloque de San Carlos, Sonora, es ahora el que presenta la mayor inclinación para la IGH-TSF.

El segundo grupo presenta un vector característico ligeramente diferente para esta misma unidad (Declinación: 213.1; Inclinación: -67.7; Figura 42) esto podría deberse a una remanencia secundaria obtenida por la intrusión andesítica de la Tmda presente en el sitio, afectando el campo característico de la IGH-TSF. Algo importante a mencionar en esta situación es que la componente de la declinación no se vio tan afectada, como la de la inclinación.

Bennet y Oskin (2014) publicaron una compilación de las rotaciones en el eje vertical y horizontal encontradas en la unidad IGH-TSF, donde se considera que la declinación e inclinación media para el bloque estable de esta unidad tiene valores de 212.4/-4 con un a_{95} en la estadística de Fisher de 1.3. Estos valores se obtuvieron del promedio de la declinación e inclinación de tres sitios en Baja California: Mesa El Cartabón, Mesa El Burro y Mesa el Pinole. Con lo que respecta a Cataviña, Baja California, Olguín-Villa et al., (2013) reporta valores medios de declinación e inclinación de 213.8/-5.2, permitiendo colocar a esta región dentro de un bloque sin deformación de la IGH-TSF. Con base en lo anterior se calcularon los valores de rotación, en el eje vertical y horizontal, para el bloque de San Carlos, Sonora, con respecto al bloque tectónicamente estable, obteniendo una rotación en sentido de las manecillas del reloj de 19° (Figura 49 A) con un error de 2.5 y un basculamiento de 21° (Figura 49 B) con un error de 2.9. Esto último indica que el bloque de San Carlos, además de estar rotado en el eje vertical, también presenta un basculamiento.



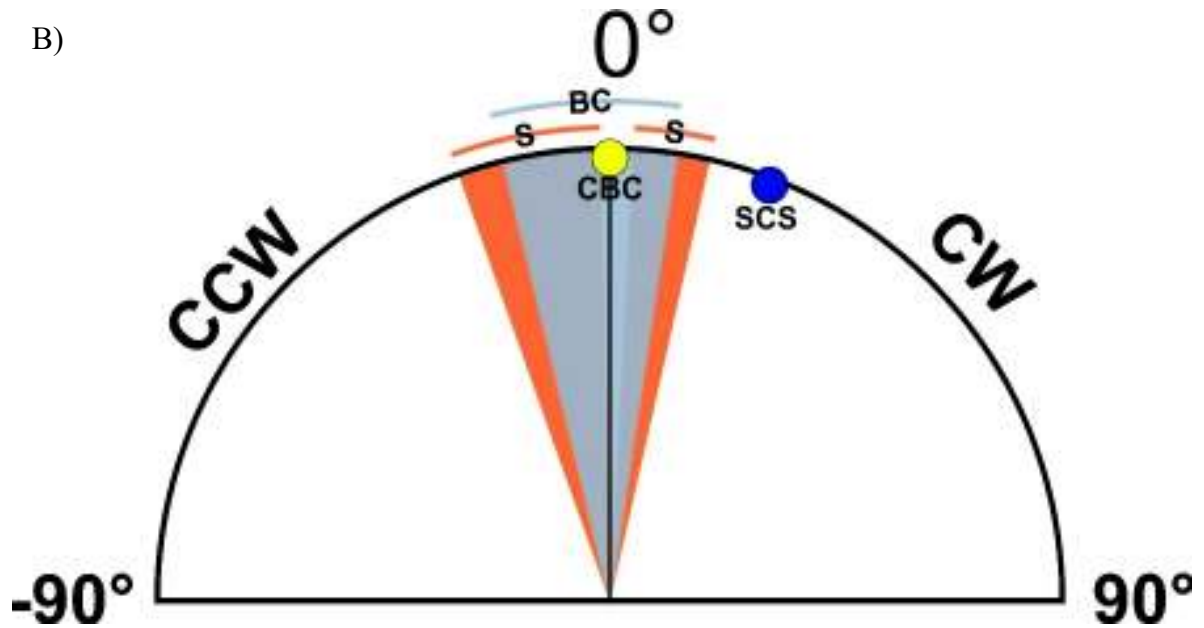


Figura 49. Compilación de las rotaciones en el eje vertical y horizontal para la unidad IGH-TSF, modificado de Bennet & Oskin (2014). A) Rotación en el eje vertical; B) Rotación en el eje horizontal. El punto amarillo muestra la rotación de la unidad IGH-TSF en el bloque estable en Cataviña, Baja California. El punto azul, ubica a la IGH-TSF del bloque de San Carlos, Sonora con su respectivo valor de rotación (19° en Y y 21° en X). BC= Baja California; S= Sonora; CBC= Cataviña, Baja California; SCS= San Carlos, Sonora; CW= Sentido horario; CCW= Sentido antihorario.

d) Discusiones con respecto a la mega erupción

En el Mioceno, cuando la subducción comenzó a cesar, ocurrió una serie de eventos magmáticos caracterizados por la erupción de magmas anorogénicos típicos de un ambiente de rift, poco antes de la apertura del Golfo de California. Este volcanismo involucró la ocurrencia de lavas máficas con firmas transicionales, pero estuvo principalmente gobernado por la producción de rocas hiperalcalinas (Vidal-Solano, 2005), producto de una mega erupción que, posiblemente provino de un magma que emergió a través de fallas profundas o una ventana astenosférica (Barrera-Guerrero, 2012). Este volcanismo hiperalcalino está representado por lavas y depósitos de flujos piroclásticos, que se encuentran en Baja California, y más ampliamente en la costa y centro de Sonora (Vidal-Solano et al., 2013). Dentro de la Baja California se reporta a esta unidad como Toba de San Felipe (TSF, Stock et al., 1999) y en Sonora es conocida como Ignimbrita de Hermosillo (IGH, Paz-Moreno *et al.*, 2000).

La morfología de los depósitos de la IGH-TSF en San Carlos indica que este flujo piroclástico siguió los bajos topográficos para emplazarse, siendo estos posibles paleocanales, algunos con agua, puesto que una de las facies de la IGH-TSF en esta zona presenta rasgos de palagonitización. Las facies de la IGH-TSF en San Carlos, a pesar de tener cierto grado de soldadura, no presentan un vitrófido en la base y los depósitos de esta unidad no alcanzan grandes espesores, esto es indicador de que los depósitos de esta unidad en San Carlos corresponden a facies distales del punto de emisión en Sonora central (Barrera-Guerrero y Vidal-Solano, 2009), esto último siendo una prueba más para correlacionar a estos depósitos con los que se encuentran en Cataviña, Baja California.

3. ¿Cuáles son los eventos deformacionales presentes en la zona de estudio?

Con base en los resultados de la distribución de las actitudes del fallamiento: a) la función de densidad de Kernel agrupa datos con diferentes características, que no muestran una distribución normal, perdiendo su simetría, sin embargo, b) el polígono de frecuencias agrupa los datos en familias más pequeñas y bajo distribuciones más uniformes. Con respecto a este último método, el análisis cinemático arrojó que existen tres familias de fallas deformando a la Sierra Los Algodones, en todas estas familias, según la clasificación de fallas de Páez-Juarez (2010) destacan la presencia de fallamiento lateral con una componente normal.

Conocer la cronología de los eventos deformacionales en el área resulta confuso, debido a que a que las 3 familias de falla se encuentran cortando a todas las unidades litológicas. Sin embargo, en el caso particular de la unidad Tmila, se encuentra cortada principalmente por la familia 1 (Fp1), la cual también corta a la unidad Tmda. Un aspecto importante para señalar es que en campo las fallas de bajo ángulo se observaron en planos lístricos. Esto podría ser una razón, por la que la familia 1 (Fp1) no se encuentra cortando en gran medida a las unidades subyacentes de la Tmila (Kgr y Tmfb). Estas fallas lístricas presentan tres características principales: 1) Inclinan a las unidades que cortan; 2) Debido a que su movimiento es oblicuo, rotan a las unidades afectadas en su eje vertical; y 3) Puesto que ocurren en forma de “cola de callo”, las estructuras no son paralelas, contribuyendo a una extensión difusa. Por lo anterior, se puede inferir que la familia 1 (Fp1) es el último evento deformacional que sufrió el área de estudio.

Según las estratificaciones de las unidades Tmda-Dique andesítico y Tmdr-Dique riolítico, estas unidades aprovecharon las fallas y fracturas generadas por el episodio deformativo correspondiente a la familia 3 para emplazarse.

4.2 Conclusiones

1. Fundamentado en las relaciones mineralógicas y texturales presentes en la cobertura volcánica en la Sierra Los Algodones se pueden ubicar por lo menos dos tipos de magmatismo como había sido anteriormente reportado (Gómez-Valencia, 2014; Velderrain-Rojas, 2014 y 2016), uno correspondiente a un ambiente de arco, el cual está representado por la unidad Tmfb-Flujo basáltico que forma parte del Grupo San Carlos. El segundo evento corresponde a un volcanismo asociado a rift, este episodio está representado por las unidades Tmila-Ignimbrita Los Algodones (Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San Felipe), Tmda-Dique andesítico (Formación Guaymas Inferior), Tmdr-Dique riolítico (Formación El Parral) y la unidad Tmfrd-Flujo riolítico (Formación Guaymas Superior).
2. Con base en los resultados obtenidos en el análisis geoquímico en el equipo portátil de fluorescencia de rayos X *Niton FXL* de los elementos Zr, Nb, Rb, K, Sr y Fe, las relaciones mineralógicas y texturales en el análisis petrográfico y en conjunto con los resultados obtenidos en el análisis paleomagnético en el sitio 1, arrojando un vector de desmagnetización con polaridad inversa y baja inclinación se puede concluir que la unidad denominada en este trabajo como Tmila-Ignimbrita Los Algodones que se encuentra en San Carlos, Sonora, es puntualmente correlacionable con el marcador estratigráfico IGH-TSF, distribuido ampliamente en Sonora y Baja California. El depósito que se reporta en este estudio, específicamente se correlaciona con las facies distales en la región de Cataviña, Baja California, a 430km al NW de San Carlos, Sonora.
3. Con apoyo en los resultados obtenidos en el análisis estructural se pueden reconocer tres eventos deformacionales en el área: 1) Dirigido hacia el NW, 2) Dirigido hacia el NE y el 3) Dirigido hacia el SW. Donde el evento correspondiente a la familia 1, por sus relaciones de corte y características mecánicas corresponde al último evento deformacional que ocurre en la Sierra Los Algodones, además por las direcciones de sus estructuras podría estar relacionado a la Provincia Extensional del Golfo. En complemento con los resultados del análisis paleomagnético, se determinó que existe una rotación de bloques en el área de aproximadamente 19° en el eje vertical y 21° en el eje horizontal, durante este último episodio. La deformación que ocurre en la

Sierra Los Algodones puede ser explicada de manera esquemática con el siguiente modelo.

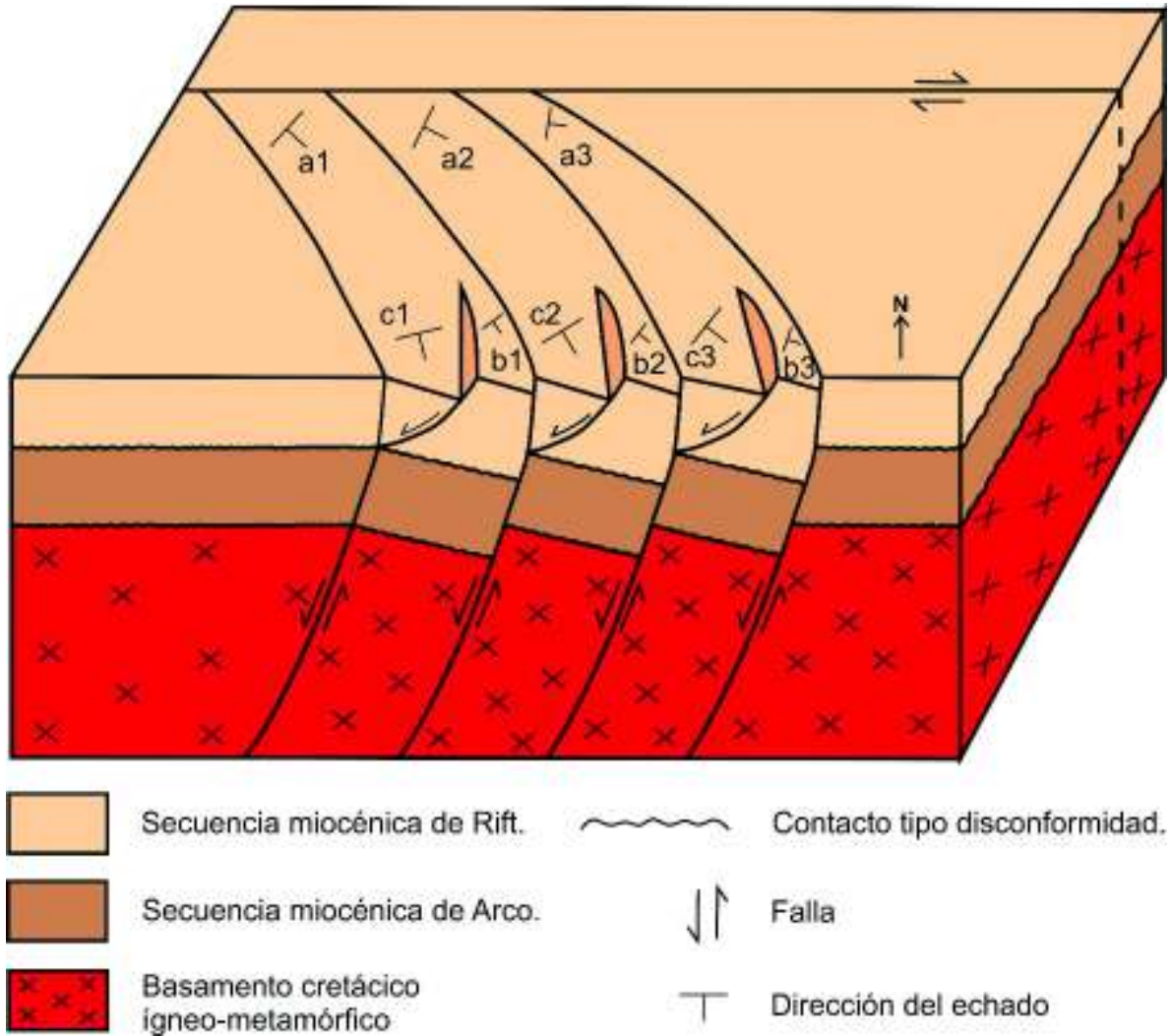


Figura 50. Modelo tectónico esquemático modificado de Hu *et. al.*, 2019, que explica la deformación ocurrida en la Sierra Los Algodones. Este modelo compila como primer ocurrió un fallamiento normal que afectó a las 3 secuencias presentes en el área, después ocurre una deformación más compleja, que consistió en fallas laterales que derivaron a fallas lítricas que crean estructuras en cola de caballo y en tijera. Esta última deformación afectó únicamente a la secuencia de rift (para conocer más de las unidades que conforman cada secuencia ir al a figura 8). Relaciones de rotación de los bloques: $a_1 > a_2 > a_3$; $b_1 > b_2 > b_3$; $c_1 > c_2 > c_3$; $c_1 > b_1 > a_1$; $c_2 > b_2 > a_2$; $c_3 > b_3 > a_3$.

5 LITERATURA CITADA

Aguillón-Robles, A., Calmus, T., Bellon, H., Maury, R.C., Cotton, J., Bourgois, J., Michaud, F., 2001. Late Miocene adakite and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: Indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California: *Geology*, 29(6), 531-534.

Allmendinger, R. W., Cardozo, N. C., and Fisher, D., 2012, *Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors*: Cambridge, England, Cambridge University Press, 289 pp.

Aragón-Arreola, M. y Martín-Barajas, A. 2007. Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico. *Geology*, 35 (I6), 571-574.

Aranda-Gómez, J.J., Henry, C.D., Luhr, J.F., 2000. Evolución tectono-magmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53 (1), 59-71

Atwater, T., 1989. Plate tectonic history of the Northeast Pacific, in D. Winterer, M. Hussong, and D. R.W., eds., *The Eastern Pacific and Hawaii*, Boulder, CO, Geological Society of America. *Geology of North America*, v. N, 21-73.

Barrera-Guerrero S., Vidal-Solano J.R., 2010, Reconocimiento del volcanismo hiperalcalino de edad Mioceno Medio en el NW de México: Un registro completo en La Sierra Libre, Sonora, México, en XX Congreso Nacional de Geoquímica, Temixco, Morelos, México: *Actas INAGEQ*, 16(1), 229-234.

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. 113 pp.

Bennett, S., 2009, Transtensional Rifting in the Late Proto-Gulf of California Near Bahía Kino, Sonora, México: University of North Carolina at Chapel Hill, tesis de maestría, 122 pp.

Bennett, S. & Oskin, M., 2014. Oblique rifting ruptures continents: Example from the Gulf of California shear zone. *Geology*

Calmus, T., Pallares, C., Maury, R.C., Bellon, H., Pérez-Segura, E., AguillónRobles, A., Carreno, A.L., Bourgois, J., Cotten, J., Benoit, M., 2008. Petrologic diversity of Plio-Quaternary post-subduction volcanism in Baja California: an example from Isla San Esteban (Gulf of California, México): *Bulletin de la Société Géologique de France*, 179(5), 465-481.

Cochemé, J. J., 1985, Le magmatisme dans le Nord-Quest du Mexique. Cartographie de la región de Yecora-Maicoba-Mulatos. Illustration magmatique de la fin d'un régime en subduction et tu passage á un régime distensif: Université Aix-Marseille III, Thèse d'Etat, 209 pp.

Curry, J. R., and D. G. Moore 1984, Geologic history of the mouth of the Gulf of California, in *Tectonics and Sedimentation along the California Margin*, Publ. 38, edited by J. K. Crouch and S. B. Bachmna, pp. 17-36, Pacific Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Bakersfield, Calif.

Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., & Cochemé, J. J., 1983, El Batolito Laramide (90-40 Ma) de Sonora: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Convención Nacional, 15, Guadalajara, Jal., Memorias, p. 63-95.

Darin, M. H., 2011, Late Miocene Extensional Deformation in the Sierra Bacha, coastal Sonora, México: Implications for the Kinematic Evolution of the Proto-Gulf of California. Tesis de maestría, Universidad de Oregon, 95 p.

Darin, M. H., Bennett, S.E.K., Dorsey, R.J., Oskin, M., Iriondo, A. 2016 Late Miocene extension in coastal Sonora, México: Implications for the evolution of dextral shear in the proto-Gulf of California oblique rift. *Tectonophysics*, 693, 378-408

Delgado Argote, L.A., M. López-Martínez and del Carmen Perillat, M. 2000. Geologic reconnaissance and Miocene age of volcanism and associated fauna from sediments of Bahía de los Angeles, Baja California, central Gulf of California. *Geological Society of America Bulletin Special Papers*, 334, 111-121.

Demant, A. 1984. The Reforma Caldera, Santa Rosalía area Baja California. A Volcanological petrological and mineralogical study, en Malpica-Cruz, V., Celis- Gutierrez, S., Guerrero-Garcia, J., Ortlieb, L. (eds.), Neotectonics and sea level variations in the Gulf or California area: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Instituto de Geología, 75-96.

Ferrari, L; Velencia, M y Bryan, S. 2005. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de norteamérica. Boletín de la sociedad geológica mexicana, 57, 37.

Gans, P. B., Blair K., MacMillan, I., Wong, M., & Roldán-Quintana, J, 2003, Structural and magnetic evolution of the Sonora rifted margin: A preliminary report, Geological Society of America, Abstracts with programs, v. 35(5), 21 p.

Gans, P.B., Wong, M., MacMillan, I., Blair, K.D., Roldan, J., Till, C.B., Herman, S., 2006. Magmatic–tectonic interactions in the Gulf extensional province: insights from the Sonoran margin. Proceedings, MARGINS Workshop: Lithospheric Rupture in the Gulf of California — Salton Trough Region. [http://www.rcl-cortez.wustl.edu/ Presentations.html](http://www.rcl-cortez.wustl.edu/Presentations.html).

Gans, P.B., S. Herman, and I. MacMillan, 2013. Late Miocene (12-6 Ma) transtensional faulting, block rotations, and volcanism during the inception of the Gulf of California oblique rift, southwestern Sonora, Mexico, Geological Society of America Abstracts with Programs v. 45(6).

Gastil, R. G., et al., 1974. Reconnaissance geologic map of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino, Ge01. Soc. Am. Map Chart Ser., MC:16.

Gastil, R.G., Phillips, R.F. and Allison, E.C., 1975. Reconnaissance geology of the state of Baja California. Geological Society of America Memoir. 140, 1-201.

Gastil, G., D. Krummenacher, and J. Minch, 1979. The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California, Ge01. Soc. Am. Bull., 9_0.0, 839-857.

Gómez-Valencia, A. M, y Vidal-Solano J.R., 2010. Geoquímica de Rocas intrusivas y extrusivas con afinidad adakitica en la región de Rayón, Sonora. XX Congreso Nacional de Geoquímica, Temixco, Morelos, Vol. 16, No. 1.

Gómez-Valencia, A.M., 2014. Evolución espacio-temporal y petrológica del magmatismo Oligoceno-Mioceno en Sonora, México: Enfoque en el magmatismo Adakítico relacionado al cese de la subducción: Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis de maestría en ciencias, 287 pp.

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.

Hausback, B.P., 1984. Cenozoic volcanic and tectonic Evolution of Baja California Sur, México. In: *Geology of the Baja California Peninsula* (Frizzell, V.A., ed.). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, 39, 219-236.

Heim, A., 1922, Notes on the Tertiary of southern Lower California: *Geol. Mag.*, v. 59 (702).

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: ProQuest LLC.

Hernández-Méndez, G. L., Stock, J., Vidal-Solano, J., and Paz-Moreno, F. A., 2008. Paleomagnetic Constraints on the Extent of the Miocene Tuff of San Felipe/Tuff of Hermosillo, Sonora, Mexico, in *Proceedings Geological Society of America Annual Meeting*, Denver, CO.

Hu, Z., Xu, C., Wang, D., Ren, J., Liu, Y., Xiao, S., Zhou, X., 2019. Superimposed characteristics and genetic mechanism of strike-slip faults in the Bohai Sea, China. *PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT*, 46, 265-279

Johnpeer, G. D., 1977. Reconnaissance geology and petrology of the Guaymas area, Sonora, Mexico. Tesis de Maestría, Arizona State University, 67 p.

Jones, C.H. 2002, User-driven integrated software lives: “PaleoMag” paleomagnetism analysis on the Macintosh, *Computers and Geosciences*, v. 28(10), p. 1145-1151.

Karig, D. E., and W. Jensky., 1972, The protogulf of California, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 17, 169-174 pp.

Larson, R. L., H. W. Menard, and S. M. Smith., 1968, Gulf of California: A result of ocean-floor spreading and transform faulting, *Science*, 161, 781-784.

Lewis, C. J., and Stock, J. M., 1998, Paleomagnetic evidence of localized vertical-axis rotation during Neogene extension of the Sierra San Fermín, northeastern Baja California, Mexico: *JGR*, v. 103, p. 2455-2470

Lizarralde, D., Axen, G.J., Brown, H.E., Fletcher, J.M., González-Fernández, A., Harding, A.J., Holbrook, W.S., Kent, G.M., Paramo, P., Sutherland, F., Umhoefer, P. J., 2007. Variation in styles of rifting in the Gulf of California. *Nature*, 448(7152), 466-469.

Marrett, R. A., and Allmendinger, R. W., 1990, Kinematic analysis of fault-slip data: *Journal of Structural Geology*, v. 12, p. 973-986.

Martín-Barajas, A., Stock, J.M., López-Martínez, M., Chapman, A., 2008. Estratigrafía volcánica del Neógeno en la mitad norte de la isla Ángel de la Guarda. Primer congreso sobre la evolución geológica y ecológica del noreste de México. Hermosillo, Sonora. 1 p.

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.

Moore, D. G., and E. C. Buffington, 1968. Transform faulting and growth of the Gulf of California since the late Pliocene, *Science*, 161., 1238-1241.

Moore, D. G., 1973. Plate-edge deformation and crustal growth, Gulf of California structural province, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 8.4, 1883-1906.

Mora-Álvarez, G., 1992. History of Cenozoic magmatism in the Sierra Santa Úrsula, Sonora, Mexico: Department of Geology, University of Texas, Austin. Tesis de maestría, 153 p.

Olguín-Villa, Angel Enrique., Vidal-Solano, Jesús Roberto., Stock, Joann Miriam. 2013. Petrografía, geoquímica, petrofábrica y paleomagnetismo de la Toba de San Felipe en

la región de Cataviña, Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30, 282-298.

Olguín-Villa A.E., 2010, Estudio físico y químico del volcanismo hiperalcalino en la región de Cataviña, Baja California: Universidad de Sonora, tesis de licenciatura, 84 pp.

Oskin, M., and Stock, J. M., 2003, Pacific-North America plate motion and opening of the Upper Delfin basin, northern Gulf of California: *Geological Society of America Bulletin*, v. 115, p. 1173–1190.

Oskin, M., Stock, J., Martín-Barajas, A., 2001. Rapid localization of Pacific North America plate motion in the Gulf of California. *Geology*, 29, 459-462.

Paz-Moreno, F.A., Demant, A., Ornelas-Solís, R.E., 2000, Las ignimbritas hiperalcalinas neógenas de la región de Hermosillo, Sonora, México, mineralogía y geoquímica (resumen), en IV Reunión sobre la Geología del Noroeste de México y Áreas Adyacentes, Libro de Resúmenes: Hermosillo, Sonora, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 90-91.

Páez-Juárez, V., 2010, Análisis estructural en la región de Paso de la Yesca, límite entre los estados de Jalisco y Nayarit: México D. F., Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Tesis de Maestría, 102 pp.

Pearce, J.A. 1983: Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins, In Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J. eds., *Continental basalts and mantle Xenoliths*, 230-250, Shiva, Nantwich, Cheshire, U.K.

Pérez-Aguilar, L., 2017, Evolución tectono-magmática en la región sur de la Sierra Libre, Sonora, México, y su relación con el Proto-Golfo de California durante el Mioceno Medio-Tardío. Universidad de Sonora, Tesis de maestría, 353 pp.

Slawn, M. G. 1986. Petrogenesis of Late Cenozoic volcanic rocks from Baja California Sur, Mexico: University of California, Santa Cruz, Tesis Doctoral, 174 pp.

Sawlan, M.G., 1991. Magmatic evolution of the Gulf of California rift, en Dauphin, J.P., Simoneit, B.R. (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias: American Association of Petroleum Geologists Memoir 47*, 301-369.

Stock, J., Paz-Moreno, F. A., Martin, K., and Lin, D., 2006, The 12.5 Ma Tuff of San Felipe: a major structural marker horizon in northwestern Mexico, in Proceedings Lithospheric Rupture in the Gulf of California-Salton Trough Region - NSF Margins RCL Workshop, Ensenada, Mexico.

Stock, J.M., Lewis, C.J., Nagy, E.A., 1999, The Tuff of San Felipe: an extensive middle Miocene pyroclastic flow deposit in Baja California, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 93, 53-74.

Stock, J.M., Hodges, K.V., 1989. Pre Pliocene Extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate. *Tectonics*, 8(1), 99-115.

Till, C.B., Gans, P.B., Spera, F.J., MacMillan, I., and Blair, K. D., 2009, Perils of petrotectonic modeling: A view from southern Sonora, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 186, p. 160-168.

Umhoefer, P.J., Dorsey, R.J., Willsey, S., Mayer, L., and Renne, P., 2001, Stratigraphy and geochronology of the Comondú Group near Loreto, Baja California Sur, Mexico: *Sedimentary Geology*, v. 144, p. 125–147, doi: 10.1016/S0037-0738(01)00138-5

Umhoefer, P.J., Mayer, L., Dorsey, R.J., 2002. Evolution of the margin of the Gulf of California near Loreto, Baja California Peninsula, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.* 114, 849–868.

Vega-Granillo, R., De la O Villanueva, M., Vega-Granillo, E. L., Pérez-Álvarez, M. E., Morales-Montaño, M., y Araux-Sánchez, E., 2004. Geología urbana de la Ciudad de Guaymas, informe final CONACYT (Clave 489100-5-4148PT), México, 240 p.

Vega-Granillo, R., Vázquez-Armenta, V.H., Orozoco-Garza, A., Vidal-Solano, J.R., 2015. Structural analysis of the La Colorada Mine, Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* Sitio web: <https://www.redalyc.org/pdf/572/57240685005.pdf>

Velderrain-Rojas, L. A., 2014. Contribución al estudio de los eventos volcánicos del Mioceno en la Sierra El Aguaje, porción Costera de Sonora, México. Universidad de Sonora, tesis de licenciatura, 127 pp.

Velderrain-Rojas, L. A., 2016. Evolución tectono-magmática en la región de Guaymas, Sonora, México: Relación geodinámica con el Protogolfo de California. Universidad de Sonora, tesis de maestría en ciencias geología, 148 pp.

Vidal-Solano, J.R., 2005, Le volcanisme hyperalcalin d'âge Miocène Moyen du Nord-Ouest du Mexique (Sonora): Minéralogie, Géochimie, cadre géodynamique: Francia, Universidad Paul Cézanne, tesis de doctorado, 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., Demant, A., Paz Moreno, F.A., Lapierre, H., Ortega-Rivera, M.A., Lee, J.K.W., 2008a. Insights into the tectonomagmatic evolution of NW Mexico: geochronology and geochemistry of the Miocene volcanic rocks from the Pinacate area, Sonora: Geological Society of America Bulletin 120, 691-708.

Vidal-Solano, J.R., Lapierre, H., Stock, J.M., Demant, A., Paz-Moreno, F.A., Bosch, D., Brunet, P., Amortegui, A., 2008b. Isotope geochemistry and petrogenesis of peralkaline Middle Miocene ignimbrites from central Sonora: relationship with continental break-up and the birth of the Gulf of California. Bulletin de la Societe Geologique de France, 179(5), 453-464.

Vidal-Solano, J. R., Lozano Santa Cruz, R., Zamora, O., Mendoza-Córdova, A., Stock, J. M., 2013. Geochemistry of the extensive peralkaline pyroclastic Flow deposit of NW Mexico, based on conventional and handheld X-ray fluorescence. Implication in a regional context. Journal of Iberian Geology 39 (1) 12-130 pp.

Zucchini, W., 2003, Applied Smoothing Techniques, Part 1: Kernel Density Estimation. <<http://staff.ustc.edu.cn/~zwp/teach/Math-Stat/kernel.pdf>

ANEXOS

Los anexos de este trabajo consisten en bases de datos que compilan la información obtenida en los análisis petrográficos, geoquímicos y paleomagnéticos, además de una descripción detallada de las técnicas de laboratorio utilizadas.

Para consultar las bases de datos del análisis petrográfico de todas las unidades mencionadas en este trabajo, el análisis geoquímico de las unidades Tmfb, Tmdbc, Tmila, Tmfrd y Tmda, el análisis paleomagnético de las unidades Tmila, Tmiea, Tmda y Tmdr y los procedimientos de laboratorio favor de comunicarse a los siguientes correos: roberto.vidal@unison.mx, jstock@gps.caltech.edu y adrianappaezw@gmail.com