



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**Análisis de las etapas de deformación de Graben de Enramadas,  
S.L.P.: ¿Transtensión o cizalla pura?**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta:

Arqlogo. Oscar Daniel Zárate Velázquez

Asesor:

Dr. José Ramón Torres Hernández

Co-Asesor:

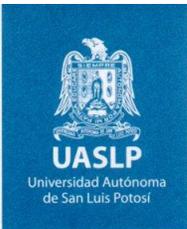
Dr. Miguel Morales Gámez

Alumno becado por CONACYT: 924306

San Luis Potosí, S. L. P.

Diciembre del 2020





16 de julio de 2020

**ARQLOGO. OSCAR DANIEL ZÁRATE VELÁZQUEZ  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. José Ramón Torres Hernández y Miguel Morales Gámez** Asesor y Co-asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de julio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"Análisis de las etapas de deformación del Graben de Enramadas, S.L.P.: ¿Transtensión o cizalla pura"**

- Introducción.
1. Geología Regional.
  2. Geología y estructura del Graben de Enramadas.
  3. Resultados del análisis estructural.
  4. Análisis de paleo-esfuerzos.
  5. Discusión de resultados y paleo-esfuerzo.
- Conclusiones.  
Referencias.

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**A T E N T A M E N T E**

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN**  
**DIRECTOR**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN

[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Copia. Archivo  
\*etn

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria • CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336

"1945-2020: 75 años de formación de profesionales en la Facultad de Ingeniería"

## Contenido

Índice de figuras .....	iv
Agradecimientos institucionales .....	viii
Agradecimientos .....	ix
Resumen .....	1
Introducción .....	2
Antecedentes .....	3
Justificación .....	5
Hipótesis.....	6
Objetivo general.....	6
Objetivos específicos.....	6
Metodología .....	6
Métodos de análisis de paleo-esfuerzos (paleo-tensores) .....	8
La Teoría de Fallas Conjugadas de Anderson.....	9
Hipótesis Bott-Wallace .....	11
Modelo de Etchecopar .....	12
El método del diedro recto.....	13
El método de optimización rotacional de esfuerzo (optimización rotacional) .....	16
Capítulo 1. Geología regional .....	16
1.1 La Mesa Central (MC) .....	16
Geología de la Mesa Central.....	19
Tectónica de la Mesa Central .....	20
Capítulo 2 Geología y Estructura del Graben de Enramadas .....	24
2.1 Ubicación.....	24
2.2 Complejo Volcánico Santa María.....	28
2.3 Estratigrafía del área de estudio.....	32
Ignimbrita Santa María (Tis) .....	32
Traquita Ojo Caliente (Toc).....	33
Andesita Agua Fría (Taf) .....	33
Latita Portezuelo (Tlp) .....	34

Ignimbrita Panalillo (Tap) .....	34
Capítulo 3 Resultados del análisis estructural .....	36
3.1 Fallas que delimitan al graben.....	37
3.2 Diques.....	46
3.3 Fracturas.....	52
3.4 Unidades volcánicas (Paleógeno) .....	54
3.5 Conglomerados y aluviones (Cuaternario) .....	58
Capítulo 4 Análisis de paleo-esfuerzo.....	61
4.1 Presentación de resultados de paleo-esfuerzo.....	62
Falla Enramadas .....	62
Falla San Juan Capistrán .....	62
Falla La Boquilla .....	63
Falla Ojo Caliente.....	64
Falla Ojo Caliente 3.....	65
Falla Las Chivas .....	66
Falla Catedral.....	67
Falla El Arbolito .....	67
Falla El Arbolito 1.....	68
Falla Fracción Sánchez .....	69
Capítulo 5 Discusión y resultados de paleoesfuerzo .....	70
5.1 Etapas de deformación.....	77
Etapa 1. ....	77
Etapa 2. ....	77
Etapa 3. ....	78
Etapa 4 .....	78
5.2 Relación con una cuenca pull apart .....	78
Conclusiones .....	81
Referencias.....	82
Anexo I. Tablas de datos de campo .....	91

## Índice de figuras

Figura 1 Modelo de las fallas conjugadas de Anderson para los tres tipos de fallas. P: esfuerzo máximo, R: esfuerzo mínimo y Q: esfuerzo intermedio (Modificado de Anderson, 1951.....	10
Figura 2 Modelo del método de Diedros Rectos. A la izquierda una vista perspectiva y a la derecha un estereograma “beachball” (color negro indica la tensión y blanco la compresión). F: plano de falla; A: el plano auxiliar; n: unidad vector; s: unidad del deslizamiento del vector (en el caso del estereograma es la estría); B: intersección de los planos de A y F; P: diedro de compresión; T: diedro de tensión (Angelier, 1979). .....	14
Figura 3 Localización de la Mesa Central (IX) respecto a otras provincias fisiográficas (Gómez-Anguiano y Herrera-Corona, 2012). En el cuadro rojo localización del área de estudio. ....	18
Figura 4 Área de los estados de San Luis Potosí y Guanajuato donde se muestran los sistemas de fallas, las fallas principales así como las principales fosas tectónicas (Alaniz-Álvarez <i>et al.</i> , 2002).En el recuadro rojo el área de estudio. ....	22
Figura 5 Mapa que muestra la Mesa Central (en rojo) y los sistemas de fallas que la delimitan (líneas negras) así como las localidades principales más cercanas (estrellas amarillas). Modificado de Nieto-Samaniego <i>et al.</i> (2005).....	23
Figura 6 Mapa de San Luis Potosí, en el cuadro rojo la delimitación del área de estudio. ....	25
Figura 7 Mapa que muestra las principales localidades. Las localidades están delimitadas por la línea amarilla, las que presentan puntos rojos son localidades principales y las de punto verde son localidades menores. ....	26
Figura 8 Mapa de altimetría del área de estudio, se observa en verde las zonas más bajas (planicies) y en rojo las zonas mas elevadas (serranías, cerros, etc). ....	27
Figura 9 Mapa del patrón de corrientes del área de estudio. Se observa el patrón dendrítico que coincide con las zonas de baja elevación.....	28
Figura 10 Mapa de los complejos volcánicos del campo volcánico de San Luis Potosí (Modificado de Tristán-González <i>et al.</i> , 2009).En el cuadro rojo el área de estudio. ....	29
Figura 11 Arreglo de fallas tipo domino (derecha) de un área próxima al este del área de estudio (Torres-Hernández, 2009). .....	30
Figura 12 Mapa de los principales grabens presentes en el área de estudio, todos indicados con un fallamiento normal (Modificado de Montoya, 2011). ....	31
Figura 13 Tabla estratigráfica de las unidades cercanas al Graben de Enramadas (Modificado de López-Loera y Tristán-González, 2013). .....	35
Figura 14 Mapa que muestra la extensión en el área de estudio de las diferentes unidades litológicas. (Modificado de Tristán-González <i>et al.</i> , 2009).....	36
Figura 15. Estereogramas de las fallas Enramadas y (a la derecha) y San Juan Capistrán (a la izquierda). En los estereogramas de superiores se observa la orientación NW-SE con variaciones en la falla San Juan Capistrán, mientras que en la falla Enramadas se va más uniforme al igual que sus buzamientos. En la parte inferior la distribución de polos donde se observar esa uniformidad.....	38
Figura 16. Estereogramas de la falla La Boquilla, observándose variaciones ligeras en su orientación NW-SE y buzamientos parcialmente uniformes. A la derecha la distribución de polos mostrándose una mayor densidad debido a los polos del buzamiento con dirección SW. ....	39

Figura 17, Estereogramas de la falla Ojo Caliente 3. En la parte superior la falla principal con orientación NW-SE donde se muestra poca variación en la orientación de la falla, el estereograma de distribución de polos muestra la tendencia del buzamiento hacia el SW. En la parte inferior una falla asociada con orientación NE-SW con su diagrama de distribución marcando el buzamiento hacia el SE. ....40

Figura 18. Estereogramas falla Ojo Caliente donde se observa la orientación de las fallas NW-SE y la distribución de los polos.....41

Figura 19. Estereogramas (superiores) de la falla Santa María con una orientación NW-SE donde se observan dos patrones muy claros de fallas, uno con fallas uniformes en la orientación y otro con variaciones; en la distribución de polos se observa está clara diferencia en el arreglo de las fallas. En los estereogramas inferiores se observa una falla asociada con orientación NE-SW con menor variación en la orientación, la cual se observa en la distribución de polos al verse un contorno más definido. ....42

Figura 20. Estereogramas falla El Arbolito. En la parte superior el estereograma con la falla principal con orientación NW-SE y variaciones en la orientación, el diagrama de distribución de polos presenta una mayor cantidad de polos por el buzamiento hacia el SW. Los estereogramas inferiores corresponden a una falla asociada con ligeras variaciones en orientación (NE-SW) y la distribución de polos muestra ese arreglo debido a que el buzamiento es mayor a los 70°. ....43

Figura 21. Estereogramas de la falla El Arbolito 1. En la parte superior la falla principal (orientación NW-SE), con distribución de polos homogénea pero se observan los planos con un ángulo de buzamiento muy bajo (distribución en el centro). En el centro: estereogramas de una falla asociada con orientación N-S con una distribución de polos hacia los extremos. En la parte inferior: estereogramas de una falla asociada con orientación W-E con una distribución de polos homogénea y con el mismo número de polos.....44

Figura 22. Estereogramas de la Falla Coahuila-Texas. En la parte superior la falla asociada con orientación con una distribución de polos mayor referente a la parte donde se hunde el plano. En la parte inferior la falla de Coahuila-Texas con orientación NE-SW y el diagrama de polos con mayor densidad en los dos polos de las fallas similares. ....45

Figura 23. Estereogramas de la Falla Catedral, el estereograma indica la orientación NW-SE. El estereograma de la distribución de polos muestra la homogeneidad de los polos pero con variaciones debido al buzamiento de los planos de falla. ....46

Figura 24. Estereograma que indica la orientación de los diques los cuales presentan la orientación NW-SE y un buzamiento que varía desde 50° hasta ser verticales. ....47

Figura 25. Se observan los arreglos sigmoidales en los diques emplazados (línea punteada) en Toc, al este del GE. ....48

Figura 26. Dique con arreglo sigmoidal (delimitado por la línea punteada) al este del GE, el cual se emplaza en Toc. ....48

Figura 27. Dique con arreglo sigmoidal (líneas rojas) al este del GE, el cual se emplaza en la traquita Ojo Caliente (Toc). ....49

Figura 28. Estereogramas de los diques asociados a la falla Ojo Caliente con orientación NW-SE. ....50

Figura 29. Indicadores cinemáticos: estrías (Est.), escalones (Esc.) y surcos (S) en el plano de falla, con presencia de dique. La unidad afectada es la Latita Portezuelo. Un dique piroclástico está marcado en verde. El plano de falla enmarcado con una elipse, tiene estrías de falla horizontales. Los otros

indicadores cinemáticos se sobre-imprimieron, y juntos, marcan un “pitch” de 40°-45° en sentido horario.....50

Figura 30. Estereograma de los diques de la falla La Boquilla, donde se observan la orientación N-S. ....51

Figura 31. Estereograma de los diques de las fallas de la parte SE del GE. Rojo diques de la falla Arbolito; azul diques de la falla Arbolito 1 y verde diques de la falla Fracción Sánchez. ....51

Figura 32. Arreglo sigmoidal del dique de la falla Fracción Sánchez, emplazado en la traquita Ojo Caliente (Toc). ....52

Figura 33. Estereograma de las fracturas del GE, donde se observan dos con la misma orientación al graben (NW-SE) y una con orientación N-S. ....53

Figura 34. Estereograma de las fracturas de la falla La Boquilla con una orientación NE-SW. ....53

Figura 35. Estereogramas de las fracturas asociadas a las fallas Santa María (izquierda) y fallas Arbolito, Arbolito 1 y Fracción Sánchez (derecha). ....54

Figura 36. Estereograma de las fracturas de la falla inferida Cerro Prieto, las cuales muestran tres orientaciones: N-S, NE-SW y NW-SE.....54

Figura 37. Dique sigmoidal (líneas rojas) emplazado en la latita Portezuelo (Tlp), al oeste de la falla San Juan Capistrán .....55

Figura 38. Falla Las Chivas (línea amarilla), la cual sirve de separación de las unidades Tis (en negro), Tlp (en azul) y Toc (lado izquierdo de la imagen). ....56

Figura 39 Arreglo sigmoidal (delineado en rojo) de la unidad Tis; cerca de la falla Arbolito 1. ....57

Figura 40. Separación de las unidades ignimbrita Santa María (Tis) (izquierda) y la traquita Ojo Caliente (Toc) (derecha) en la familia de fallas de Fracción Sánchez. ....58

Figura 41. Los conglomerados que se presentan en la parte noroeste del graben, al oeste del puente peatonal de Enramadas presentan un basculamiento de 20° a 24° hacia el SE, hacia la falla Coahuila-Texas. Se resalta con línea punteada una discordancia angular, y la presencia de horizontes de material volcánico intercalados. ....60

Figura 42. Detalle de los depósitos de ceniza volcánica intercalados entre los depósitos conglomeráticos. Nótese el pobre desarrollo de suelo. ....61

Figura 43. Datos de las fallas Enramadas y San Juan Capistrán. Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional. ....63

Figura 44. Datos de la falla La Boquilla (NW-SE). Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional. ....64

Figura 45. Datos de la Falla asociada N-S La Boquilla. Izquierda: método P y T; derecha: método de Diedros Rectos. Cuando no aparezca el método de optimización rotacional es debido a que el número de estrías no son las adecuadas para un resultado confiable. ....64

Figura 46. Datos de la falla Ojo Caliente. Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional. ....65

Figura 47. Datos de la falla Ojo Caliente 3. Izquierda: método P y T; derecha: método de Diedros Rectos. ....66

Figura 48. Datos de la falla Las Chivas. Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional. ....66

Figura 49. Datos de la falla Catedral. Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional. ....67

Figura 50 Datos de la falla El Arbolito. Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional. ....	68
Figura 51 Falla asociada W-E El Arbolito. Izquierda: método P y T; derecha: método de Diedros Rectos..	68
Figura 52. Datos de la falla El Arbolito. Izquierda: método P y T; derecha: método de Diedros Rectos. ....	69
Figura 53. Dato de la falla Fracción Sánchez, sistema de fallas asociado NE-SW. Izquierda: método P y T; derecha: método de Diedros Rectos. ....	69
Figura 54. El cantil del fondo corresponde a la falla Enramadas, los bloques que se exponen en el corte de la carretera federal 57 muestran estructuras delimitadas por juegos de cizalla conjugados donde $\sigma_1$ es vertical. ....	73
Figura 55. Ubicación del Graben de Enramadas (GE, recuadro negro) y otros grabens importantes en la región, mapa gravimétrico. Elaboró: Randall Guevara-Betancourt (aun no publicado). ....	75
Figura 56 Etapas del desarrollo de una cuenca pull-apart. Superior: una falla lateral que comienza el movimiento; al centro: comienza a darse los procesos de extensión y compresión; inferior: se forma la cuenca pull-apart con fallas normales (extensión) y fallas inversas (compresión). Modificado de Burg, 2018. ....	79
Figura 57 Esquema de la cuenca pull-apart del graben de Enramadas (fosa) y la posible zona de compresión (derecha), generado a partir de una movimiento lateral izquierdo (sinestral). Propuesto a partir del esquema original de Burg (2018) y modificado en base a los datos de la cinemática. ....	80

## **Agradecimientos institucionales**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (clave 924306) para los estudios de maestría así como para los recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por las facilidades prestadas (instalaciones y apoyos económicos) para el desarrollo de este trabajo y presentación en congresos del mismo.

Al Instituto de Geología, por el apoyo prestado desde sus instalaciones hasta la asesoría por parte de su personal académico y administrativo.

Al Instituto de Geología, Mineralogía y Geofísica (Institute Geologie, Minerologie und Geophysik) de la Facultad de Ciencias de la Tierra (Geowissenschaften) de la Ruhr Universität Bochum, Alemania, a través del área de Geología Estructural encabezada por el Prof. Dr. Christophe Pascal por todas las facilidades y apoyos prestados, desde literatura, software y asesoría en los diferentes métodos de determinación de paleo-esfuerzo, que llevó a desarrollar parte de este trabajo.

## **Agradecimientos**

En primera parte quisiera agradecerle a mi familia por su apoyo desde que decidí estudiar la maestría, gracias por motivarme en todo momento y no dejar de hacer las cosas bien; siempre motivándome a seguir adelante. Gracias por soportar largas jornadas de trabajo en los cuales no llegue a convivir con ellos, pero que siempre estuvieron echándome ánimos.

En segunda parte estoy muy agradecido con mi asesor el Dr. Ramón Torres el cual me acepto en una parte difícil de mi maestría y que se comprometió a enseñarme cosas que no conocía a detalle o desconocía, gracias por su paciencia y por su apoyo además de siempre resolver mis dudas, las cuales fueron llevando de manera adecuada este trabajo. Gracias por el apoyo y los traslados a campo. Agradecerle a mi co-asesor el Dr. Miguel Morales el cual estuvo interesado desde un principio, agradecerle sus enseñanzas en campo las cuales llegaron en un momento apropiado; gracias por sus comentarios y guía en el campo, y en los traslados.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Rafael Barboza Gudiño por su paciencia y por sus enseñanzas en campo, las cuales fueron muy amenas y productivas además de aceptar ser sinodal de este trabajo que se enriqueció con sus comentarios y observaciones.

A mis profesores de maestría, gracias por sus enseñanzas las cuales enriquecieron el trabajo y/o me llevaron a conocer más de la geología; Dr. Alfredo Aguillón, Dr. Javier Castro Larragortia, Dr. Damiano Sarocchi, Dr. Ricardo Saucedo, Dr. Francisco Castillo, Dr. Yamzul Ocampo, Dr. Rubén López Doncel y Mtro. Marcos Rojas; así como a la coordinadora Dra. Cristina Noyola. Un agradecimiento muy especial al Dr. Margarito Tristán por sus enseñanzas en campo y esas charlas que me permitieron conocer más la geología de San Luis Potosí. Un agradecimiento muy profundo a la Mtra. Aurora Zavala la cual me apoyo bastante en el curso de mineralogía. Un profundo agradecimiento a la Dra. Patricia Julio que me motivo bastante a estudiar un posgrado.

Un agradecimiento muy especial al Prof. Dr. Christophe Pascal, el cual me aceptó para realizar mi estancia en la Rhur Universität Bochum; la cual fue muy productiva debido a que resolvió muchas de las dudas que se tenían del trabajo así como todas las facilidades prestadas para

resolver dudas que se presentaron y toda la bibliografía proporcionada que enriqueció el trabajo. Gracias por su paciencia y por su tiempo.

En tercera parte agradecerles a mis amigos que estuvieron apoyándome. A mi amigo Eduardo el cual estuvo al pendiente del trabajo, a Andrea que me apoyo en redacción a pesar que no es la temática que maneja pero que siempre estuvo dispuesta apoyar. A mis compañeros de generación: Alejandro, Lidia y de manera especial a Gustavo que me ayudo en dudas y temas que desconocía además de motivarme a hacer mi estancia en Alemania; además del amigo Felipe. Un agradecimiento a Fernanda por su amistad y los momentos divertidos que pasamos junto a los compañeros Pablo, Gaby, Sebastián y Omar.

Además de un profundo agradecimiento a todos aquellos que con sus palabras y ánimos motivaron a realizar este trabajo.

## **Resumen**

En la documentación existente sobre el graben de Enramadas (de orientación NW-SE), resaltan dos situaciones que no concuerdan con los sistemas de estructuras tectónicas generados por procesos extensionales tipo cizalla pura, donde las fallas que los delimitan son aproximadamente paralelas, y la distribución regional de las fosas tectónicas alternan en “horst y grabens, o, semigrabens”. La primera, es que la estructura en estudio termina en vértice en su extremo suroriental, por la unión de las dos fallas que la delimitan a ese vértice en continuidad con la falla principal, un bloque levantado exhibe la unidad volcánica más antigua de la región. La segunda es que la margen noroccidental del graben está truncada en la intersección con otra estructura tectónica de mucho mayores dimensiones, denominada graben de Villa de Reyes, de orientación NE-SW. La orientación conjugada de estructuras de graben en esta parte de la Mesa Central de México ha sido objeto de diversos estudios tanto de carácter Tectónico-Estructural, Tectono-Volcánico, y Tectónica y Magnetismo. En estos estudios se han considerado dos hipótesis: Primera; Las estructuras se formaron por eventos extensionales asociados al desarrollo de la Provincia del “Basin and Range”, en cuyo caso se implicarían el desarrollo de un primer sistema con orientación de esfuerzos extensionales con orientación NE-SW, y, separado en el tiempo, otro evento con esfuerzos de orientación NW-SE. Segunda; los dos sistemas de grabens se formaron por un solo evento de deformación tridimensional que justifica la orientación conjugada de las fosas tectónicas mencionadas. Sin embargo, la morfología de las sierras en las inmediaciones de Santa María del Río-Ojo Caliente, y la documentación de indicadores cinemáticos en los planos de falla y el arreglo de los bloques delimitados por las mismas, sugieren una tercera hipótesis; la de que una componente de fallamiento a rumbo generó fosas tectónicas por transtensión durante el Oligoceno, una de las cuales la representa el graben de Enramadas. El presente trabajo de tesis aporta elementos para la discusión de las dos primeras hipótesis, y documenta y propone que el graben de Enramadas se formó por esfuerzos de transtensión en el Oligoceno, y que su formación ocurrió antes de la formación del de Villa de Reyes.

## Introducción

El Graben de Enramadas se localiza a unos 27 Km de la ciudad de San Luis Potosí, hacia el sureste. La zona de estudio se localiza en el Campo Volcánico de Santa María del Río, donde se presenta estructuras geológicas asociadas compuestas por fosas tectónicas originadas por procesos extensivos los cual están asociados con las etapas del vulcanismo en la zona, compuesto por paquetes de rocas de edades entre 32 a 26 Ma las cuales descansan sobre rocas sedimentarias mesozoicas de origen marino. La dinámica estructural del área está relacionada con eventos más complejos de deformación que forma parte de la Mesa Central. En la Mesa Central se han encontrado sistemas de fallas con orientaciones NW-SE, NE-SW y N-S, y en menor medida sistemas con fallas con orientaciones W-E, las cuales se distribuyen al este de la Mesa Central. Las direcciones principales mencionadas anteriormente se presentan en el área del Graben de Enramadas, en el cual, la más predominante es la orientación NW-SE las cuales se han registrado como fallas normales (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982). Algunos lineamientos notables son indicados como fallas normales inferidas. En estudios anteriores sobre el Graben de Enramadas se reporta también la presencia de diques relacionados con el fallamiento. Para explicar la dinámica estructural de la zona se han planteado dos ideas; la primera es una deformación triaxial que incluye la formación del Graben de Villa de Reyes (Nieto-Samaniego, 1994) y la segunda una deformación sincrónica en la cual el Graben de Enramadas y grabens vecinos se formaron antes que el Graben de Villa de Reyes como resultado dos eventos (Andreani *et al.*, 2014; Torres-Hernández, 2009).

En el Graben de Enramadas no se ha realizado un estudio de la cinemática grabada en los planos de falla, a través del estudio de los indicadores cinemáticos, los cuales documentan las etapas que se llevaron a cabo. Una de las interrogantes que llevaron a plantear este trabajo es la geometría no convencional que presenta el GE, porque en su extremo sureste (cercana al poblado de Ojo Caliente) se cierra en ángulo agudo porque confluyen las fallas que delimitan su estructura. Por las características que se muestran en imágenes satelitales, mapas litológicos y trabajos previos, la geometría sugiere que se trata de una cuenca tipo “pull-apart”. Además, dado que la parte noroccidental de este graben está truncada, y que este truncamiento es en la misma orientación que la falla oriental del GVR, el estudio de esta estructura puede aportar a la solución de estos dos importantes temas de interpretación tectónica en la región.

## **Antecedentes**

Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978) realizaron la cartografía geológica escala 1: 50,000 de la Hoja San Luis Potosí, S.L.P., donde documentan la estratigrafía de las rocas volcánicas del Paleógeno, así como de las formaciones sedimentarias Marinas Mesozoicas, y unidades continentales del mismo período. Entre la secuencia volcánica destacan la latita porfirítica, la riolita San Miguelito y la riolita Panalillo. Las rocas emplazadas durante el Cuaternario son principalmente basaltos, conglomerados y aluvión.

Labarthe-Hernández y Tristán-González (1980) realizaron la cartografía de la Hoja Santa María del Río y determinaron que Las rocas volcánicas félsicas son del Oligoceno-Mioceno, también identificaron a la Formación Caracol del Cretácico Superior (Ksc)(Coniaciano-Maastrichtiano); un pórfido cuarzo monzonítico (Tm); y rocas volcánicas terciarias; Ignimbrita Santa María (Tis), Traquita Ojo Caliente (Toc), andesita-basalto (T a-b), latita porfirítica (Tlp), riolita Quelital (Trq), riolita San Miguelito (Tsm), Ignimbrita Cantera (Tic), derrame riolítico El Zapote (Tz), riolita Panalillo (Trp). Hay presencia de materiales acarreados durante el Paleógeno así como rocas cuaternarias (conglomerados y aluvión). La historia geológica indica un plegamiento de rocas cretácicas durante la orogenia Larámide, en el Paleoceno-Eoceno y en el Oligoceno hubo una intensa actividad magmática. Durante el Oligoceno se produjo la actividad volcánica que generó la secuencia que caracteriza al Campo Volcánico de Santa María. Posterior a esto hubo un periodo de fracturamiento y fallamiento extensional que formó la serie de grabens y fracturas (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1980).

En la monografía geológica-minera de San Luis Potosí realizada por el Consejo de Recursos Minerales (1996) y Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978), se hace mención de toda la geología del estado, indicando que en el Cenozoico y en especial en el Paleógeno, hubo una elevada actividad volcánica con presencia de rocas ígneas extrusivas correspondientes al Oligoceno (31-26 Ma) así como flujos de andesita en el Eoceno (44Ma).

Aguillon-Robles *et al.* (2003) en la Carta Geológica-Minera de Santa María del Río, ubica al Campo Volcánico de San Luis Potosí CVSLP como parte de la Provincia de la Faja Ignimbrítica Mexicana, el cual está compuesto por rocas félsicas del Paleógeno medio ( fechadas por K-Ar, 32-27Ma). La secuencia volcánica del CVSLP tiene una similitud en cuanto a características,

composición y edad con el Supergrupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental de Durango debido a que sus eventos están relacionados.

Aranda-Gómez (2005) hace mención de la actividad volcánica en San Luis Potosí debido a la presencia de volcanes monogenéticos del Neógeno-Cuaternario y divide el vulcanismo en dos, los presentes en la parte occidental y los del E de San Luis Potosí. Menciona que el vulcanismo es resultando de la actividad volcánica del Paleógeno asociado al magmatismo de la Sierra Madre Occidental y que dentro de la fisiografía de la Mesa Central existen complejos de fallas normales del Cenozoico medio a tardío.

Tristán-González *et al.* (2008) hacen un estudio relacionado al control tectono-volcánico de la Ignimbrita Panalillo Inferior. El relleno del graben de Enramadas se constituye de esta ignimbrita, rasgo que comparte con los grabens de Villa de Reyes y Bledos.

Tristán-González *et al.* (2009) determinaron la estratigrafía y estructura de las rocas volcánicas pertenecientes al CVSLP con base a descripciones de campo, petrografía y geoquímica. Para comprender mejor el CVSLP lo dividieron en complejos volcánicos el Complejo Volcánico Ahualulco (CVA) cuya edad es de 32-28 Ma (Oligoceno temprano y medio), Complejo Volcánico Pinos (CVP), el Complejo Volcánico Villa Hidalgo (CVVH), el Complejo Volcánico La Repartición (CVR), el Complejo Volcánico Santa María (CVSM). En los complejos se han observado fallas con dirección predominantemente NW-SE y NE-SW.

López-Loera y Tristán-González (2013) consideran que la tectónica del Complejo Volcánico Santa María del Río, ocurrió entre los 28 a 26Ma, la cual corresponde a lo que se ha propuesto como el evento extensional de mayor expresión que formó la Provincia de "Basin and Range" en la Mesa Central, y originó las mayores estructuras de fosas, semi-fosas y pilares tectónicos. En el mapa geológico de estos autores, se observa que, para el graben de Enramadas, la litología de mayor exposición es la latita Portezuelo, con afloramientos discretos de roca del Cretácico. La unidad volcánica más antigua es la Ignimbrita Santa María.

Montoya-Castillo (2011) en su trabajo sobre la geología estructural del graben de Enramadas, concluye que las fallas que lo delimitan son de tipo extensional normal ( $\sigma_1$  vertical), pero también documenta que en sus planos se observa cierta componente lateral, indicada en sus

estereogramas. En el graben encuentra que hay una inflexión debido a que las fallas marginales no son rectas. Al asociar diques piroclásticos con relación a las fallas se obtuvo que dichos diques dieron como resultado el emplazamiento de la ignimbrita Panalillo Inferior y que dichos diques se localizan entre los planos de las fallas mientras que la fosa está rellena por productos volcánicos.

Jasso-Lara (2015) realizó un estudio estructural en el bloque de Ojo Caliente, perteneciente al Campo Volcánico Santa María del Río. En el mapa que presenta su estudio se observa como las fallas (por lo general de orientación hacia el NW) se van uniendo unas con otras formando fallas más grandes. Este autor propone que los basculamientos son concordantes con las fallas, en el cual el análisis estructural reveló que hay una rotación. También, que los domos están relacionados con las fallas, a través de las cuales se emplazaron. En dicho trabajo se presentó la cartografía correspondiente escala 1: 10 000 de las fallas estudiadas.

## **Justificación**

El Graben de Enramadas es una estructura con lineamientos con orientación NW-SE, y diversos autores (Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1980; Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Montoya-Castillo, 2011) han interpretado que estos lineamientos presentan una cinemática de fallamiento normal, con basculamientos o inclinaciones hacia el SW y NE. Sin embargo en estos trabajos no se ha tenido una documentación de los procesos de fallamiento a partir de una medición sistemática de los indicadores cinemáticos en los planos de falla que delimitan la fosa tectónica graben de Enramadas, y de las fallas al interior del graben. Con el presente trabajo, se realizó toma de datos a detalle, enfocándose principalmente en la obtención de estrías y cinemática, los cuales sirvieron para un análisis de los esfuerzos (paleo-esfuerzos) en la medida que el número de datos lo permitieran en cada falla. En este trabajo se pretende explicar la geometría anómala del graben, y la sucesión de eventos de deformación tectónica extensional que le dieron sus características contrastantes con otros grabens de la región, a partir del análisis de los indicadores cinemáticos registrados en sus planos de falla, y la determinación de la dirección de los paleo-esfuerzos.

## **Hipótesis**

El graben de Enramadas tiene una forma geométrica diferente en superficie la de los grabens que se han documentado en la literatura referente a formación de grabens y de los grabens cercanos al área de estudio como lo son los de Bledos, Villa de Reyes y Los Arriates. Debido a la forma que presenta el Graben de Enramadas se proponen dos opciones:

1. El graben presenta deformación de cizalla pura.
2. El graben presenta un evento de transtensión y, por lo tanto, una componente importante de desplazamiento a rumbo, que generó una cuenca de tipo “pull-apart”.

## **Objetivo general**

Realizar un análisis estructural del graben de Enramadas con base en trabajo de campo, interpretación de fotografías aéreas, e imágenes de satélite, para determinar los estilos de deformación y su desarrollo.

## **Objetivos específicos**

- Realizar un análisis estructural a detalle tomando datos de las diversas estructuras presentes en el graben que permitan conocer las etapas de deformación.
- Determinar los paleoesfuerzos asociados a los eventos de deformación por medio del análisis cinemático.

## **Metodología**

El presente trabajo se desarrolló en tres etapas:

1. Búsqueda de información referente a la geología general y estudios estructurales realizados en el área de estudio, en especial, los relacionados a la temática a realizar.
2. Recopilación de mapas geológicos, topográficos, modelos de elevación digital (MED) y cartografía a detalle del área de estudio, los cuales serán trabajados en un sistema de información geográfica (SIG), usando para esta tesis el programa de licencia libre Qgis.
3. Con apoyo del trabajo en el SIG se planeó los caminamientos, y se eligió los lugares claves para detallar la estratigrafía y donde tomar los datos estructurales.
4. Fotointerpretación de fotos aéreas o a través del SIG.

5. Se realizó el mapa base para facilitar el trabajo en campo.

En la segunda parte se realizaron diversas salidas al campo para la obtención de datos, en las cuales:

1. Se tomó una breve descripción de cada punto, tomando en cuenta la unidad estratigráfica, litología, así como otros datos de interés, en especial, los indicadores cinemáticos (estrías, saltos, grietas de tensión, surcos, etc.) que se pudieron observar.

2. Para cada conjunto de datos estructurales que se tomaron, se anotaron las coordenadas, tipo de estructura, y otras características estructurales que resultaron de interés para el trabajo.

3. Con los datos tomados en campo, se hizo un análisis estructural para determinar la cinemática de las fallas.

4. Se hizo un análisis estadístico de los datos medidos en las fallas, tanto en el bloque subsidente, como en los bloques que limitan el Graben de Enramadas.

5. Se tomaron muestras de roca, especialmente las que pudieran constituir horizontes índice, indicando coordenadas y la unidad estratigráfica de que se toma.

En la tercera parte se procesaron los datos en gabinete:

1. Los datos obtenidos se trasladaron mediante las coordenadas a un SIG.

2. Los datos obtenidos se ordenaron en una tabla Excel para su manejo.

3. Los datos obtenidos en campo se trabajaron mediante los softwares Stereo32, Faultkin y Win-Tensor.

4. Se realizó el mapa y las secciones correspondientes, y se redactó el presente trabajo de tesis

Para el análisis es necesario conocer una metodología acompañada de una parte teórica que abarca el uso de las estrías como el indicador cinemático clave para la determinación de paleo-esfuerzos. En este caso son una serie de postulados teóricos en geología estructural y formulas

matemáticas acompañan a una serie de métodos que se fueron implementando y que se muestran a continuación.

Los indicadores cinemáticos son útiles para inferir el sentido del movimiento (Ayala, 2018; Doblas, 1998). Hay un sinnúmero de indicadores cinemáticos los cuales se dividen en dos grandes grupos: los indicadores cinemáticos de deformación frágil y de deformación dúctil (ver Doblas, 1998; Marshak y Mitra, 1998; Tolson, 1996). Hay varios indicadores cinemáticos que se pueden presentar en ambos grupos. Angelier (1989) comenta que el criterio de la cinemática es la herramienta de muchos estudios geodinámicos que sirven para reconstruir paleo-esfuerzos e inferencia de reconstrucciones a escenarios de diversas escalas. Incluso con las nuevas tecnologías, el análisis de los indicadores cinemáticos se ha aplicado en combinación de los Sistemas de Información Geográfica (Alberti, 2010).

Una de los indicadores más usados son las estrías o "*slickenside*", los cuales son muy comunes encontrarlos en los espejos o planos de fallas, ya que se producen por el pulimiento generado por el movimiento en ambos lados de la falla (Doblas, 1998; Marshak y Mitra, 1998). A la vez los datos de las estrías se pueden utilizar en diversos "*softwares*" para la obtención de los paleo-esfuerzos, los cuales necesitan ser alimentados con variables que permiten hacer cálculos para la obtención de los paleo-esfuerzos en los distintos puntos donde se hayan obtenidos los datos necesarios. Siendo las estrías el foco de los principales métodos de paleo-esfuerzos.

### **Métodos de análisis de paleo-esfuerzos (paleo-tensores)**

Existen varios métodos de cálculos de paleo-esfuerzos a partir del uso de estrías (Angelier, 1979; Angelier *et al.*, 1982; Angelier, 1984, Angelier, 1989; Maerten *et al.*, 2016; Pascal y Angelier, 2003); otros métodos usan los diques (Delaney *et al.*, 1986; Yamaji y Sato, 2011; Yamaji *et al.*, 2010), fracturas (Maerten *et al.* 2016) y experimental (Lacombe y Laurent, 1996). Para comprender los diversos métodos de análisis de paleo-esfuerzos es necesario conocer el *background* que llevo a la creación de los métodos. Las dos principales ideas de las que parten son de la Teoría de Fallas Conjugadas de Anderson y la Hipótesis Bott-Wallace, además de los trabajos de Etchecopar *et al.* (1981).

### **La Teoría de Fallas Conjugadas de Anderson**

Está basada en el modelo de fracturación de Mohr-Coulomb. Se basa en la ocurrencia de dos familias de fallas conjugadas que forman un ángulo agudo y otro obtuso; en la bisectriz de los diedros agudos y obtuso se encuentran los ejes en donde actúan los esfuerzos de compresión máximo y mínimo ( $\sigma_1$ ) y ( $\sigma_3$ ), respectivamente. En el punto donde se intersectan se localiza  $\sigma_2$ , el cual actúa de manera perpendicular a los otros esfuerzos.

La teoría de fallas conjugadas de Anderson (1951) relaciona dos fallas que se conjugan con  $60^\circ$  respecto una de otra. De acuerdo con Anderson las fallas conjugadas determinan la orientación de los principales ejes del esfuerzo (Figura 1). Hay tres principios en la teoría de Anderson, 1906 (Pascal, 2020):

- 1) Uno de los principales ejes de esfuerzo es siempre vertical y los otros dos son horizontales.
- 2) Los pares de las fallas conjugadas con ángulos cercanos a los  $60^\circ$ , para cada par de fallas conjugadas;  $\sigma_1$  bisecta el ángulo agudo,  $\sigma_3$  bisecta un ángulo obtuso, y  $\sigma_2$  es paralelo a la línea de intersección entre los dos planos de falla.
- 3) De los principios 1 y 2, las fallas inversas tendrán planos con inclinación de cerca de  $30^\circ$ , las fallas normales con cerca de  $60^\circ$  y las fallas de rumbo con plano cercano a la vertical.

Estos enunciados o principios son conocidos como para identificar las fallas andersonianas. Un esfuerzo representado por  $\sigma_1$  vertical y  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  horizontales representa una extensión; si los esfuerzos  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  son horizontales y el esfuerzo  $\sigma_3$  vertical representa un acortamiento y si el esfuerzo  $\sigma_2$  es vertical y los restantes sigma horizontales es representación de un movimiento lateral.

Con ello, la teoría de Anderson permite conocer los principales ejes de esfuerzo acorde a las características de las fallas. En algunas ocasiones, el estado del estrés es mencionado como la extensión radial (Pascal, 2020) (ocupando el  $\sigma_1$ ) y la compresión radial ( $\sigma_3$ ). Hay un estado de esfuerzo muy específico llamado régimen de esfuerzo de transpresión; por su parte existe un estado donde el fallamiento normal y de rumbo ocurre, es llamado régimen de esfuerzo transtensivo (Pascal, 2020) donde el radio  $\Phi=1$  y el  $\sigma_3$  es horizontal; esto también puede encontrarse como cizalla sub-simple.

A la par de la teoría de las fallas conjugadas de Anderson, está la teoría de las fallas polimodales (Reches y Dieterich, 1983), la cual se basa en un conjunto de fallas conjugadas con un arreglo geométrico romboidal. Se han realizado pruebas de laboratorio bajo condiciones triaxiales. Los resultados de las pruebas validaron el criterio de fracturamiento influenciado por  $\sigma_2$ , el criterio de Coulomb y la teoría de Anderson. La diferencia es que la deformación planteada por Anderson ha sido visible en muchos casos a los largo de decenas de años (Pascal, 2020) contra el modelo de Reches y Dieterich (1983) y la teoría de las fallas polimodales que solamente existen entre 4-5 casos documentados (comunicación personal con el Dr. Pascal).

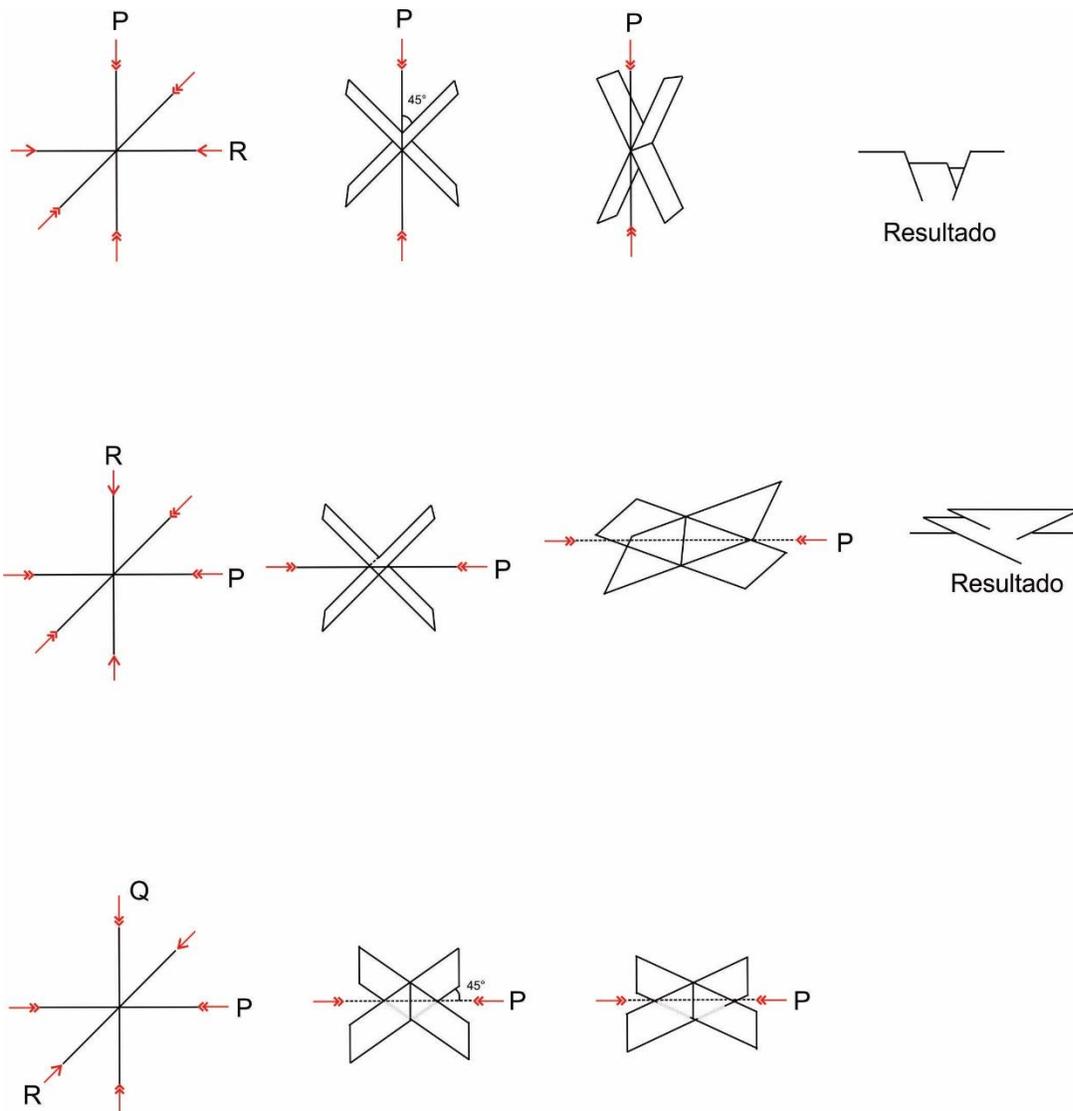


Figura 1 Modelo de las fallas conjugadas de Anderson para los tres tipos de fallas. P: esfuerzo máximo, R: esfuerzo mínimo y Q: esfuerzo intermedio (Modificado de Anderson, 1951).

### **Hipótesis Bott-Wallace**

Basada en los trabajos del geólogo Robert Wallace y el geofísico Martin Bott (Pascal, 2020), explora el aprovechamiento matemático del desplazamiento oblicuo desarrollado por la teoría de Anderson de los estados de esfuerzo, además propone la idea de la relación entre el esfuerzo de cizalla con las estrías producto de los desplazamientos. El gran aporte de la hipótesis de Bott-Wallace es que es la base para el desarrollo de todos los métodos de inversión de paleoesfuerzos mediante datos de desplazamientos de fallas. Es la base de algunos de los métodos de inversión conocidos como lo son el Método de los Diedros Rectos, El Método de Inversión de Esfuerzos, El Método de Triedro, el Método Geomecánico de Inversión de Paleoesfuerzos (Marten *et al.*, 2016) y el Método SORTAN (Pascal y Angelier, 2003).

En la base teórica propuesta por Bott (1959) se consideran diversos conceptos que se deben tomar en cuenta para el movimiento de un fallamiento a rumbo y la presencia de fallas oblicuas. Estas dependen básicamente de dos mecanismos: 1) la rotación presente en el sistema de esfuerzos con presiones principalmente horizontales y verticales que resultan en un sistema oblicuo. 2) las propiedades de las rocas, principalmente la resistencia y la elasticidad (su inhomogeneidad). Está, a la vez, asociada a la litología existente en la zona de fallas. Una rotación en una falla solamente llegará como un máximo de 10°. Debido a la diferencia de litologías, habrá preferencia en el fracturamiento, dirección de inicio y final, así como la dirección de la cizalla.

Al conocerse los ejes X, Y y Z que son paralelos a los esfuerzos principales ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ ) la máxima dirección de del esfuerzo de cizalla de un plano es dado por los cosenos (l, m y n) y con la relación:

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1$$

(ecu. 1)

Bott (1959) propone un diagrama con las principales dirección de los regímenes de máximo esfuerzo de cizalla en un plano. Con base a este diagrama se puede identificar los diversos regímenes de movimientos dextrales, fallas normales o inversas, además del planteamiento de una serie de regímenes en base a los adaptados por Harland y Bayly (citados en Bott, 1959). Tomando en cuenta que siempre que la relación sea  $\sigma_y \geq \sigma_z$  el movimiento será en sentido dextral.

Sus ideas se pueden mencionar de manera clara en estos enunciados (Pascal, 2020):

- 1) El deslizamiento de la falla ocurre de manera paralela al esfuerzo de cizalla.
- 2) Las superficies de las fallas son planas.
- 3) La deformación de los bloques de las fallas es insignificante.
- 4) El deslizamiento de la falla es pequeño en comparación con la escala de la observación.
- 5) No hay perturbaciones de esfuerzo, y no hay interacción de fallas.
- 6) No hay rotación en las fallas durante el fallamiento.
- 7) Un evento de esfuerzo uniforme prevalece durante un evento tectónico.

### **Modelo de Etchecopar**

El modelo de Etchecopar apoyó en el diseño de los métodos, debido a que se basó en la estadística y las poblaciones de fallas (Etchecopar *et al.*, 1981; Liesa *et al.*, 2019) y a la vez se basa en el tensor reducido de esfuerzo (Angelier, 1984; Pascal, 2020). Se emplea la función  $F = \sum (s_i, t_i)^2$ ; en esta función la parte  $(s_i, t_i)$  representa el ángulo entre estría teórica y real (radianes). Los resultados son mostrados mediante la dirección, inmersión (ambos de cada eje) y la relación:

(ecu.2)

$$R_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

El método de Etchecopar tiene unas condiciones generales que deben presentarse para que la solución al análisis sea satisfactoria en el tensor. Este tensor explica el porcentaje de fallas en función de parámetros de “calidad”, y si este llega a ser de dicha “calidad”, se considera al tensor como aceptable. Los parámetros, para decir sí el tensor es de calidad, son: 1) la desviación entre ángulos no debe ser mayor a 10°; 2) el histograma debe tener una forma de semi-campana de Gauss. Las fallas que muestra el tensor deben estar entre las primeras tres clases estadísticas (desviación máxima de 17°) y debe diferenciarse fácilmente del resto; 3) los resultados deben ser convergentes a pesar de que parta de diferentes tensores iniciales y 4) en un diagrama de Mohr los puntos correspondientes a las fallas deben quedar situados en la parte superior izquierda del diagrama.

El tensor solo explica las fallas que son agrupadas en las primeras tres clases del histograma de número de fallas vs desviación angular (radianes), o cuando la desviación es menor a 0.3 radianes. Cuando se tienen fallas activadas por tensores de desgarre ( $\sigma_2$  vertical) se consideran

solamente las dos primeras clases del histograma anterior. El criterio se basa en los cambios en fallas de alto buzamiento, estrías de bajo ángulo y  $\sigma_1$  superiores a  $45^\circ$ . El criterio también es usado para compresiones triaxiales con fallas de fuerte buzamiento y bajo ángulo formado, aplicado tanto en regímenes distensivos como compresivos.

Al obtener los resultados se equivalen con la R de Bott (1959), dependiendo de la posición de los ejes de esfuerzo:

$R_c = 1/R_e$  cuando  $\sigma_1$  es vertical ( $R > 1$ ) que explica un régimen de distensión.

$R = R_e$  cuando  $\sigma_2$  es vertical ( $0 < R < 1$ ) que explica un régimen de desgarre.

$R = \frac{R_e}{R_e - 1}$  cuando  $\sigma_3$  es vertical ( $R < 0$ ) que explica un régimen de compresión triaxial.

El método incluye dos conceptos clave, los cuales son el tensor media y el tensor moda (Etchecopar *et al.*, 1981), debido a que el método estaba basado principalmente en el cálculo estadístico. En el caso del tensor media se refiere al conjunto de fallas que se forma bajo la acción de un solo esfuerzo que es presentada por un tensor, el cual sufre algunas variaciones normales alrededor de valores medios. A la vez, explica el porcentaje de las fallas. El tensor moda es cuando los tensores son separados por subpoblaciones y se les denomina  $T_1, T_2, \dots, T_n$  en el cual se obtiene uno de los tensores (T) y puede haber dos resultados; 1) que sea equivalente con el Tensor Media ( $T_n = T_m$ ) o 2) que se encuentre un sesgo que evite que se cumpla la regla anterior ( $T_n \neq T_m$ ).

### **El método del diedro recto**

El método está basado en la determinación de los mecanismos focales de sismos (Angelier, 1979; Angelier *et al.*, 1982; Angelier, 1984, Angelier, 1989), debido a que estos pueden provocar fallas de suficiente magnitud, así como el desplazamiento de bloques, además que las zonas de ruptura de las fallas sean resultado de compresión o extensión. El método es aplicado para la determinación de conjuntos o poblaciones de fallas donde debe determinarse las características de un tensor de esfuerzo (Angelier, 1979). El principio de este método es examinar la cinemática de una falla de rumbo (*strike-slip fault*) (ej. en Henry y Aranda-Gómez, 1992) además de obtener un método gráfico sencillo que permite conocer la orientación aproximada de los ejes de esfuerzo en un conjunto de fallas, (siguiendo los principios de fallas de Anderson (Angelier, 1979) (Figura 2), además de que pudiera complementarse con otros métodos (Casas-Sainz *et al.*,

1990). Para eso es necesario la determinación de un radio ( $\Phi$ ) (Angelier, 1984), el cual es dado por la ecuación:

(ecu. 3)

$$\Phi = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

Donde  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  y  $0 \leq \Phi \leq 1$

Además de la dirección de falla es necesario tener un plano auxiliar, el cual es un plano de simetría virtual ortogonal al desplazamiento de la falla, el cual formará lo que son los diedros rectos y los cuatro cuadrantes. Por tradición los cuadrantes son mostrados como una pelota de playa ("beachballs"), los cuadrantes que indican tensión son mostrados en blanco y los de compresión en gris oscuro o rojo; además, son identificados por las letras P (para presión/compresión) y T (para tensión) (Angelier, 1984). La información obtenida en una de los diagramas "beachball" es que el  $\sigma_1$  y el  $\sigma_3$  son localizados en la parte correspondiente a tensión y a compresión, respectivamente. Este método puede usarse en campo, solamente es necesario elaborar el plano auxiliar.

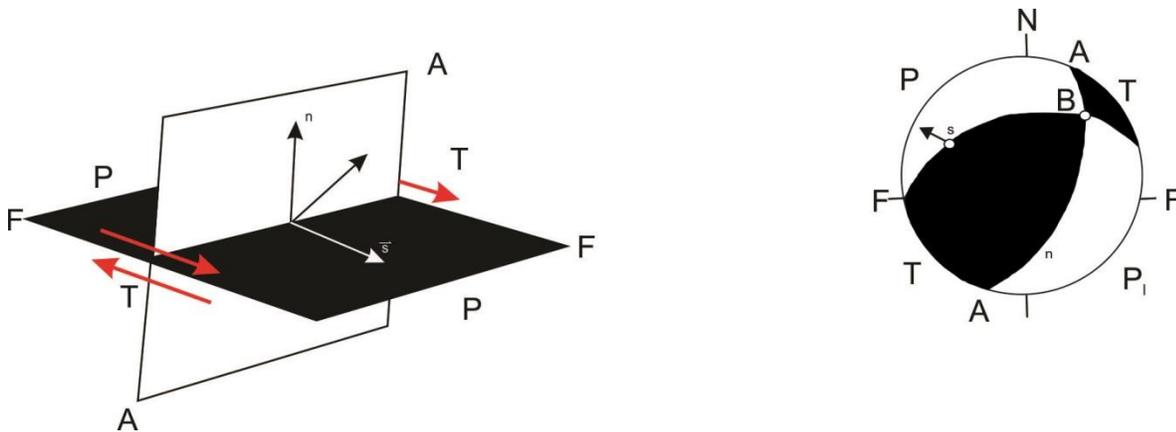


Figura 2 Modelo del método de Diedros Rectos. A la izquierda una vista perspectiva y a la derecha un estereograma "beachball" (color negro indica la tensión y blanco la compresión). F: plano de falla; A: el plano auxiliar; n: unidad vector; s: unidad del deslizamiento del vector (en el caso del estereograma es la estría); B: intersección de los planos de A y F; P: diedro de compresión; T: diedro de tensión (Angelier, 1979).

El problema de este método es que no puede resolver el área del radio ( $\Phi$ ) en muchos casos (Pascal, 2020), además de patrones regionales de mesoestructuras (Reches, 1987). Con el uso de los cuadrantes P y T y su manejo en un programa computacional se obtiene que los valores de 0 corresponden a compresión para todos los mecanismos, al contrario de cuando el valor

tiende a ser 100, para la cual los mecanismos serán exclusivamente de extensión (Angelier, 1984), creados a partir de grupos homogéneos con cinemática compatible (Tranos y Lacombe, 2014).

Métodos como *The Principal Axes Mistif Angle* (PMA) y *Slip Angular* (SM) se basan en diedros rectos y ambos se complementan. El PMA es el ángulo de desviación de los ejes principales entre los tensores calculados e ideales, por su parte, el SM indica la división entre el ángulo de deslizamiento medido en campo y la dirección del esfuerzo que corta en el plano de deslizamiento calculado a partir del tensor que se invierte (Antón et al., 2010; Toro y Osorio, 2005). Con el apoyo de estos dos métodos y el radio de esfuerzo obtenido se puede conocer y reconstruir etapas de deformación (Khanbari y Huchon, 2010) en las cuales se pueden detectar etapas de fallamiento normal, fallamiento de rumbo y regímenes de transpresión.

Otro de los métodos que son basados en los trabajos de Angelier (Angelier, 1979; Angelier *et al.*, 1982; Angelier, 1984, Angelier, 1989) y siguen tanto la teoría de Anderson como la hipótesis de Bott-Wallace son los métodos R4DT e INVD (Método de Inversión Directo), los cuales fueron usados por Hippolyte *et al.* (2012). La diferencia de estos dos métodos está en que el primero utiliza el ángulo  $\alpha$  generado entre los vectores  $S$  y  $\tau$ , mientras que el método de inversión genera un vector resultante entre  $S$  y  $\tau$  que es llamado  $u$ .

Existe otro método parecido y derivado del método de diedros rectos. Este nuevo método es llamado el método del triedro recto. Este método es un refinamiento hecho por Lisle (Pascal, 2020) al Método de Diedros Rectos. En este método aporta con mayor exactitud la localización de los cuadrantes de extensión y compresión ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  respectivamente). En este método se generan dos nuevos cuadrantes (A y B), los cuales limitan la localización de los  $\sigma$  uno y tres (Pascal, 2020).

Alizadeh y Hoseynalizadeh (2017) usan el radio para generar una tabla (Tabla 1) para conocer los tipos de movimiento en sistemas de fallas. Cuando  $\sigma_1$  es vertical se considera un régimen extensional, cuando el  $\sigma_2$  es vertical se considera un régimen de fallamiento a rumbo (Ferentinos *et al.*, 2018,; Lacombe y Lauren, 1996) y cuando el  $\sigma_3$  es vertical se considera un régimen compresivo.

$\sigma_1$ vertical	$0.25 < R < 0.75$	Extensión
$\sigma_1$ vertical	$0.75 < R < 1$	Transtensión
$\sigma_2$ vertical	$0.75 < R < 1$	Transtensión
$\sigma_2$ vertical	$0.25 < R < 0.75$	Fallamiento de Rumbo
$\sigma_3$ vertical	$0 < R < 0.25$	Transpresión
$\sigma_3$ vertical	$0.25 < R < 0.75$	Compresión

Tabla 1 Rangos de valores para determinar el tipo de falla basándose en el radio (Alizadeh y Hoseynalizadeh, 2017).

### El método de optimización rotacional de esfuerzo (optimización rotacional)

El método se basa en aspectos del Método de los Diedros Rectos, usando el radio (R) la extensión radial (valores 0-3) donde:  $R'=R$  para un régimen de extensión (0-1),  $R'=R-2$  para régimen *strike-slip* (1-2) y  $R'=2+R$  para régimen con fallas inversas (2-3). En este método se ocupa el parámetro de calidad (QR), los cuales son dos. El primero es QRw que se basa en una proyección de un mapa mundial de esfuerzos (World Stress Map) con los valores: A (muy bueno), B (bueno), C (medio), D (pobre) y E (malo). El segundo parámetro es QRt el cual es la cualidad de la diversidad de las direcciones de las fallas y la cantidad de lineaciones (estrías) (Miyouna *et al.*, 2018).

## Capítulo 1. Geología regional

### 1.1 La Mesa Central (MC)

El área de estudio se ubica, fisiográficamente, en la provincia de la Mesa Central (MC), la cual se localiza en la parte centro-norte de México, abarcando partes de los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes y Guanajuato (Figura 3). La provincia está dividida en dos partes principales: 1) la parte sur, es una zona montañosa con presencia de rocas volcánicas cenozoicas y 2) la parte norte, en la cual se presentan cuencas continentales que se rellenan con sedimentos aluviales y lacustres y cuya erosión es más evidente (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

Su límite norte está definido por el Sector Transversal de Parras de la Sierra Madre Oriental; el límite Este está definido por el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002); el límite sur por la Falla del Bajío y el graben de Aguascalientes y el límite oeste por el

sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (Loza-Aguirre *et al.*, 2008). En la zona se tiene un claro registro de la presencia de fallas normales debido a diversos procesos de extensión, eventos tectónicos compresionales y presencia de pequeñas cuencas tectónicas tipo “*pull apart*” (Torres-Hernández y Tristán-González, 2015). A la vez, estos eventos están relacionados a los procesos del vulcanismo del Mioceno-Oligoceno en sus diversas etapas, tanto efusivas como explosivas (Torres-Hernández y Tristán-González, 2015), generando (en el área de estudio) campos volcánicos de diferentes características (Tristán-González *et al.*, 2009). En la zona se han registrado eventos de deformación durante el Cenozoico, los cuales están relacionados con el vulcanismo, por lo que en la geomorfología se pueden encontrar diversos cambios de topografía debido al resultado de diversos procesos de deformación con sus evidencias (movimientos extensionales, sistemas de fallas y presencia de fosas) (Nieto-Samaniego *et. al.* 1997).

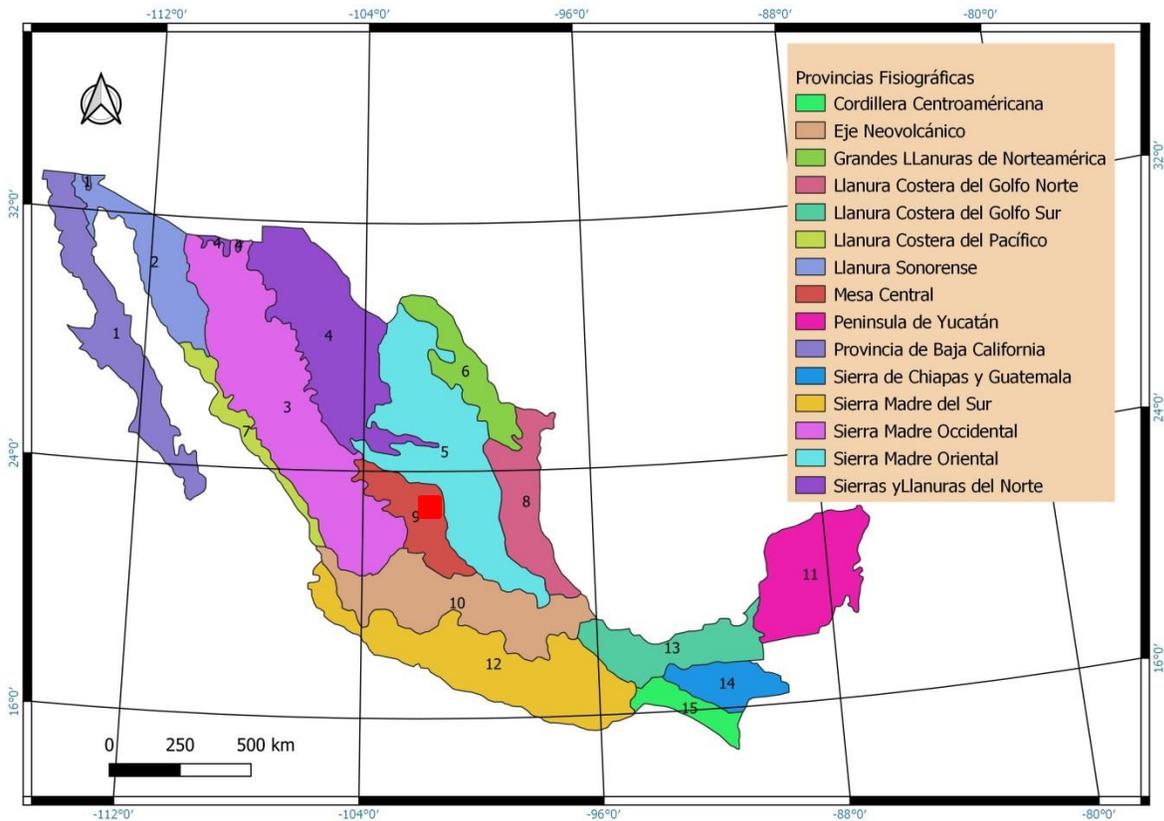


Figura 3 Localización de la Mesa Central (IX) respecto a otras provincias fisiográficas (Gómez-Anguiano y Herrera-Corona, 2012). En el cuadro rojo localización del área de estudio.

Debido a los procesos que se relacionan con la Mesa Central en la zona NE del área de estudio se observa un conjunto de estructuras paralelas entre sí, formando hondos cañones que, en algunos casos, suelen unirse, y cuya orientación es NW-SE. Por su parte norte se puede encontrar estructuras formadas por los mismos procesos pero que se diferencian de las anteriores por no tener formas elongadas de grandes dimensiones, sino que éstas llegan a ser más cortas; de igual manera, presentan la misma orientación (NW-SE) pero son cortadas por otras estructuras con orientación (NE-SW), las cuales se prolongan hasta el Graben de Villa de Reyes (GVR) (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Nieto-Samaniego *et al.*, 1997). Hacia la parte Este, Oeste y Sur del área de estudio se observan conjuntos de estructuras elongadas con la misma orientación predominante (NW-SE). En ellas se llegan a formar series de barrancos y pendientes pronunciadas. Solamente las planicies se localizan hacia el este de Ojo Caliente, y en

el Graben de Enramadas son delimitados por fallas normales y su relleno se compone de la Riolita Panalillo (Labarthe *et al.*, 1982; Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1980).

### **Geología de la Mesa Central**

En la Mesa Central (MC) afloran rocas marinas mesozoicas y rocas procedentes de la actividad volcánica oligocénica (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Las rocas más antiguas presentan evidencias de deformación mesozoica asociadas al evento compresivo de la Orogenia Laramide (Andreani *et al.*, 2014; Torres-Hernández y Tristán-González, 2015). Por medio de estudios tectónicos y modelos sísmicos se ha obtenido los espesores de la corteza en el área de la MC, la cual, en la zona de estudio, es de aproximadamente 32Km (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). El basamento de la MC se constituye de rocas mesozoicas del Terreno Guerrero y del Terreno Sierra Madre en el cual pudiera existir basamento precámbrico (ver Campa y Coney, 1983; Centeno-García, 2017). Las rocas triásicas se pueden encontrar hacia el área de Zacatecas, Real de Catorce, Salinas y Charcas (SLP) (Barboza-Gudiño *et al.*, 2004, Barboza-Gudiño *et al.*, 2010).

Las rocas de edad Jurásico Temprano corresponden a un origen vulcanosedimentario y de areniscas, conglomerados y rocas volcánicas que intercalan con las rocas sedimentarias (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). En este lapso la MC se mantuvo emergida aunque se desconoce por cuanto (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Para el Cretácico se reconocen en la zona tres ambientes marinos: 1) la presencia en la parte oriental de MC de la Plataforma Valles-San Luis (PVSLP) con ambientes arrecifales y cuyas capas están plegadas; 2) la Cuenca Mesozoica del Centro de México (López-Doncel, 2017), el cual abarca la mayor parte de la MC con presencia de clastos con rocas volcánicas (en la Formación Caracol) y 3) en el margen occidental de la MC se deposita una secuencia vulcanosedimentaria marina la cual es una intercalación de rocas sedimentarias con rocas volcánicas (Cuéllar-Cárdenas *et al.*, 2012). Es evidente la deformación en las rocas mesozoicas y toda la zona se ha atribuido a la presencia de un arco volcánico del cual se desconoce su edad con precisión (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Los límites de estos tres ambientes son los sistemas de fallas; San Luis Tepehuanes que corta la Cuenca Mesozoica del Centro de México y la secuencia vulcanosedimentaria y el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende que la PVSLP la Cuenca Mesozoica (Xu *et al.*, 2008).

Durante el Cenozoico en la Cuenca Mesozoica del Centro se observa un cambio de un ambiente marino a continental. Este cambio se observa en la litología la cual se conforma por la presencia de rocas sedimentarias, continentales y volcánicas (Aranda-Gómez *et al.*, 2005; Torres-Hernández, 1998). Durante el Paleoceno-Eoceno se empieza a conformar una topografía abrupta, se desarrollan fosas tectónicas hacia el área de Guanajuato y zonas circunvecinas; es probable que se retomaran estructuras generadas durante la orogenia Laramide (Andreani *et al.*, 2014; Consejo de Recursos Minerales, 1992; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). El vulcanismo efusivo siguió en la zona de San Luis Potosí, Guanajuato y Zacatecas durante el Eoceno (Aranda-Gómez *et al.*, 2005), Consejo de Recursos Minerales, 1992). Durante el Oligoceno la actividad volcánica fue variando al igual que las formas en que se presentaba. La primera parte está representado por rocas volcánicas de composición riolíticas; emplazadas a lo largo de fisuras donde se observan domos y derrames que modificaron la topografía. Posteriormente se tienen etapas de vulcanismo explosivo que depositaron ignimbritas y productos piroclásticos que sobreyacen a las rocas del vulcanismo efusivo. En la parte occidental de la MC se desarrollaron calderas, las cuales están ausentes en otras regiones de la MC (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Hacia el Mioceno el vulcanismo se caracterizó por la presencia de rocas de composiciones máficas; las zonas en las cuales se pueden apreciar estos eventos son en San Luis Potosí, Durango y Guanajuato (Aranda-Gómez *et al.*, 2005). Durante el Cuaternario las cuencas continentales y zonas de baja topografía comenzaron a rellenarse con depósitos lacustres y fluviales, los cuales varían en su estratigrafía en diversas zonas (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

### **Tectónica de la Mesa Central**

La tectónica de la Mesa Central está influenciada por la orogenia Laramide. Esta se debe principalmente al movimiento compresivo que provocó una deformación por acortamiento de finales del Mesozoico inicios del Cenozoico (Cuéllar-Cárdenas *et al.*, 2012), el movimiento tuvo una dirección E-NE el cual se debió principalmente a la subducción de la Placa de Farallón bajo la Placa Norteamericana. Para el territorio mexicano el evento tuvo lugar entre 105-55 Ma (aproximadamente), (Cuéllar-Cárdenas *et al.*, 2012). La orogenia Laramide, para el área de San Luis Potosí (y el área de estudio) ocurrió aproximadamente a los 64 Ma (K/Ar) y (40Ar/39Ar)

evento en el cual las secuencias sedimentarias y vulcanosedimentarias del Cretácico y rocas ígneas del Paleógeno se vieron deformadas (Cuéllar-Cárdenas *et al.*, 2012).

El otro evento denominado *Basin and Ranges* el cual es un desarrollo extensional en el Paleógeno, el cual abarca desde Canadá hasta la Mesa Central y la Faja Volcánica Transversal Mexicana (Aranda-Gómez *et al.*, 2000; Henry y Aranda-Gómez, 1992). Se han propuesto tres hipótesis para el origen del *Basin and Ranges*: 1) procesos intraplacas, 2) procesos subcorticales y 3) mecanismos intraplaca (Neimeyer, 1999). Este es un evento en el cual se crean cadenas montañosas con valles en sus partes intermedias con presencia de sistemas de fallas normales a los valles adyacentes (Hodges *et al.*, 1989). Los bloques fallados que formaron el *Basin and Ranges* basculamientos, con direcciones constantes de inclinación. La MC se encuentra dentro de este sistema y por ello se puede encontrar diversas cadenas montañosas en su amplitud, siendo más visibles en la parte de cercana a la Sierra Madre Occidental en los estados de Guanajuato y San Luis Potosí. La última etapa de la extensión producida por el "*Basin and Ranges*" tuvo lugar en el Cuaternario (Cuellar-Cárdenas *et al.*, 2012).

Los límites de la MC están marcados por sistemas de fallas (Figura 4). El límite sur de la MC es La Falla del Bajío. Esta se compone por fallas con direcciones NW-SE y ENE-WSW, este conjunto de fallas dan a la región una forma aserrada. Por los espesores que presentan los rellenos aluviales se ha considerado que el desplazamiento vertical es de aproximadamente 350-500m (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). La Sierra de Guanajuato también se ve afectada por el sistema de fallas dando un desplazamiento vertical de 1200m, de igual manera fallas presentes en las inmediaciones del cerro del Cubilete y la falla Veta Grande son asociadas al sistema de fallas del Bajío (Andreani *et al.*, 2014; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

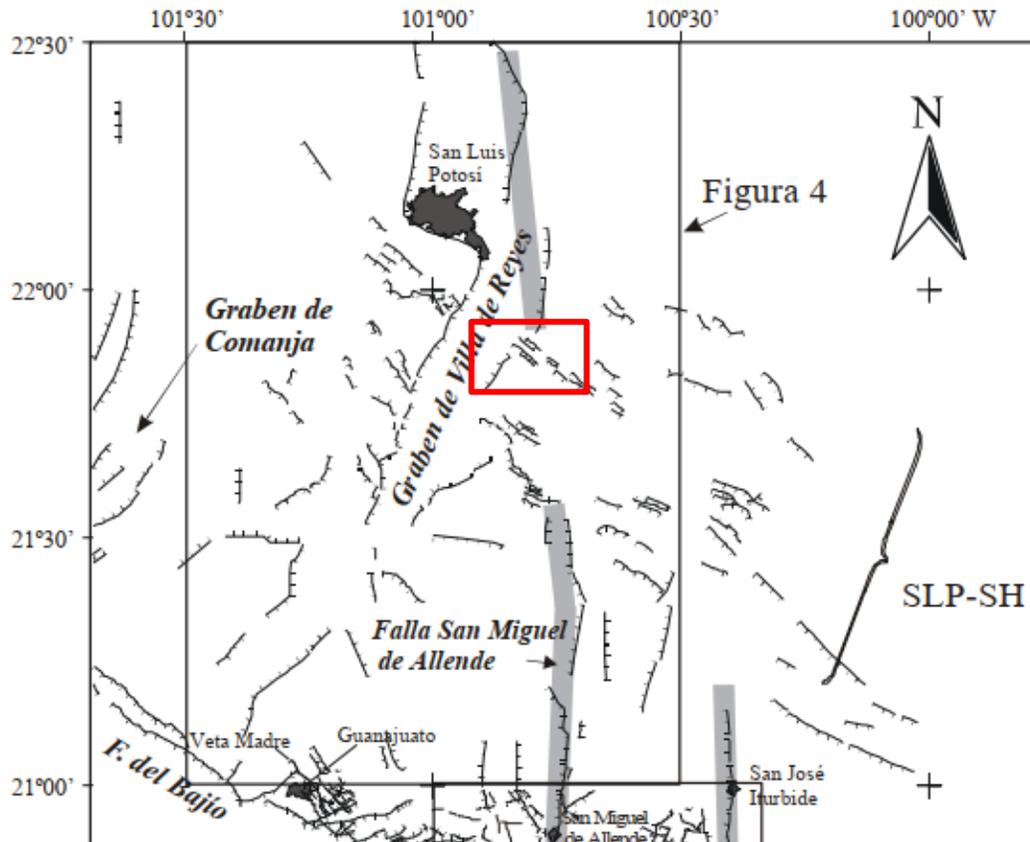
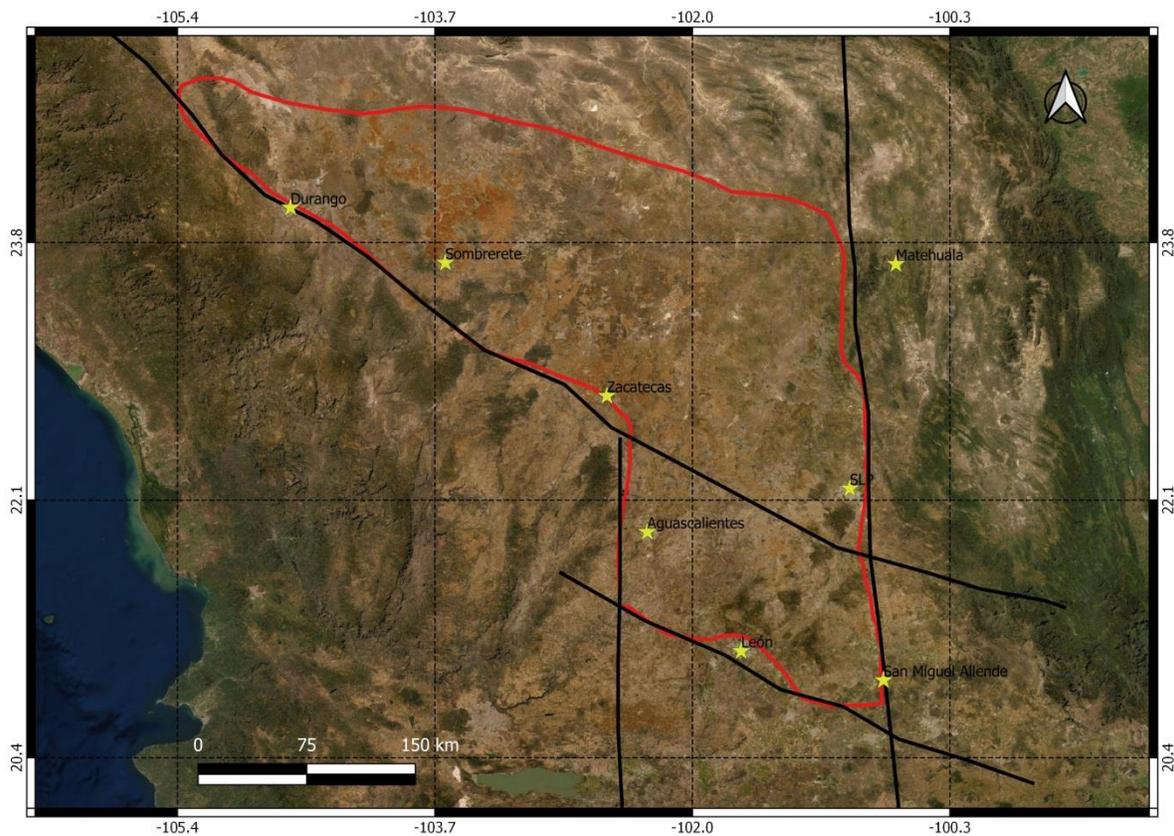


Figura 4 Área de los estados de San Luis Potosí y Guanajuato donde se muestran los sistemas de fallas, las fallas principales así como las principales fosas tectónicas (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). En el recuadro rojo el área de estudio.

El Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) (ver Figura 5 para los sistemas de fallas) limita la parte occidental de la MC, a la vez, en ámbitos paleogeográficos, delimita la Plataforma Valles- San Luis de la Cuenca Mesozoica del Centro de México. Las fallas del Sistema Taxco-San Miguel tienen una orientación norte-sur pasando por los estados de Guanajuato, Querétaro y San Luis Potosí (hasta Real de Catorce). El SFTSMA tiene fallas que se han registrado en tres localidades: 1) Sierra de Catorce con fallas con dirección ~N-S con buzamiento hacia el oeste; 2) Graben de Villa de Arista con presencia de fallas normales y con actividad durante el Oligoceno y 3) entre San Miguel Allende y Querétaro hay presencia de fallas normales con alargamiento este-oeste (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2008).

El Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes presenta una orientación NW-SE con buzamientos hacia el SW. Se aprecian entre San Luis de la Paz y Santa María del Río. Otras fallas (tipo domino (Andreani *et al.*, 2014)) son visibles hacia la parte de la Sierra de San Miguelito. Fallas con la

misma dirección (NW-SE) se han documentado hacia Zacatecas. Estas fallas son a la vez, cortadas por fallas con dirección norte-sur obteniendo la forma de un pilar tectónico. Otras fallas con la misma dirección se registraron en Sombrerete (dirección NW-SE). Hacia la zona de Durango se tiene presencia de fosas tectónicas con fallamiento normal (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Además de estos tres sistemas de fallas, existen numerosas fallas a lo largo de la MC las cuales tienen diversas direcciones; N-S, E-W, NW-SE, NE-SW (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005: Nieto-Samaniego *et al.*, 1997) con diferentes ángulos de buzamiento, las cuales hacen que la configuración estructural de la MC sea compleja.



**Figura 5** Mapa que muestra la Mesa Central (en rojo) y los sistemas de fallas que la delimitan (líneas negras) así como las localidades principales más cercanas (estrellas amarillas). Modificado de Nieto-Samaniego *et al.* (2005).

En la Falla San Luis-Tepehuanes se localiza una zona que no presenta deformación pos-laramídica (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Posterior a eso se registró una fase extensional lo que provocó un alargamiento en la MC con dirección NE-SW. Durante la última etapa de vulcanismo

de la MC, fallas profundas permitieron el ascenso de magmas provenientes del manto (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Nieto-Samaniego *et al.* (1997) propone que la tectónica que ocurrió en la MC a un evento térmico-magmático producido por las rocas volcánicas, esto provocó que la MC se elevará hasta su mayor punto y posteriormente con la deformación cenozoica se produjo una deformación triaxial a través de planos preexistentes. Por su parte, Torres-Hernández (2009) considera dos eventos de extensión, y Andreani y colaboradores (2014), mencionan que son eventos sincrónicos los que están llevando a cabo durante el evento extensional en el área de la Mesa Central correspondiente al área de San Luis Potosí y Guanajuato. Andreani *et al.* (2014) hace mención que la rotación de los bloques que se encuentra en esta área se produjo entre 30-27 Ma, lo cual corresponde a la mayoría del vulcanismo del Oligoceno. En el análisis estructural de su trabajo se indica que las fallas tienen componentes laterales izquierdos y en algunos casos hay presencia de componentes laterales derechos pero que estos son muy pocos. En el Graben de Bledos Las fallas con dirección NE son normales, en las fallas con dirección NW se encontró un movimiento lateral izquierdo en menor grado y un movimiento de deslizamiento en las fallas con direcciones NW y NE (Andreani *et al.*, 2014). Esto es un buen indicador para los grabens cercanos o paralelos al Graben de Bledos, ya que puede tener claves para el comportamiento de los otros grabens.

## **Capítulo 2 Geología y Estructura del Graben de Enramadas**

### **2.1 Ubicación**

El área de estudio se localiza hacia el sureste (~27km) de la capital de San Luis Potosí y al norte del municipio de Santa María del Río (~10km) (Figura 6). En el área de estudio se localizan varios poblados importantes como lo son Enramadas, San Juan Capistrán, Cerro Prieto, El Toro, Ojo Caliente, El Huizache y el municipio de Santa María del Río (Figura 7). Las principales vías de comunicación son: la Carretera Federal No. 57 que conecta la capital potosina con los principales poblados y sigue hacia el sur con dirección a los estados de Guanajuato y Querétaro. Existen diversas carreteras secundarias que conectan los poblados así como varios caminos de terracería y brechas que cumplen la misma función. Algunos no han sido cartografiados o no aparecen en los mapas debido a su reciente construcción.

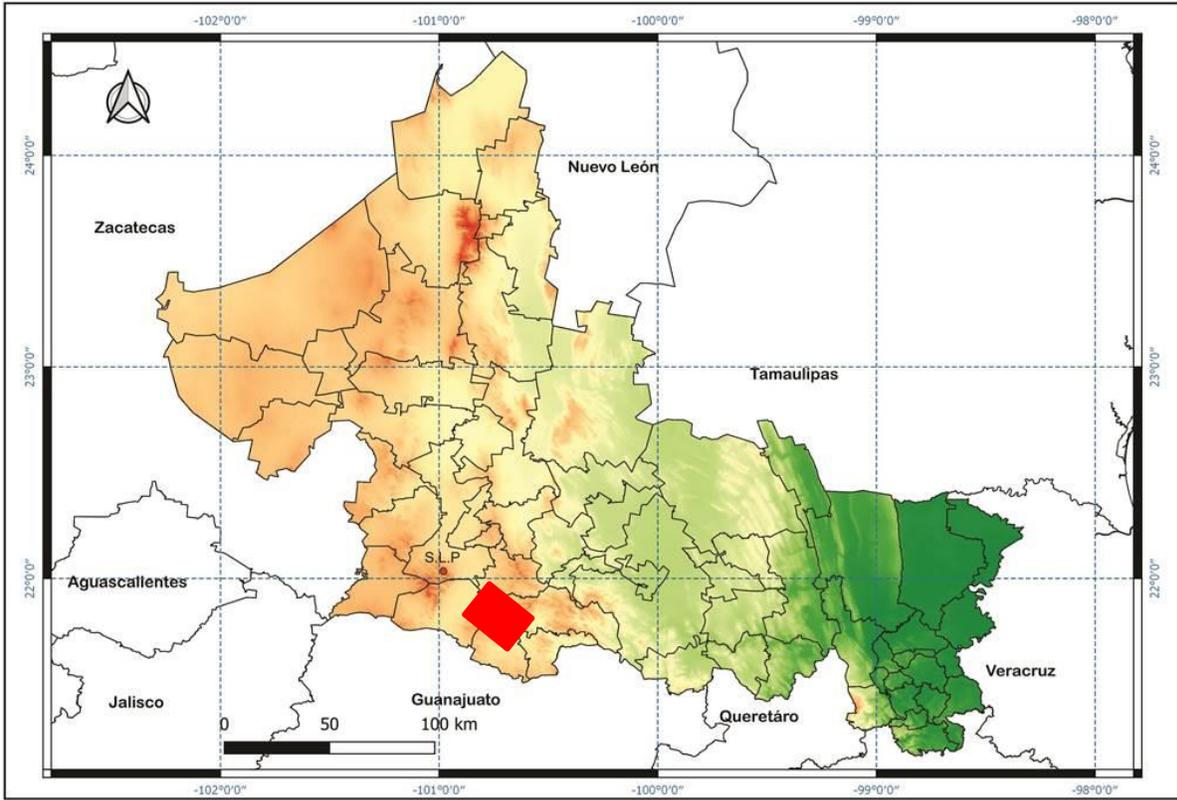
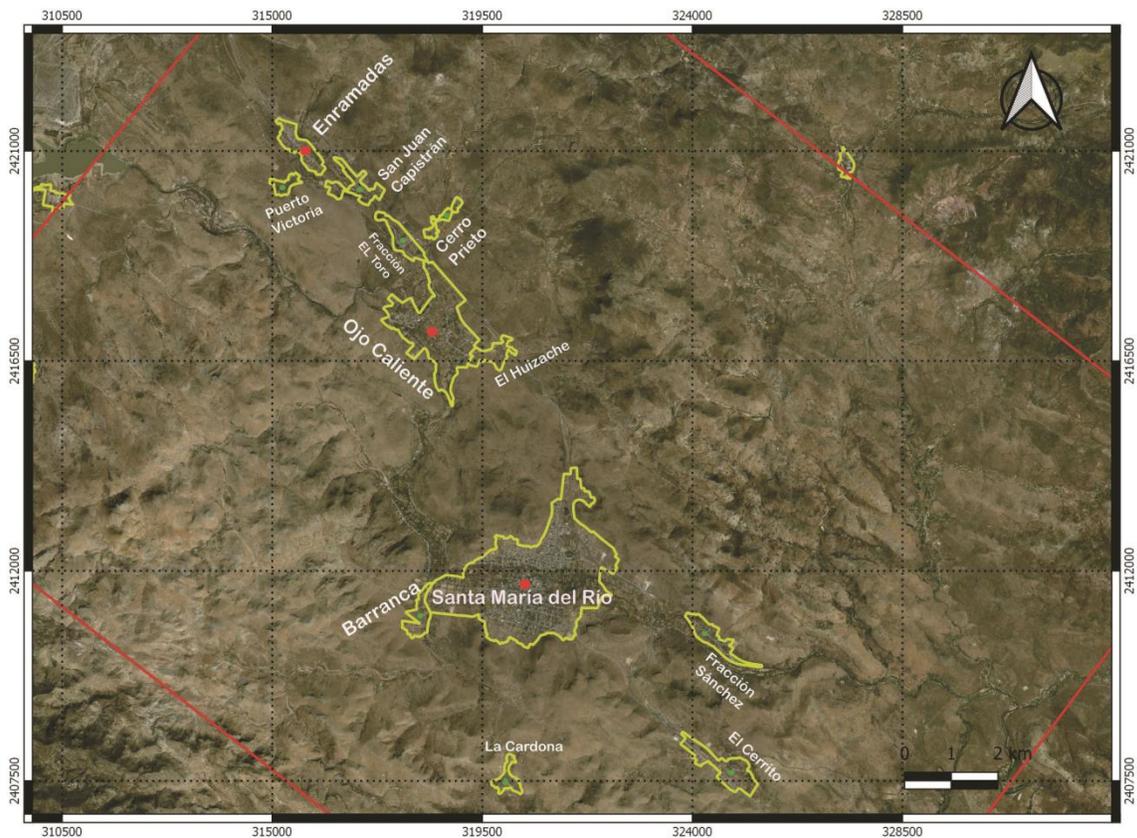


Figura 6 Mapa de San Luis Potosí, en el cuadro rojo la delimitación del área de estudio.

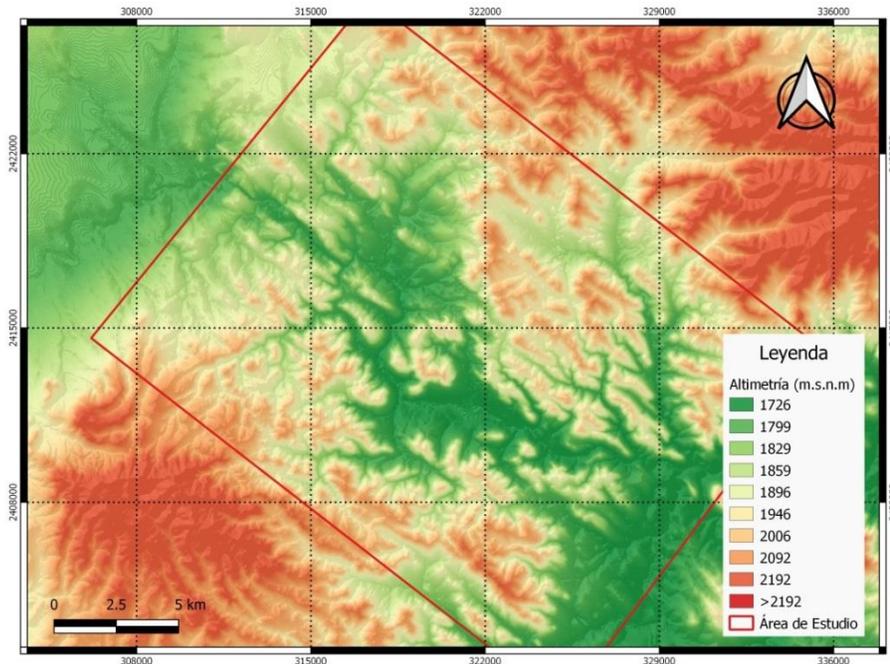


**Figura 7** Mapa que muestra las principales localidades. Las localidades están delimitadas por la línea amarilla, las que presentan puntos rojos son localidades principales y las de punto verde son localidades menores.

La geomorfología del área está compuesta principalmente por un sistema de elevaciones alargadas con dirección NW-SE. La altitud de las elevaciones se encuentra entre los 2130 y 1749 m.s.n.m. en la parte E del área, donde se localiza un sistema montañoso con una altitud máxima que llega hasta los 2230 m.s.n.m. La topografía es más abrupta hacia el este, hacia el oeste en el hombro del graben, y hacia el NW (Figura 8).

Las únicas partes planas corresponde a los valles intermontanos delimitados por fallas. Estos valles son ocupadas por los poblados actuales, Santa María del Río, Ojo Caliente, Enramadas, San Juan Capistrán, Fracción El Toro y Fracción Sánchez. Hacia el oeste se encuentra una cadena montañosa cercana a la zona, la cual se constituye por un conjunto de elevaciones que varían en altitud llegando hasta los 2371 m.s.n.m. La principal elevación es el Cerro Blanco, que es elongado con orientación NW-SE. El área muestra madurez temprana conforme al ciclo geomorfológico, donde las montañas muestran cimas semi-redondeadas, y solo son

importantes los escarpes en los frentes de falla, las cuales muestran incipientes desgastes de sus cantiles por procesos de erosión (Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1978). Hacia el noroeste se localiza un valle relleno de aluvión, principalmente localizados en el Graben de Villa de Reyes, a diferencia del resto del área que esta cubierta por rocas volcánicas del Oligoceno, asociados a vulcanismo efusivo y explosivo (Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1980).



**Figura 8** Mapa de altimetría del área de estudio, se observa en verde las zonas más bajas (planicies) y en rojo las zonas mas elevadas (serranías, cerros, etc).

El sistema de corrientes de agua está influenciado por la topografía, y por un fuerte control por el fallamiento, aunque en general, a grosso modo semeja un patrón de corriente dendrítico, controlado principalmente por el fracturamiento y fallamiento (Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1980), (Figura 9) algunas de las corrientes de agua se localizan sobre las fallas principales (pueden ser visibles tanto en imagen satelital como en campo). Las corrientes al deslizarse por las laderas de las elevaciones crean diferentes sistemas; desde intermitentes a perennes. Las corrientes principales siguen la traza de algunas de las fallas mayores. La concurrencia de la mayoría de las corrientes coincide en áreas de inundación (Keller y Blodgett, 2007; Longwell y Flint, 1965; Tarbuck y Lutgens, 2005).

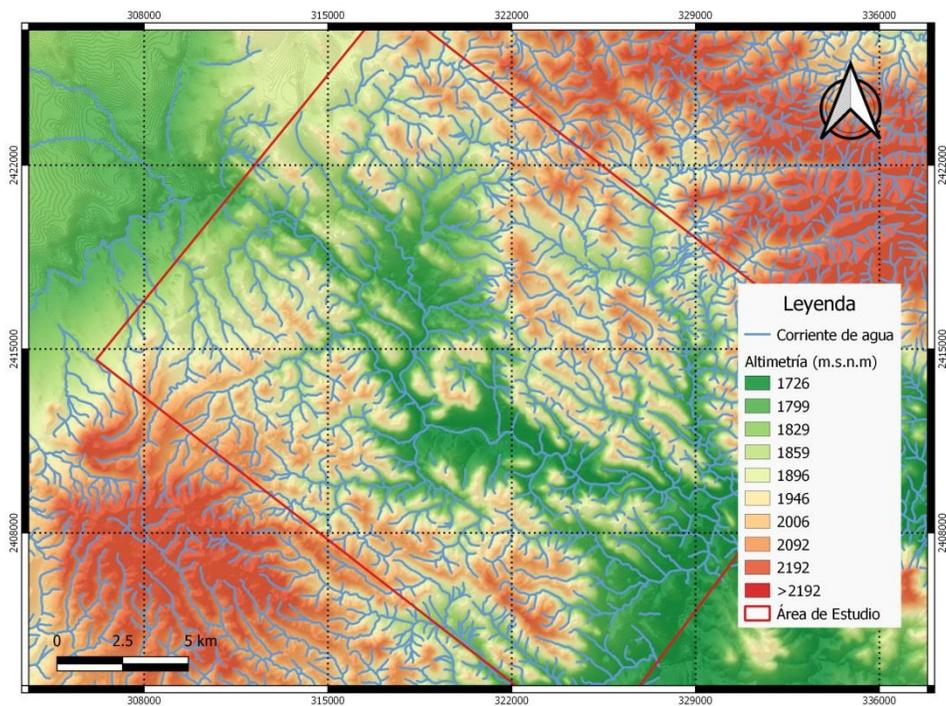
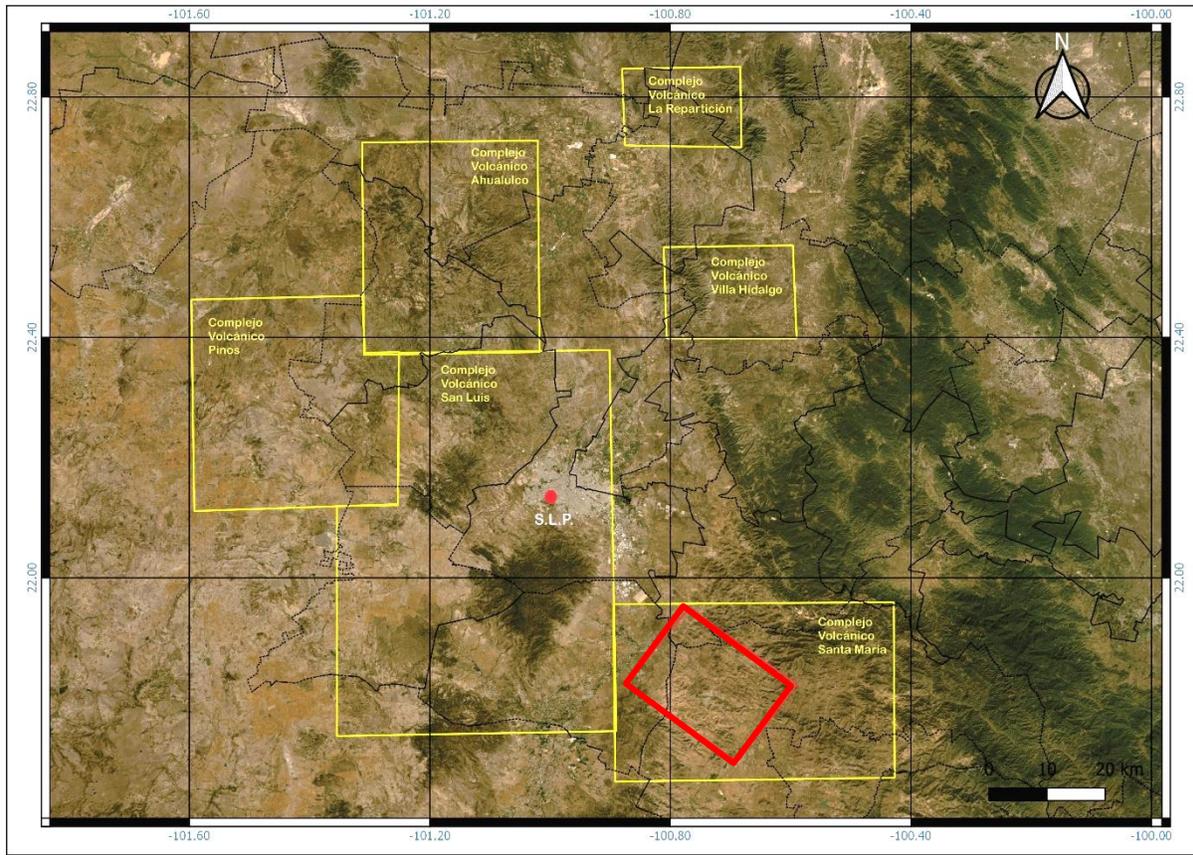


Figura 9 Mapa del patrón de corrientes del área de estudio. Se observa el patrón dendrítico que coincide con las zonas de baja elevación.

## 2.2 Complejo Volcánico Santa María

El Complejo Volcánico Santa María forma parte, junto con los complejos volcánicos de Sierra San Miguelito, Pinos, Ahualulco, Villa Hidalgo y La Repartición, del denominado Campo Volcánico de San Luis Potosí (Tristán-Gonzalez *et al.*, 2009) (Figura 10). Las rocas que afloran están relacionadas a un vulcanismo que ocurrió en el Cenozoico, desde el Eoceno (44 Ma) (Labarthe- Hernández *et al.*, 1982), hasta el vulcanismo del Mioceno que se presenta con el final del evento de Cuencas y Sierras, sellado por el Basalto Las Cabras (21.5 Ma.) (Labarthe- Hernández *et al.*, 1982). Este paquete volcánico descansa sobre paquetes de rocas mesozoicas de origen marino (formaciones Indidura y Caracol) (Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1980; Labarthe-Hernández *et al.*, 1982).



**Figura 10** Mapa de los complejos volcánicos del campo volcánico de San Luis Potosí (Modificado de Tristán-González *et al.*, 2009). En el cuadro rojo el área de estudio.

A la vez, el Campo Volcánico de San Luis Potosí pertenece a la provincia Cuencas y Sierras. En esta provincia se tiene la evidencia de un fallamiento extensional con fallas normales con de orientación NW-SE, e inclinaciones de  $45^\circ$  a  $60^\circ$ , al SW. Dichas fallas delimitan bloques hundidos y levantados (grabens y semi-grabens), prevaleciendo un arreglo de tipo domino (Labarthe Hernández y Jiménez-López, 2003; Xu *et al.*, 2004; Torres-Hernández, 2009) (Figura 11). Este sistema es cortado por una falla mayor de orientación NE-SW que delimita al GVR en su parte oeste (Torres-Hernández, 2009).

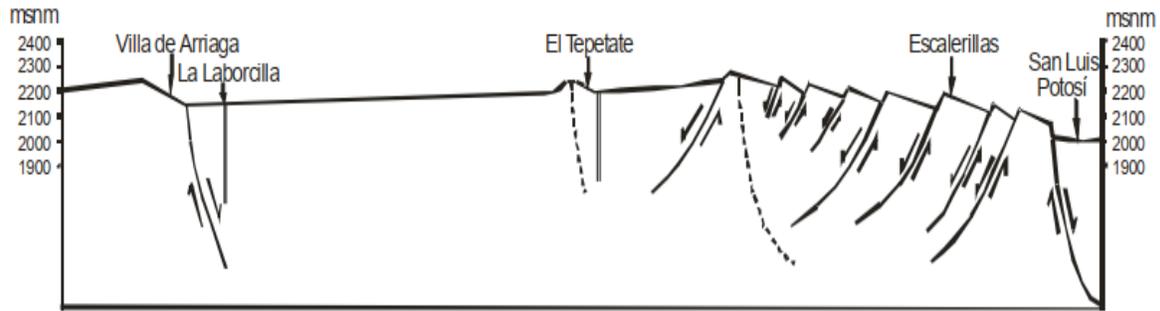
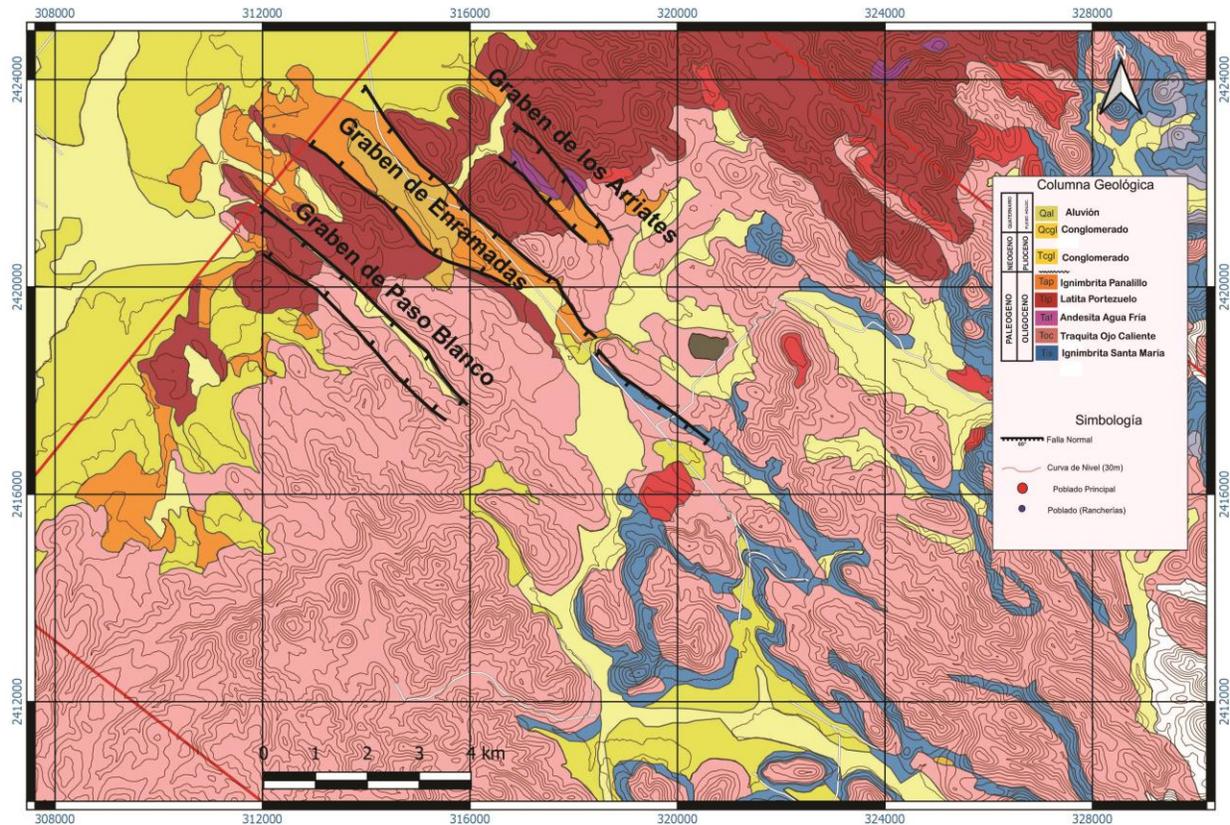


Figura 11 Arreglo de fallas tipo domino (derecha) de un área próxima al este del área de estudio (Torres-Hernández, 2009).

En la zona del Complejo Volcánico Santa María se ha propuesto una deformación debido al fallamiento que se dio de manera triaxial durante el Oligoceno-Pleistoceno (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997), en la cual se formaron fosas y pilares tectónicos, a la par se formaron otras fosas menores con tres direcciones preferentes: N-S, NE-SW y NW-SE (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Nieto-Samaniego *et al.*, 1997). En la margen oeste de la Sierra de San Miguelito se han documentado fallas con arreglos romboédricos con actividad sincrónica el cual está relacionado con la intersección del Graben de Villa de Reyes e inclusive en este (Andreani *et al.*, 2014). En esta zona se han detectado dos eventos de deformación: 1) el emplazamiento de domos a lo largo de las fallas y 2) los emplazamientos de la Ignimbrita Cantera y la Panalillo (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Torres-Hernández, 2009).

Las sierras que se encuentran en la zona de estudio, que forma parte del Complejo Volcánico de Santa María (Tristán-González *et al.*, 2009), están formadas por secuencias de rocas volcánicas, de naturaleza tanto efusiva como explosiva, con presencia de fallas escalonadas con presencia de dos sistemas de fallas perpendiculares entre sí (Aguillón-Robles *et al.*, 2003; Labarthe *et al.*, 1982; Labarthe y Tristán, 1980). En este complejo son visibles tres fosas tectónicas. Los grabens de Enramadas, Paso Blanco, y, Los Arriates (Figura 12), los cuales, en la mayoría de los estudios anteriores se ha establecido que son producto de un fallamiento normal (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982, Montoya, 2011). En su mayoría, las estructuras que se han localizado son fallas normales la mayoría con dirección NW-SE con buzamientos hacia el SW y NE.



**Figura 12 Mapa de los principales grabens presentes en el área de estudio, todos indicados con un fallamiento normal (Modificado de Montoya, 2011).**

La historia tectónica del área de estudio se presenta a nivel regional, a lo largo del campo volcánico de San Luis Potosí. Se tiene evidencia, a partir de la presencia de deformaciones y fallas en dirección NW-SE (Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1978; Labarthe-Hernández *et al.*, 1982). Labarthe-Hernández y Tristán-González (1980) documentaron fallas con dirección NW-SE (310°), con buzamiento hacia el NE que basculan las secuencias volcánicas 15° a 20° al NE (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982) y se presentan fallas escalonadas cercanas a la carretera actual. Otras de las fallas que Labarthe-Hernández y Tristán-González (1980) documentaron es la falla NE-SW (40°) la cual se encuentra sobre parte del arroyo de Enramadas. El fracturamiento más conspicuo se localizó cerca de Santa María del Río, y corresponde a fracturas con dirección oeste-este.

### **2.3 Estratigrafía del área de estudio.**

Las rocas cretácicas más antiguas que se observan en el área de estudio pertenecen a la Formación Indidura (Ksi) (Cenomaniano-Turoniano) y Caracol (Ksc)(Coniaciano-Maastrichtiano) (Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1978) investigada por primera vez por Bose en 1906 (González-Arroyo y Salas-Vázquez, 1996) la cual Kelly describió en 1936 en la localidad tipo ubicada en Delicias, Coahuila (Tristán- González y Torres-Hernández, 1994) se caracteriza por la presencia de calizas, lutitas y lajas de caliza. Se divide en 2: Ksi<sub>1</sub> consta de calizas arcillosas de tonalidad gris con vetillas de calcita; Ksi<sub>2</sub> es una alternancia de calizas gris oscuro con lutitas verdosas.

La Formación Caracol (Ksc) Coniaciano-Maastrichtiano) descrita por Imlay (citado en Ocampo-Díaz *et al.*, 2016) en el arroyo Caracol en la Sierra de San Ángel en Parras, Coahuila donde la describe como tobas desvitrificadas, lutitas y calizas de grano fino con tonalidades gris-verdoso (Ocampo-Díaz *et al.*, 2016), la arenisca presenta feldespatos y muscovita en una matriz calcárea además de la presencia de cuarzos (Labarthe *et al.*, 1982; Rodríguez-León, 2012). Sobreyace a la Formación Indidura de manera discordante y transicional. Es la formación más joven del paquete de rocas mesozoicas y es correlacionada con las formaciones Cárdenas y Tamasopo (PVSLP). Su ambiente de depósito corresponde a un depósito transgresivo tipo *flysh* (Orue-Etxebarria *et al.*, 2012) de agua profunda (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982).

Las rocas cretácicas, las cuales representan la base de las rocas volcánicas, afloran en la parte NE del área de estudio.

#### **Ignimbrita Santa María (Tis)**

Es una ignimbrita soldada de tonalidad grisácea a rosada de una textura porfírica con presencia de pómez colapsada con forma columnar, presenta cuarzo y sanidino. Sobreyace a los sedimentos clásticos del Paleógeno junto al derrame de Ojo Caliente. Esta unidad se presenta en forma de una toba de grano fino no soldado de tonalidad rosada además de un vitrófido bien estratificado. Sobreyace a la Formación Cenicera y andesita Casita Blanca; subyace a la

Traquita Ojo Caliente (Aguillón-Robles *et al.*, 2003; Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Tristán-González *et al.*, 2009).

La edad correspondiente a esta ignimbrita es del Oligoceno con 32.5 Ma. Aflora en las cercanías del Graben de Villa de Reyes, siendo su localidad tipo en el Cerro El Original (Jasso-Lara, 2015; Labarthe-Hernández y Tristán-González; 1980; Labarthe *et al.*, 1982).

La distribución de la Ignimbrita Santa María tiene dos principales puntos de extensión considerable. El primero de ellos en el Este, junto con unas extensiones lineales hacia el Sur. En el centro del área de estudio se localiza otra exposición de la ignimbrita junto a exposiciones por falla en el sureste. (ver Figuras 13 y 14 a partir de aquí para la estratigrafía).

### **Traquita Ojo Caliente (Toc)**

La litología expuesta corresponde a un derrame lávico de tonalidad gris claro a café grisáceo de textura porfirítica, holocristalina, inequigranular y fluidal con presencia de zonas brechosas; en la base de la traquita se presentan vitrificados. Hay presencia de material brechoso y líneas de fluidez. Sobreyace a la Ignimbrita Santa María (Tis), sobreyace discordante a la Formación Cenicera. Subyace a la andesita y a la Latita Portezuelo. Aflora en el SE del Graben de Villa de Reyes y su localidad tipo se encontró en el poblado de Ojo Caliente (Santa María del Río).

En el área de estudio cubre arriba del 60%, se encuentra distribuida por la parte oeste, el centro-este y hacia el norte. Su edad es del Oligoceno Medio con 31.8 Ma (Labarthe-Hernández *et al.*, 1984).

La distribución de la Traquita Ojo Caliente abarca la mayor parte del área de estudio, siendo la unidad litológica dominante. Solamente tiene menor presencia hacia el este y en NW (donde se presentan otras unidades litológicas).

### **Andesita Agua Fría (Taf)**

Labarthe-Hernández y Tristán-González (1980) la nombran como Andesita-Basalto. Aguillón Robles y colaboradores (2003) más tarde le pondrían en nombre de andesita Agua Fría. La andesita se suele encontrar en la parte N-NW del CVSM y en algunas zonas de la parte NE. Subreyace discordante a la Traquita Ojo Caliente en forma de casquetes debido a fracturas (Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1980) y subyace a la latita Portezuelo. La edad estimada es de 29 Ma (K-Ar) (ver en Montoya-Castillo, 2011).

La Andesita Agua Fría (Taf) se encuentra en pequeñas extensiones en el oeste y norte del área, siendo rodeadas por la Traquita Ojo Caliente. En el área de estudio aflora principalmente al sureste del graben de Los Arriates.

### **Latita Portezuelo (Tlp)**

La Latita Portezuelo es un derrame lávico de color café grisáceo, presenta una textura holocristalina, inequigranular, porfirítica con presencia de minerales accesorios. El intemperismo hace que la textura se haga arenosa. Se ha clasificado como una roca riolítica rica en K, sobreyace a las formaciones del Mesozoico y subyace a la Riolita San Miguelito mediante el contacto con un vitrófido; a la Ignimbrita Cantera por una toba y a la Riolita Panalillo (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982). La Latita Portezuelo tiene una edad de 30.6 Ma (Labarthe-Hernández, 1982).

La Latita Portezuelo se localiza en la parte oeste en tres zonas de similar extensión. No se observan en otras partes del área. Las zonas de la Tlp tienen una orientación NW-SE, se encuentran rodeados por conglomerados y por la traquita (Toc).

### **Ignimbrita Panalillo (Tap)**

La Ignimbrita Panalillo descrita por primera vez en la hoja San Luis Potosí por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978) y en la Hoja Tepetate por Tristán-González y Labarthe-Hernández (1979). En este Complejo Volcánico de Santa María se compone de tres miembros (Labarthe y Tristán, 1981): miembro inferior, miembro intermedio, y miembro superior. El miembro inferior se compone principalmente de una toba bien estratificada con textura fina y con una tonalidad crema. El miembro intermedio se compone de una ignimbrita de tonalidad café grisácea, está consolidada, y presenta fragmentos delgados de pómez. El miembro superior es una ignimbrita riolítica de tonalidad café con una textura fluidal que se observa en la matriz. La ignimbrita Panalillo Inferior aflora principalmente en el área del Graben de Enramadas, tiene una edad de 28 Ma (Torres-Hernández *et al.*, 2006). Se ha encontrado que entre esta ignimbrita y las lavas originadas por el vulcanismo fisural paso un tiempo considerable (~5 Ma) (Torres-Hernández *et al.*, 2006). Su edad la ubica en el Oligoceno. esta unidad Xu *et al.* (2004) proponen que las fuentes de emisión para la Ignimbrita Panalillo Inferior se deben a estructuras asociadas a fallamiento lateral.

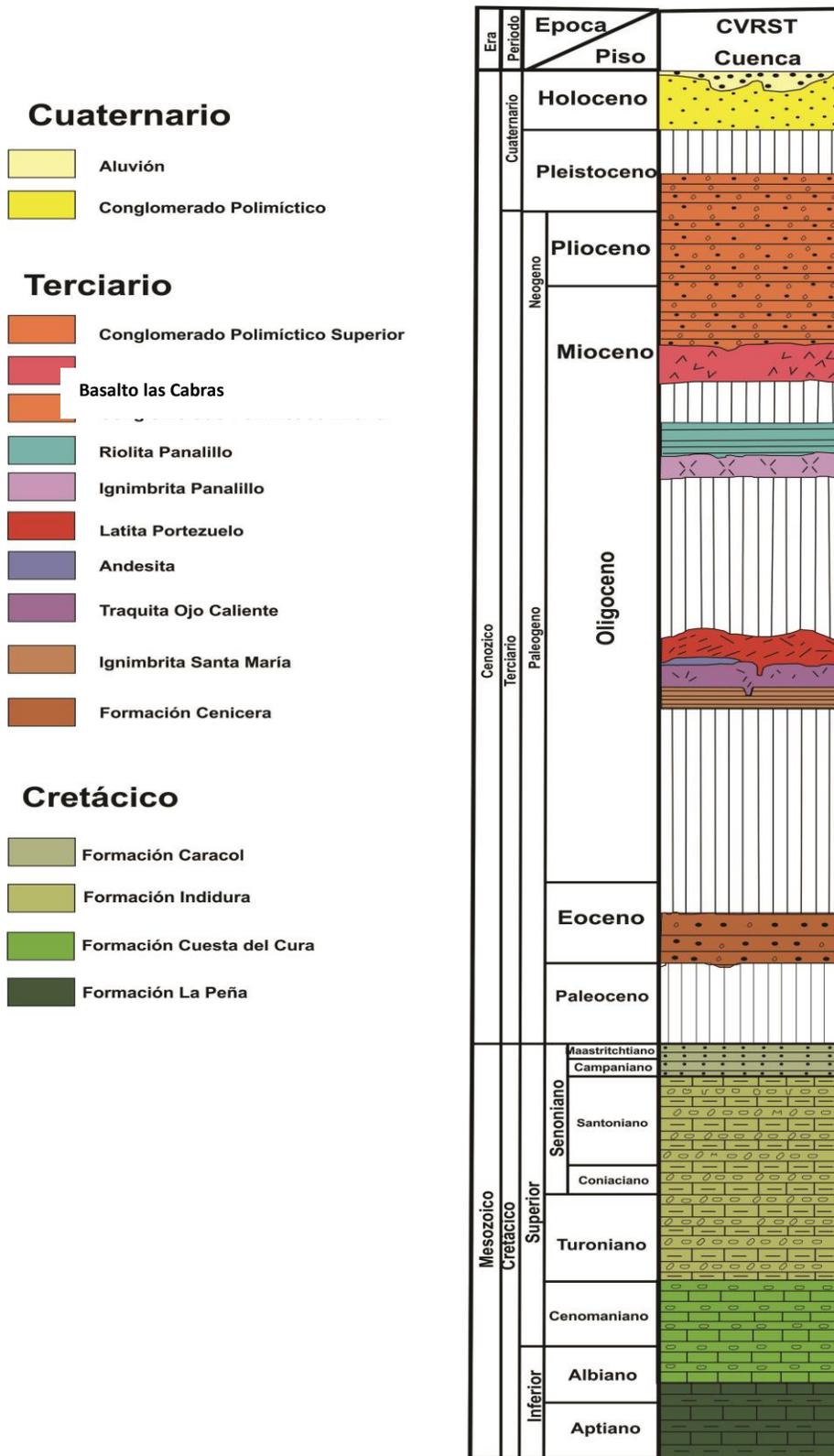


Figura 13 Tabla estratigráfica de las unidades cercanas al Graben de Enramadas (Modificado de López-Loera y Tristán-González, 2013).

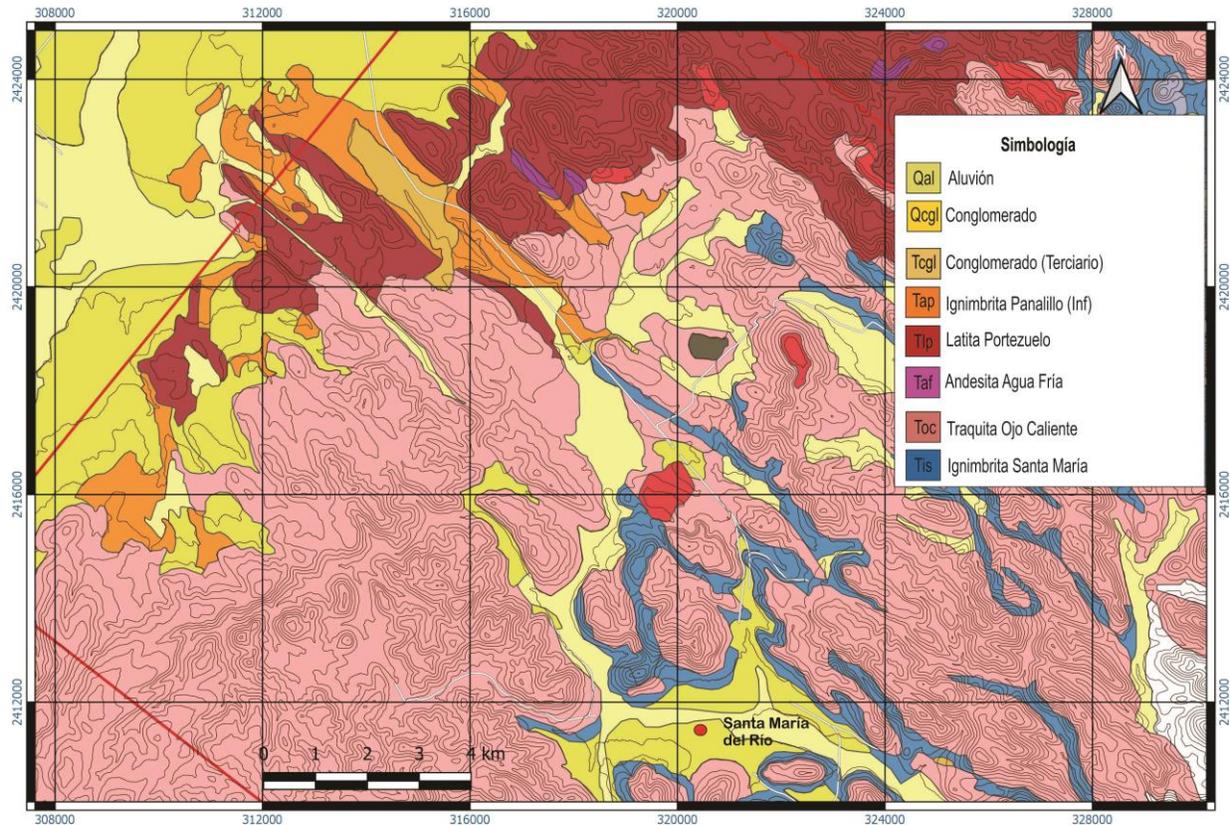


Figura 14 Mapa que muestra la extensi3n en el 3rea de estudio de las diferentes unidades litol3gicas. (Modificado de Trist3n-Gonz3lez *et al.*, 2009).

### Cap3tulo 3 Resultados del an3lisis estructural

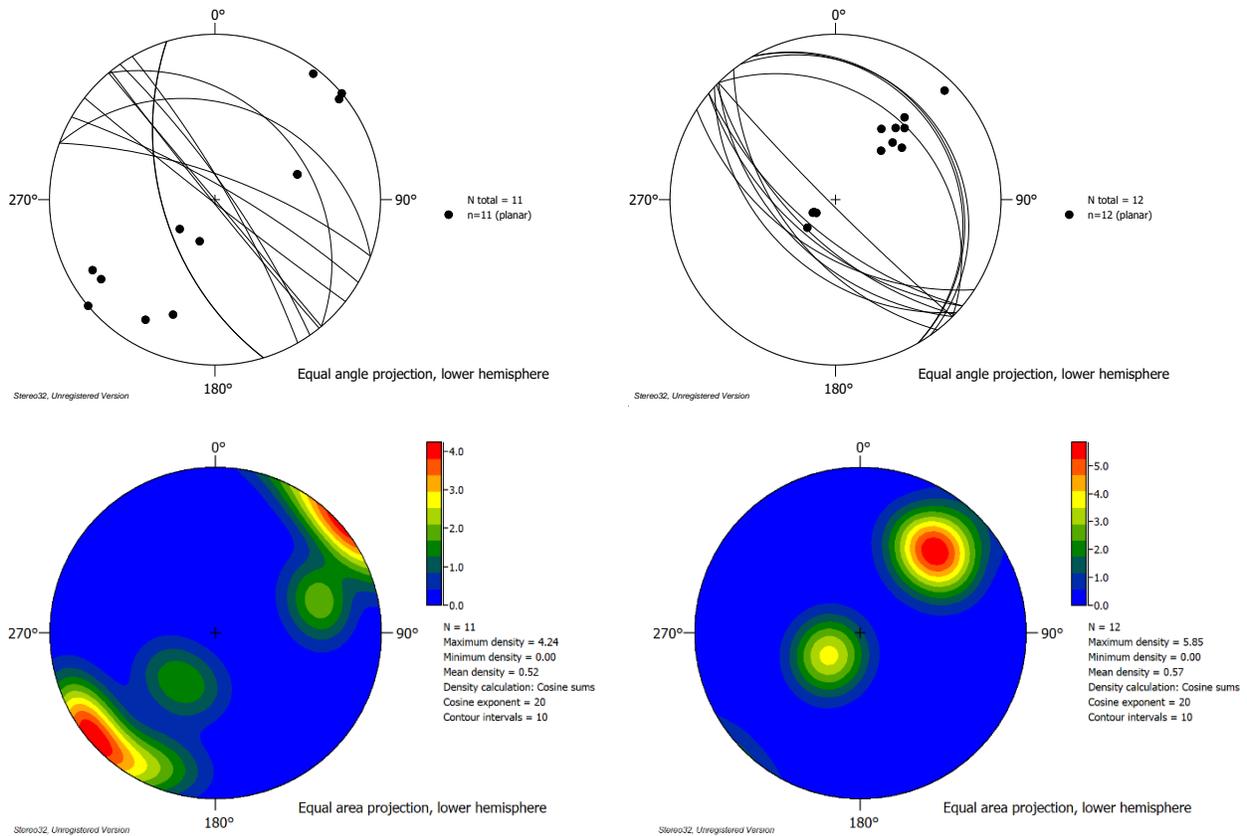
En el 3rea de estudio se observan dos zonas con sistemas de fallas que se manifiestan en la expresi3n morfol3gica de la regi3n, que forman fundamentalmente un sistema NW-SE, a nivel mesosc3pico se observan, tanto las trazas de los planos de fallas, indicadores cinem3ticos, fracturas, y diques, los datos fueron trabajados en el programa Stereo32 (R3ller y Trepmann, 2003-2008), con lo cual se obtuvieron tanto la red estereogr3fica as3 como la densidad de la distribuci3n y el programa Faultkin (Allmandinger, 2016), que en primera instancia ayudo a la separaci3n la cual consisti3 en separar por direcciones los planos de falla, as3 como las estr3as por el 3ngulo, haci3ndose tres grupos.

El análisis se enfoca en dos zonas la primera es el área del GE donde se centra el estudio y el otro una zona que se localiza al NE-E de Santa María del Río donde se localizaron sistemas de fallas con direcciones similares a la zona del GE que deforman a distintas litologías del área de estudio.

Las fallas Enramadas y San Juan Capistrán son las fallas que delimitan el graben presentan una orientación NW-SE, en la falla Enramadas presenta un buzamiento de 76°. En el caso de la falla San Juan Capistrán el buzamiento es de 72°. Hacia el NW del poblado de Ojo Caliente en el cual se aprecia como la falla se cierra casi hasta tocar la falla N (Figura 15). (A partir de aquí revisar mapas anexos).

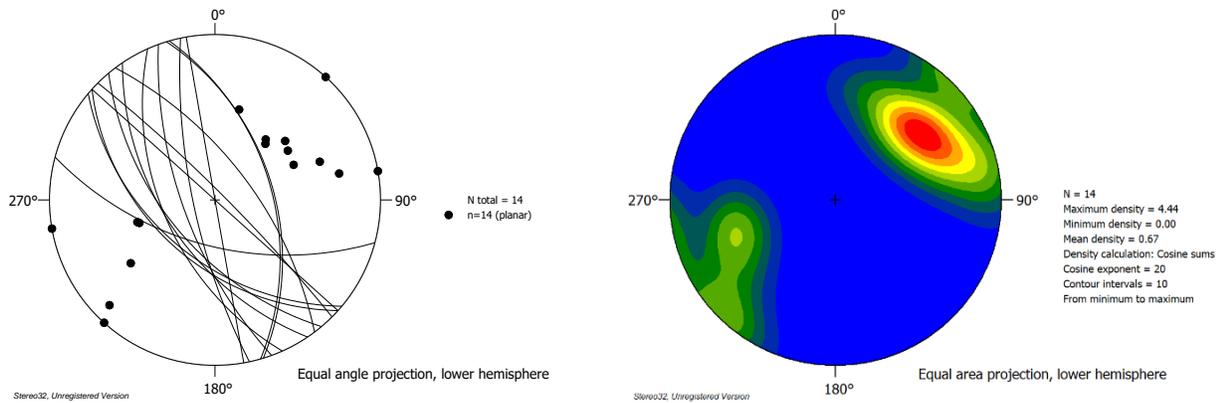
### **3.1 Fallas que delimitan al graben.**

En la falla Enramadas las estrías medidas indica un fallamiento normal con valores entre 80°-90°. Las estrías medidas al SE sobre el plano de la falla presentan inclinaciones entre 50° y 90° en sentido horario. No se observaron superposición las estrías por lo que no se puede hablar de varios eventos (Quintero-Lagorreta, 2002). En el caso de esta falla las variaciones en grados no afecta su dirección y a diferencia de la falla San Juan Capistrán, la falla Enramadas se prolonga hasta cerca de Santa María del Río. En el caso de esta falla no hay grandes inflexiones en su trayectoria, la cual se mantiene más o menos regular hasta el poblado de Cañada de Yañez al NE de Santa María del Río.



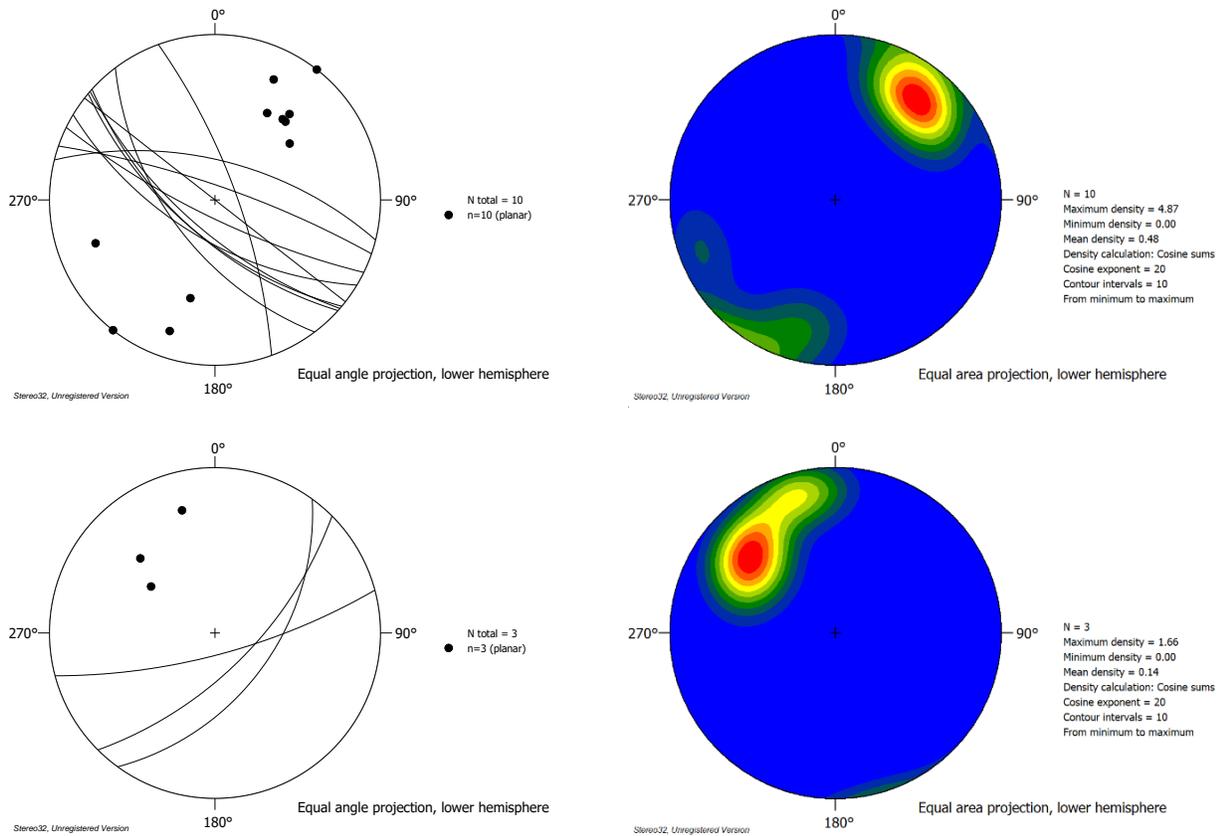
**Figura 15. Estereogramas de las fallas Enramadas y (a la derecha) y San Juan Capistrán (a la izquierda). En los estereogramas de superiores se observa la orientación NW-SE con variaciones en la falla San Juan Capistrán, mientras que en la falla Enramadas se va más uniforme al igual que sus buzamientos. En la parte inferior la distribución de polos donde se observar esa uniformidad.**

Hacia el Este se localizaron dos sistemas de fallas denominados como La Boquilla, las cuales presentan la misma orientación (NW-SE) fallas con dirección NW-SE buzamiento hacia 60°-90 al NE y 65°-90° al SW (Figura 16). El plano de falla principal del sistema La Boquilla presenta superposición de estrías, las de la base son sub-horizontales (menores de 15°) y las de la segunda que se superponen a las primeras, presentan un pitch subvertical (70°-80°). El plano de La Boquilla se encontró indicadores cinemáticos representados por saltos, grietas y estrías, que permitieron determinar la cinemática de esa falla, la cual tiene un movimiento sinistral.



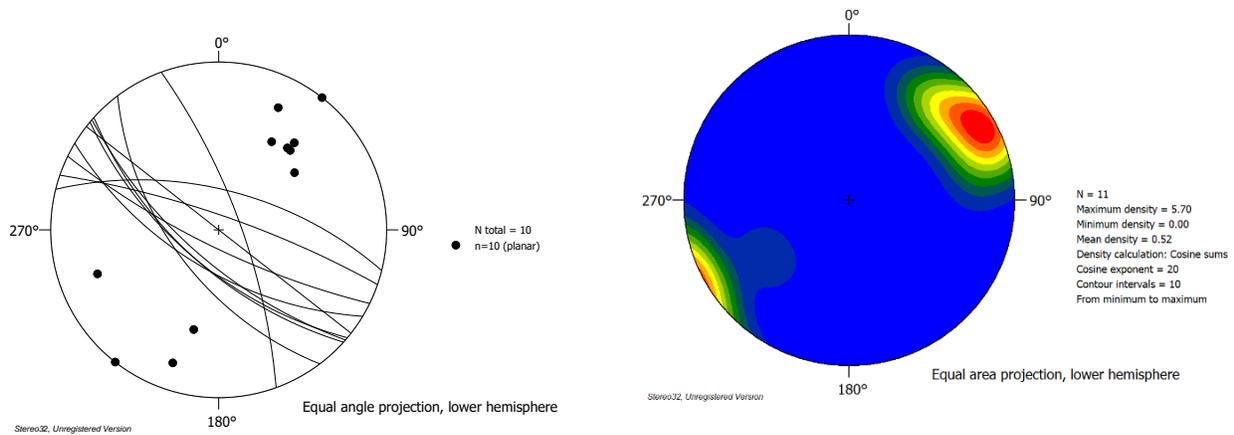
**Figura 16. Estereogramas de la falla La Boquilla, observándose variaciones ligeras en su orientación NW-SE y buzamientos parcialmente uniformes. A la derecha la distribución de polos mostrándose una mayor densidad debido a los polos del buzamiento con dirección SW.**

La falla Ojo Caliente 3 tiene una orientación general NW-SE con plano de falla con  $65^{\circ}$ - $70^{\circ}$  buzando al SW (Figura 17). En los planos de falla NW-SE se presentaron una buena cantidad de estrías las cuales presentaron variaciones en su inclinación, las cuales tienen “pitches” de horizontales a sub-horizontales ( $1^{\circ}$ - $20^{\circ}$ ) verticales ( $75^{\circ}$ -  $90^{\circ}$ ) variando a lo largo del plano de la falla. En base a lo anterior, se infiere que fue un movimiento sinistral el cual se determinó a partir de indicadores cinemáticos (estrías, saltos y grietas de extensión).



**Figura 17, Estereogramas de la falla Ojo Caliente 3. En la parte superior la falla principal con orientación NW-SE donde se muestra poca variación en la orientación de la falla, el estereograma de distribución de polos muestra la tendencia del buzamiento hacia el SW. En la parte inferior una falla asociada con orientación NE-SW con su diagrama de distribución marcando el buzamiento hacia el SE.**

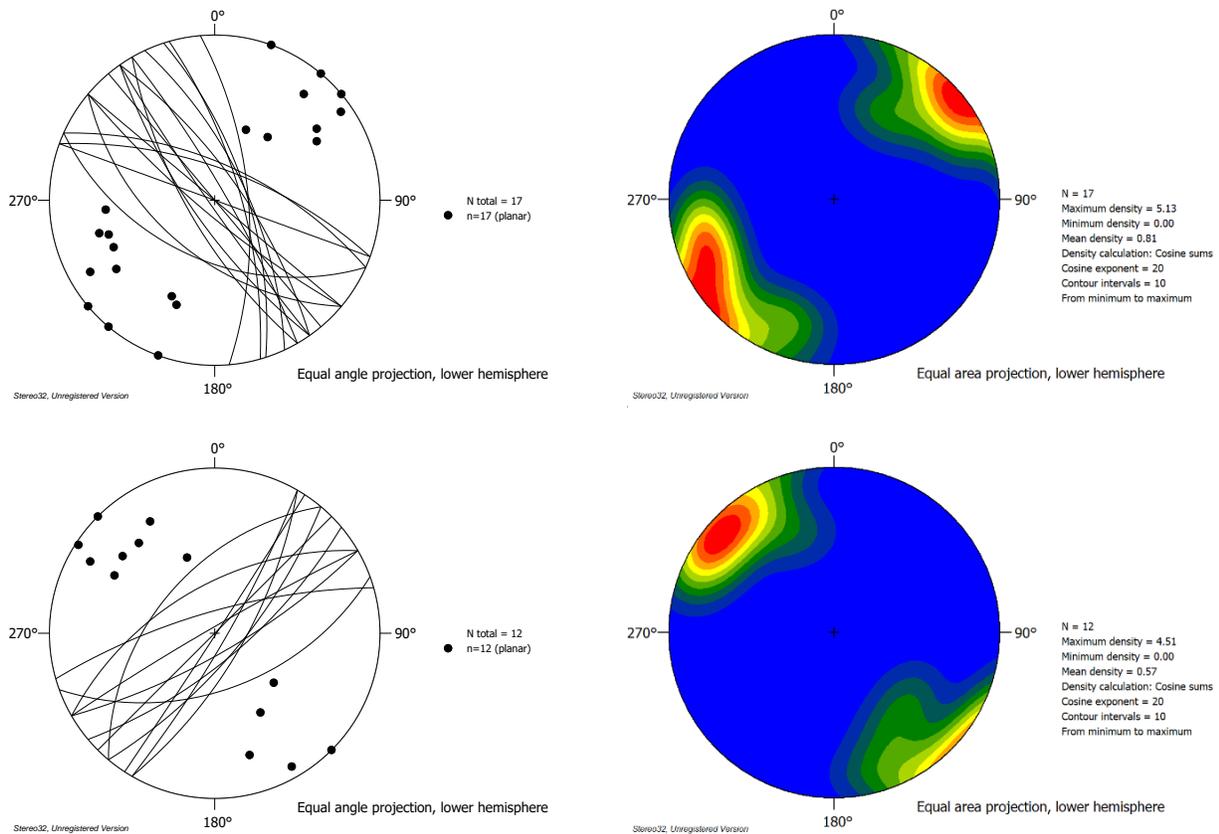
La falla Ojo Caliente limita un bloque levantado en la parte oeste de la unidad litológica traquita Ojo Caliente (Toc). La orientación de la falla es NW-SE con buzamiento de 74°SW y 79°NE (Figura 18). En esta falla se midieron 11 estrías, las cuales evidencian presenta un movimiento sinistral. El pitch de las estrías se encuentra entre 20°-80° con dirección S y E.



**Figura 18. Estereogramas falla Ojo Caliente donde se observa la orientación de las fallas NW-SE y la distribución de los polos.**

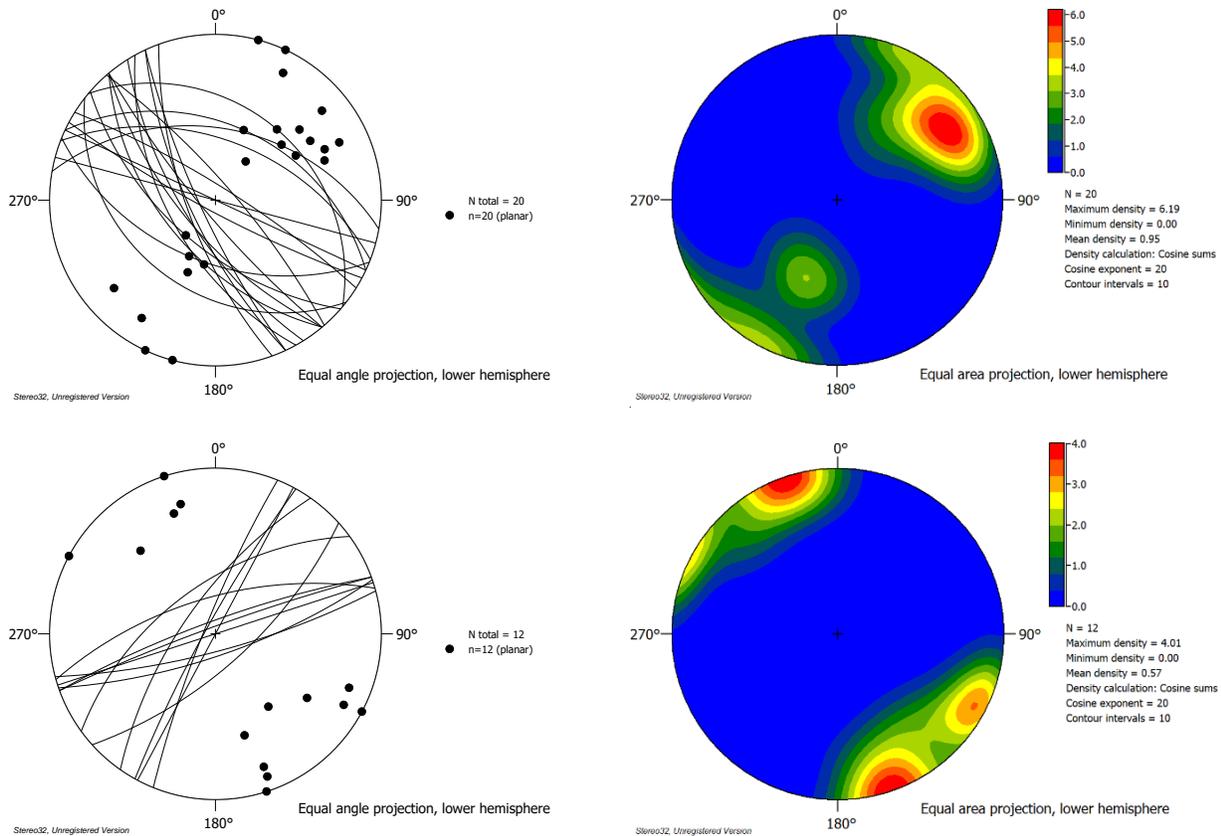
La falla Las Chivas es la falla más alejada hacia el SE del GE. Presenta una dirección NW-SE, y su plano se inclina al NE, delimitando con la falla Ojo Caliente, un bloque levantado que expone a la unidad más antigua en la zona, la Ignimbrita Santa María. El pitch de las estrías esta entre 45°-85° medidas en sentido horario. Otros indicadores cinemáticos observados son, escalones, y grietas de tensión. Entre esta falla y la de Ojo Caliente se midieron una serie de estructuras tipo “Riedel” con un ángulo de 58° respecto de la falla Las Chivas. Una de las características más notoria de esta falla es que expone a la Ignimbrita Santa maría.

Las siguientes fallas corresponden a la zona localiza en el sureste del GE, en la cual se localizan las fallas Santa María, El Arbolito, El Arbolito 1 y Fracción Sánchez. El sistema de fallas Santa María se localiza al norte de Santa María, presenta una orientación NW-SE con fallas que buzcan al SW con ángulos entre 50°-90° y fallas que buzcan al NE con ángulos de 75°. También se presenta existen algunas fallas con orientación NE-SW, con un buzamiento hacia el NW con 60°-55° de inclinación, y otras fallas con buzamiento 75°SE (Figura 19). En estas fallas las estrías presentan en general estrías con “pitch” menor de 75° (es decir su componente lateral es más bien discreta) en sentido horario. Estas fallas presentan un buen número de fracturas las cuales se presentan más adelante.



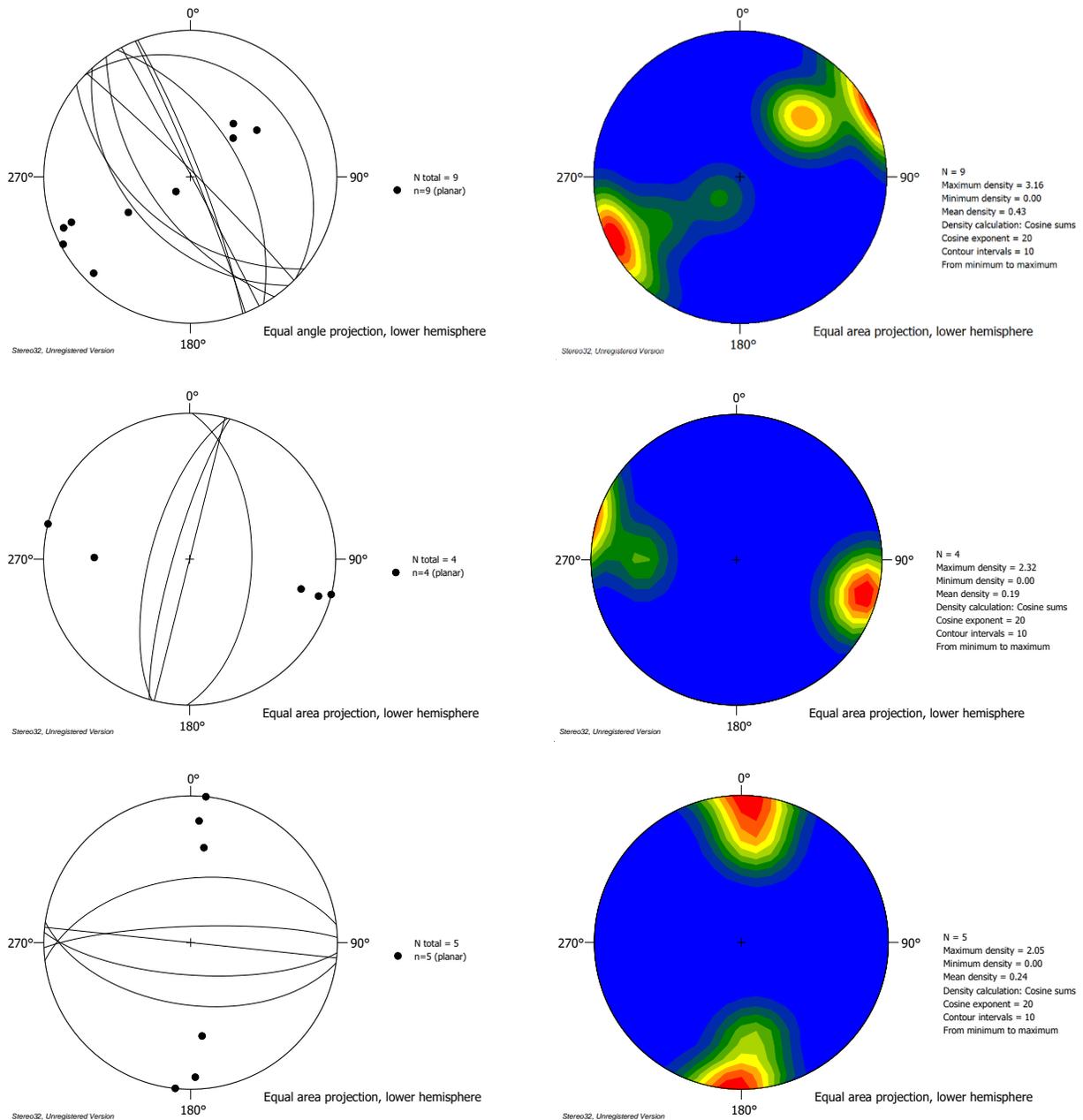
**Figura 19. Estereogramas (superiores) de la falla Santa María con una orientación NW-SE donde se observan dos patrones muy claros de fallas, uno con fallas uniformes en la orientación y otro con variaciones; en la distribución de polos se observa está clara diferencia en el arreglo de las fallas. En los estereogramas inferiores se observa una falla asociada con orientación NE-SW con menor variación en la orientación, la cual se observa en la distribución de polos al verse un contorno más definido.**

Las fallas El Arbolito presentan una dirección NW-SE con buzamiento hacia el SW, su inclinación es entre 50°-80°. Esta falla presenta un movimiento sinistral indicado por pequeños saltos y escalones en los planos de falla de la falla Arbolito. Otra falla asociada con dirección NE-SW con buzamientos 70°SE. (Figura 20). En la falla El Arbolito 1 se observan estrías con diferentes ángulos de “pitch”, que varían de 20°-90°. Los indicadores cinemáticos encontrados y medidos muestran un movimiento lateral izquierdo.



**Figura 20. Estereogramas falla El Arbolito. En la parte superior el estereograma con la falla principal con orientación NW-SE y variaciones en la orientación, el diagrama de distribución de polos presenta una mayor cantidad de polos por el buzamiento hacia el SW. Los estereogramas inferiores corresponden a una falla asociada con ligeras variaciones en orientación (NE-SW) y la distribución de polos muestra ese arreglo debido a que el buzamiento es mayor a los 70°.**

Hacia donde se ubica la falla, Arbolito 1, se encontraron otras fallas que tienen dirección NE-SW cuyos planos buzamientos hacia el NW y SE con ángulos superiores a los 65°; otra familia con dirección N-S con buzamiento 55°E y 85°W y, con menor presencia, fallas menores (de segundo orden), de dirección E-W con buzamientos 55°-90°N y 65°-85°S (Figura 21).

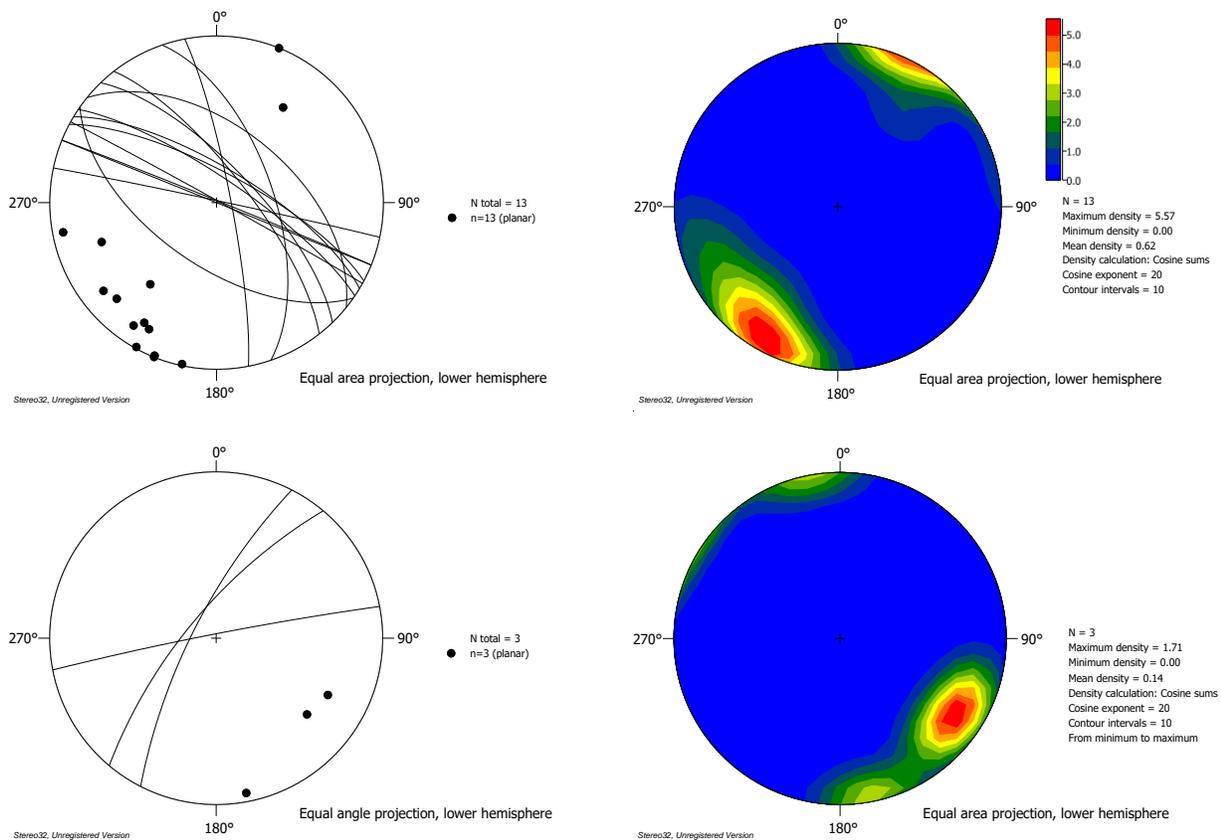


**Figura 21. Estereogramas de la falla El Arbolito 1. En la parte superior la falla principal (orientación NW-SE), con distribución de polos homogénea pero se observan los planos con un ángulo de buzamiento muy bajo (distribución en el centro). En el centro: estereogramas de una falla asociada con orientación N-S con una distribución de polos hacia los extremos. En la parte inferior: estereogramas de una falla asociada con orientación W-E con una distribución de polos homogénea y con el mismo número de polos.**

La falla Fracción Sánchez presenta una dirección NW-SE con inclinación al SW con un ángulo mayor a los 65°. Se encontraron estrías con ángulos entre 45°-85° en sentido horario, que indican una componente lateral izquierda aproximadamente igual a la componente normal. Esta falla pone en contacto las unidades litológicas de la ignimbrita Santa María (Tis) y la traquita Ojo

Caliente (Toc).

La falla Coahuila-Texas presenta una orientación  $40^{\circ}\text{NE}$  con buzamiento de  $80^{\circ}\text{NW}$  (Figura 22). En el plano de falla se midieron, en cinco sitios datos de “pitch” por la posición de las estrías: tres con pitch de  $38^{\circ}\text{-}40^{\circ}\text{W}$  en sentido horario, y dos con dirección noreste con inclinaciones de  $35^{\circ}\text{-}45^{\circ}$  en sentido antihorario. Aunque la percepción, por la posición de las estrías documentadas, e incipiente desarrollo de saltos y grietas de tensión (otros indicadores cinemáticos), es que hay una componente lateral en el movimiento de esta falla, pero no se encontraron suficientes evidencias.

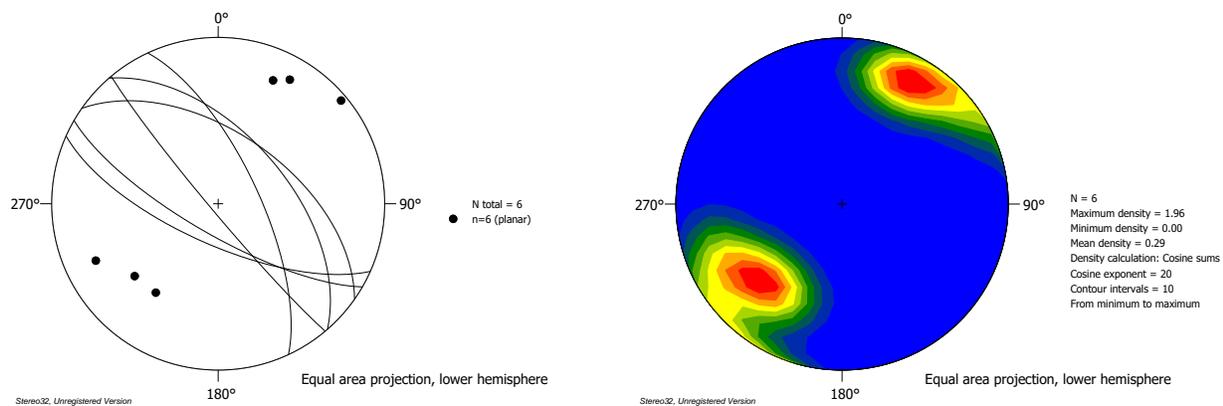


**Figura 22. Estereogramas de la Falla Coahuila-Texas. En la parte superior la falla asociada con orientación con una distribución de polos mayor referente a la parte donde se hunde el plano. En la parte inferior la falla de Coahuila-Texas con orientación NE-SW y el diagrama de polos con mayor densidad en los dos polos de las fallas similares.**

En el mapa se trazó, de manera especulativa, un lineamiento de orientación aproximada  $30^{\circ}\text{NE}$  y se le denominó Cerro Prieto. Mediante el análisis fotointerpretativo usando como herramienta el GoogleEarth (versión 7.3.3 para PC) el trazo propuesto es difuso morfológicamente, pero estratigráficamente hay un argumento fuerte: al oeste de este

lineamiento, se cortan drásticamente los afloramientos de la unidad Ignimbrita Santa María, mientras que al este del mismo, presenta mayores extensiones. Es fácil ver este detalle desde la Carretera Federal 57, al pasar el poblado de San Juan Capistrán hasta el entronque a Santa María del Río, y fue documentado en el borde de la presa pequeña frente al poblado de Cerro Prieto. Otro argumento lo constituyen los diques piroclásticos alimentadores de la unidad ignimbrita Panalillo Inferior (Tap). Son abundantes en diferentes escalas y espesor al oeste de este lineamiento inferido, y escasos al este del mismo.

La falla Catedral fue registrada por Jasso-Lara (2015), en este trabajo se tomaron datos en el plano de falla donde se encontraron estrías con pitch mayor a los 70° con dirección SE. La falla presento una orientación NW-SE con buzamiento 75° hacia el SW y 50° hacia el NE (Figura 23).



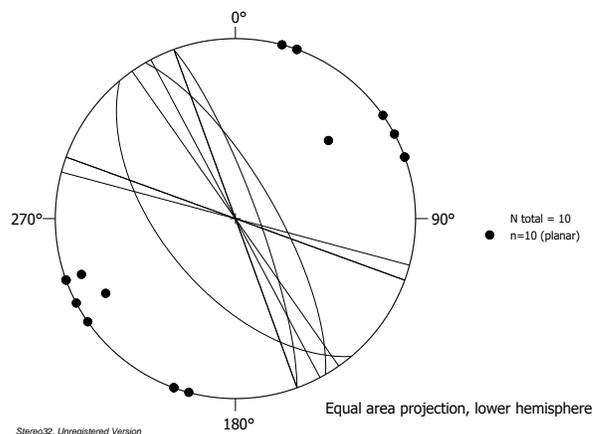
**Figura 23. Estereogramas de la Falla Catedral, el estereograma indica la orientación NW-SE. El estereograma de la distribución de polos muestra la homogeneidad de los polos pero con variaciones debido al buzamiento de los planos de falla.**

### 3.2 Diques

Los diques piroclásticos se presentan, de manera abundante en el área del graben de Enramadas, asociados tanto a las fallas que lo limitan, como dentro del bloque hundido. Los que presentan con mayor extensión y espesor, se observaron en las inmediaciones norte del puente peatonal a Enramadas, así como en la parte de la falla al norte de Fracción Sánchez. En esta zona los diques están asociados la presencia de la Ignimbrita Panalillo Inferior (Tap) la cual rellena los grabens de Enramadas, Los Arriates y La Cantera. Su presencia es menos conspicua o escasa al NE de Santa María del Río, y en el sureste del área de estudio cercano a las fallas Santa María, El Arbolito, El Arbolito 1 y Fracción Sánchez.

Su constitución es de ceniza volcánica félsica que rellena estructuras tabulares que se extienden por decenas a centenas de metros, y su espesor a lo largo es algo variable. El espesor va de algunos pocos centímetros, hasta 8 m. El relleno en los diques de pocos centímetros de espesor puede ser relativamente homogéneo, pero el material de tamaño de arcilla o limo se presenta pegado a las paredes del dique, y el más grueso, en el centro del mismo. Los de mayor espesor presentan estratificación vertical como expresión de su ascenso a presión, en eventos de erupción sucesivos. Algunos diques presentan incluso brecha lítica fina (0.4 a 1.5 cm) de material de litologías que afloran en el área, a las cuales erosionó la ceniza volcánica durante su ascenso. La ceniza está constituida principalmente por esquirlas de vidrio volcánico, cristales fragmentados de cuarzo y feldespato potásico; es poco frecuente ver fragmentos de mica (biotita), la presencia de otros cristales de ferromagnesianos resalta por la coloración ocre que adquiere por los procesos de intemperismo. Resalta una estructura sigmoidal en muchos de los diques de espesor medio (0.3 a 1.0m).

Los diques localizados en la parte del GE presentan una orientación NW-SE con buzamientos 75°-90°NE (Figura 24). Su espesor varía desde 0.40m hasta 1m o inclusive hasta 3m. Una de las características particulares es la forma sigmoidal de los diques. En el hombro del graben, al norte de la falla de Enramadas se encontró un conjunto de diques (cerca de 6) con arreglos sigmoidales los cuales están emplazados en la Traquita Ojo Caliente (Toc) (Figura 25, 26 y 27).



**Figura 24. Estereograma que indica la orientación de los diques los cuales presentan la orientación NW-SE y un buzamiento que varía desde 50° hasta ser verticales.**

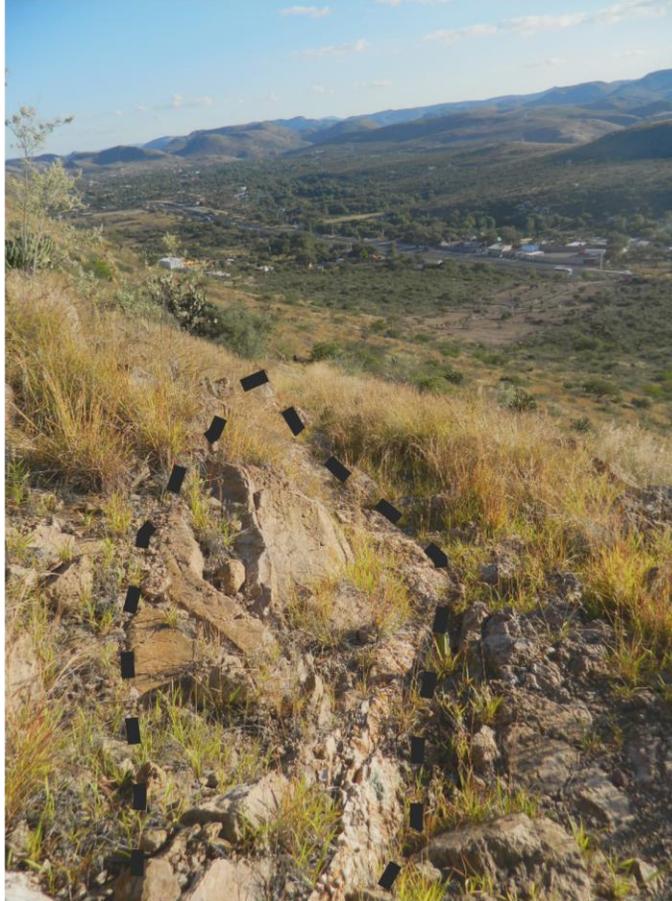
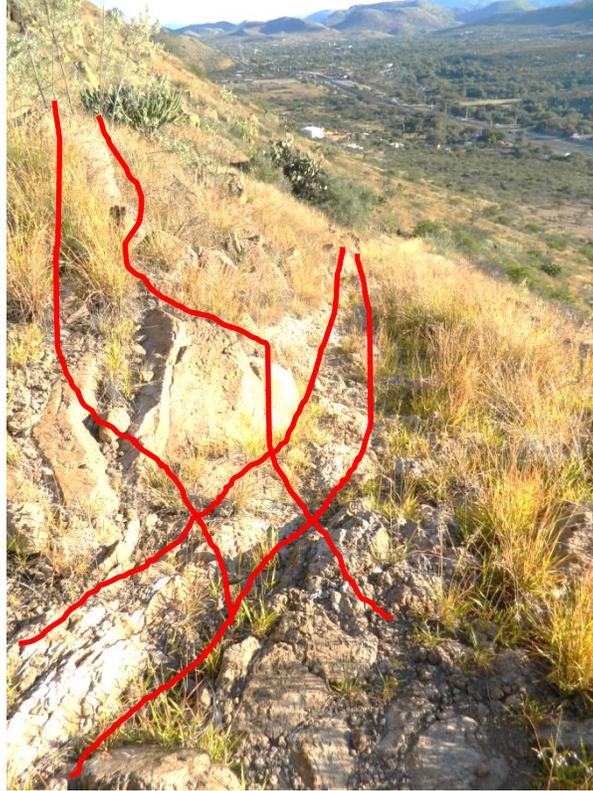


Figura 25. Se observan los arreglos sigmoidales en los diques emplazados (línea punteada) en Toc, al este del GE.



Figura 26. Dique con arreglo sigmoidal (delimitado por la línea punteada) al este del GE, el cual se emplaza en Toc.



**Figura 27. Dique con arreglo sigmoidal (líneas rojas) al este del GE, el cual se emplaza en la traquita Ojo Caliente (Toc).**

El arreglo sigmoidal de los diques se presenta en los bloques levantados que bordean el GE, y el de Los Arriates, pero son menos frecuentes asociados con las fallas de la Boquilla ni de Ojo Caliente 3; donde presentan un menor espesor a los diques del GE y con un arreglo sigmoidal muy tenue aunque también se ha observado que algunos fueron cortados separando en dos partes la estructura sigmoidal del dique, lo cual es típico en el desarrollo de corte por cizalla. En la falla Ojo Caliente se encontraron diques asociados a la falla los cuales presentan una dirección NW-SE con buzamiento de 90, 78 NE y 78°-88° SW (Figura 28).

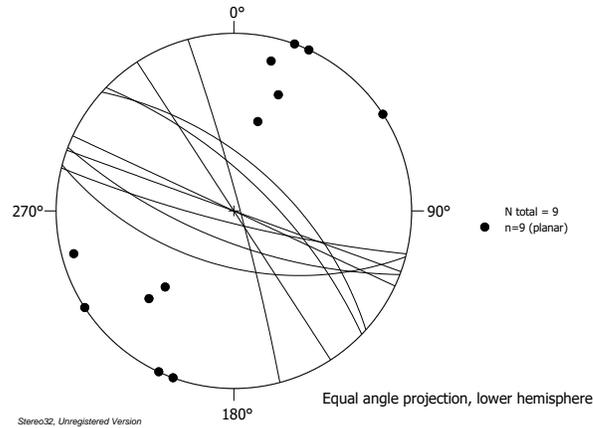


Figura 28. Estereogramas de los diques asociados a la falla Ojo Caliente con orientación NW-SE.

Al igual que los diques anteriores se emplazan en la traquita Ojo Caliente (Toc). Otros diques con arreglos sigmoidales muy marcados fueron encontrados al Oeste del poblado de Enramadas y del graben, en la unidad litológica latita Portezuelo (Tlp) (Figura 29).

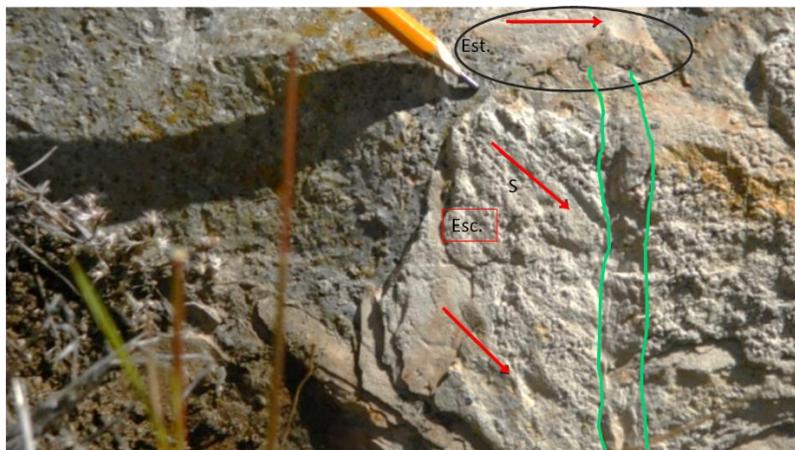
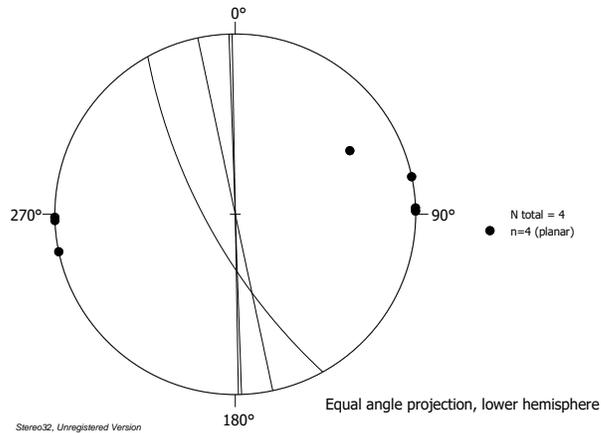


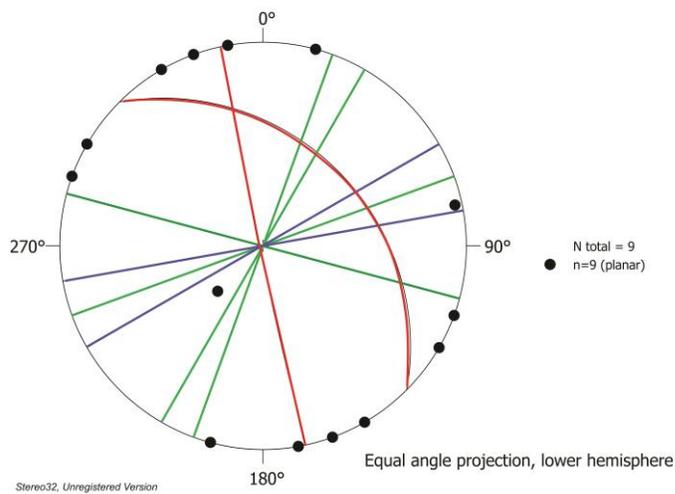
Figura 29. Indicadores cinemáticos: estrías (Est.), escalones (Esc.) y surcos (S) en el plano de falla, con presencia de dique. La unidad afectada es la Latita Portezuelo. Un dique piroclástico está marcado en verde. El plano de falla enmarcado con una elipse, tiene estrías de falla horizontales. Los otros indicadores cinemáticos se sobre-imprimieron, y juntos, marcan un “pitch” de 40°-45° en sentido horario.

Los diques de la falla La Boquilla presentan dos orientaciones: una orientación NW-SE con buzamiento 70°-85° W y la otra dirección N-S con 90° (verticales) (Figura 30). Estos diques no presentan un arreglo sigmoidal sino que su forma es longitudinal (tabular). Su espesor varía desde 0.5m a 1m.



**Figura 30. Estereograma de los diques de la falla La Boquilla, donde se observan la orientación N-S.**

Los diques que se encontraron en las fallas Arbolito, Arbolito 1 y Fracción Sánchez fueron 9. Poseen diferentes orientaciones, y a diferencia de los diques encontrados en el GE, la mayoría son de geometría tabular (solo uno, en la falla Fracción Sánchez, es sigmoidal), y presentan orientación NE-SW. Son verticales a sub-verticales. Solamente tres de estos 9 presentan dirección NW-SE y su buzamiento va de 45°E a 90° (Figura 31). La Figura 32 representa el dique mencionado, el cual se emplazó en la falla que pone en contacto a la Ignimbrita Santa María, y la Traquita Ojo Caliente.



**Figura 31. Estereograma de los diques de las fallas de la parte SE del GE. Rojo diques de la falla Arbolito; azul diques de la falla Arbolito 1 y verde diques de la falla Fracción Sánchez.**

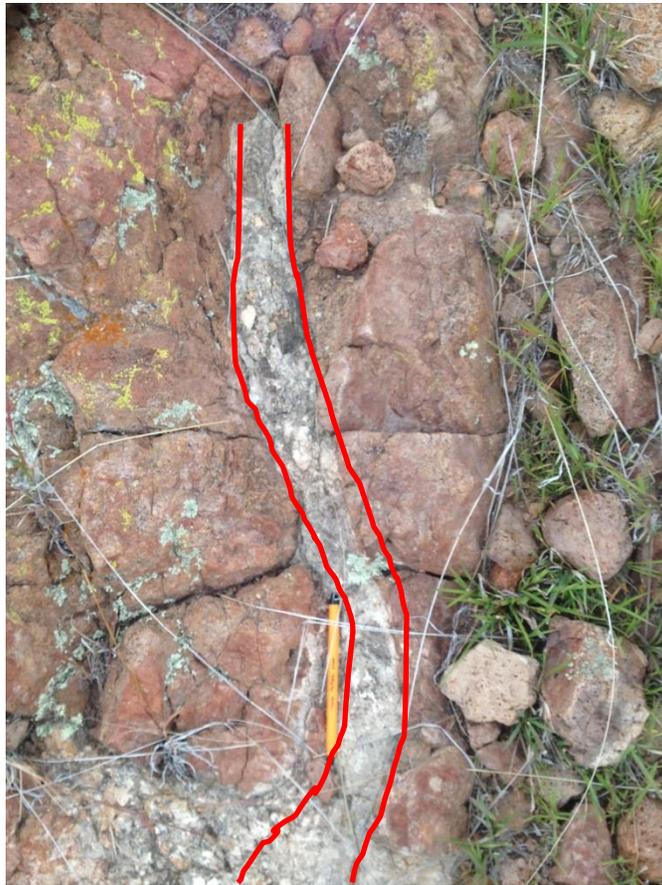
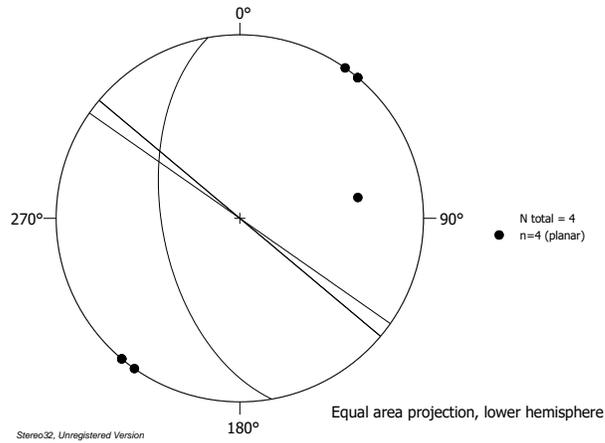


Figura 32. Arreglo sigmoidal del dique de la falla Fracción Sánchez, emplazado en la traquita Ojo Caliente (Toc).

La presencia de diques se observan en menor medida hacia el sureste del GE, cerca de las localidades de Santa María del Río y Fracción Sánchez. Se infiere que esto se deba a que la litología de los diques corresponde a la unidad litológica ignimbrita Panalillo Inferior (Tap), la cual constituye el relleno de los grabens de Enramadas, Arriates y La Cantera. Fuera de estas estructuras tectónicas son muy aislados.

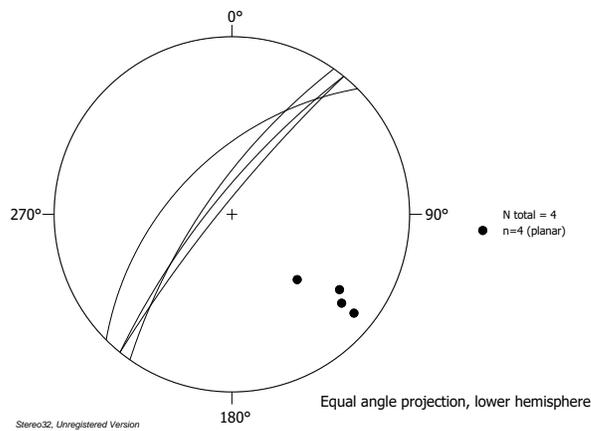
### 3.3 Fracturas

Se tomaron datos de las direcciones de las fracturas para conocer la relación con las diferentes fallas. No todas las fallas presentan fracturas muy marcadas por lo que no en todas se tomaron datos. Las fallas Enramadas y San Juan Capistrán presentan fracturas con dos direcciones: 1) una orientación NW-SE con buzamiento  $90^\circ$ ; otra orientación N-S con buzamiento  $55^\circ W$  (Figura 33). En general, los pocos datos que pudieron documentarse (mucho se dificulta el importante espesor de la brecha cataclástica asociada a las fallas) por lo que no pudo hacerse un análisis detallado.



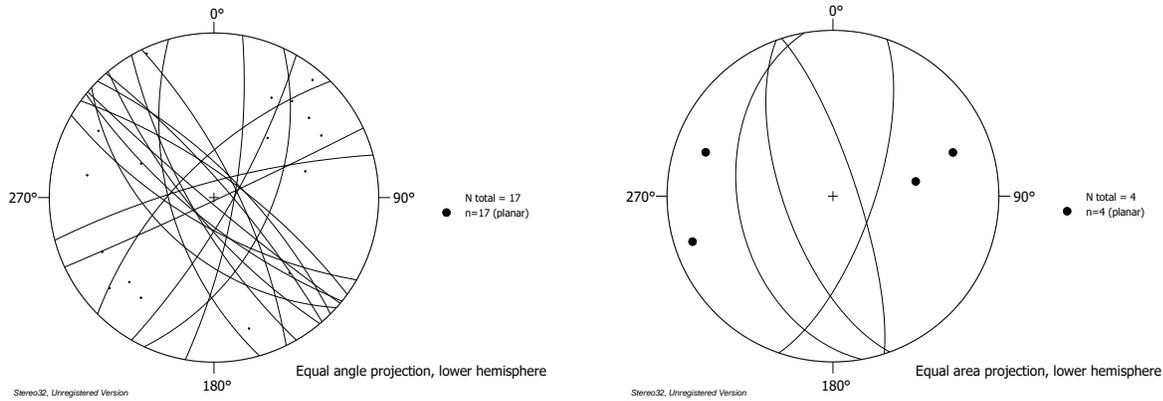
**Figura 33. Estereograma de las fracturas del GE, donde se observan dos con la misma orientación al graben (NW-SE) y una con orientación N-S.**

En el caso de la falla La Boquilla se encontraron fracturas con direcciones NE-SW con buzamiento  $80^{\circ}$ - $90^{\circ}$  NW, las cuales son perpendiculares a los diques. (Figura 34).



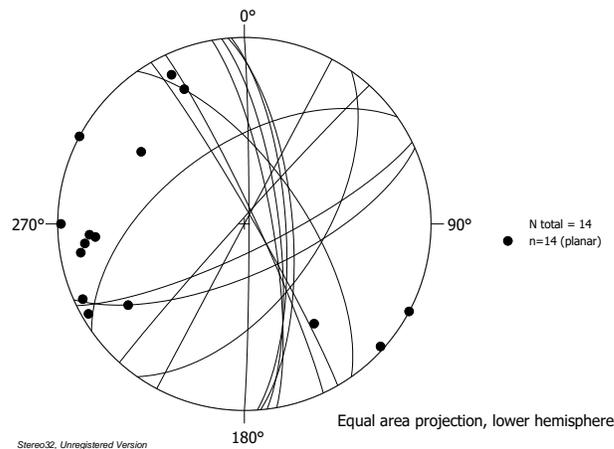
**Figura 34. Estereograma de las fracturas de la falla La Boquilla con una orientación NE-SW.**

En la falla Santa María se midieron 17 fracturas asociadas, las cuales presentan dos orientaciones preferentes: NW-SE con buzamientos de  $45^{\circ}$ - $70^{\circ}$ SW y  $80^{\circ}$ - $85^{\circ}$ NE y una dirección NE-SW con buzamientos de  $55^{\circ}$ - $85^{\circ}$ SE,  $50^{\circ}$ NW y verticales ( $90^{\circ}$ ) (Figura 35, izquierda). Las fallas Arbolito y Arbolito 1 junto, a Fracción Sánchez, presentan fracturas con orientación N-S, con dos buzamientos:  $42^{\circ}$ - $66^{\circ}$ W y  $75^{\circ}$ E (Figura 35, derecha).



**Figura 35. Estereogramas de las fracturas asociadas a las fallas Santa María (izquierda) y fallas Arbolito, Arbolito 1 y Fracción Sánchez (derecha).**

Otra zona donde las fracturas son abundantes se presenta en la inferida falla Cerro Prieto, en la cual se registraron 14 fracturas en tres orientaciones: NW-SE con buzamiento  $70^{\circ}\text{NE}$  y  $90^{\circ}$  (vertical); NE-SW con buzamiento  $75^{\circ}\text{SE}$ ,  $57^{\circ}\text{N}$  y  $90^{\circ}$ ; una dirección N-S con buzamiento  $75^{\circ}\text{E}$  y  $90^{\circ}$  (Figura 36).

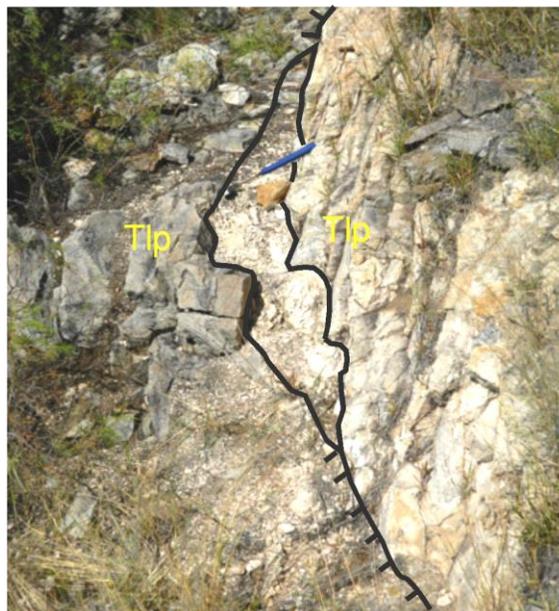


**Figura 36. Estereograma de las fracturas de la falla inferida Cerro Prieto, las cuales muestran tres orientaciones: N-S, NE-SW y NW-SE.**

### 3.4 Unidades volcánicas (Paleógeno)

Como se vio en la estratigrafía del área de estudio, las unidades litológicas corresponden a Unidades volcánicas derivadas de pulsos de emisión de lava (Traquita Ojo Caliente y Latita Portezuelo), de vulcanismo explosivo masivo voluminoso (Ignimbrita Santa María) o derivado de una serie de eventos de explosiones volcánicas sucesivas (Ignimbrita Panalillo Inferior) correspondientes al vulcanismo del Paleógeno (33-26Ma) que han documentado numerosos autores en la región (p.ej. Labarthe et al. 1982; Tristán-González et al., 2009), donde se abunda

en cuanto a las características físicas de las unidades, mineralogía, edad, y algunas de las principales características químicas. Aquí se anota solo su distribución y relación de las unidades en cuanto fueron afectadas por el fallamiento, lo cual documenta el proceso de formación del graben de Enramadas, y las otras fosas tectónicas en el área estudiada. Particularidades que pudieron observarse son como sigue: al norte del GE, hacia el nortee-noreste, cerca del poblado de Los Arriates, aflora de la Ignimbrita Panalillo Superior, sus afloramientos son muy pequeños y dispersos en algunos de máximo 2m de extensión en la superficie. Esta unidad no se localiza en otras partes del área del GE ni en las zonas alejadas que corresponden al área de estudio. Al este del GE se presenta la latita portezuelo (Tlp) y en la parte donde se presentan un dique con arreglo sigmoidal (Figura 37); esta unidad litológica se extiende más hacia el Este del graben, presentándose al noreste de la falla, cerca del cierre de la falla San Juan Capistrán, en esta zona presenta una clara división con la Toc en la cual se presenta brechada por la falla N. En esta parte del área de estudio donde la Toc predomina se encuentra el emplazamiento de los diques en forma sigmoidal con la presencia de un brechamiento con algunos tenues manchones de Tlp (1m máximo).

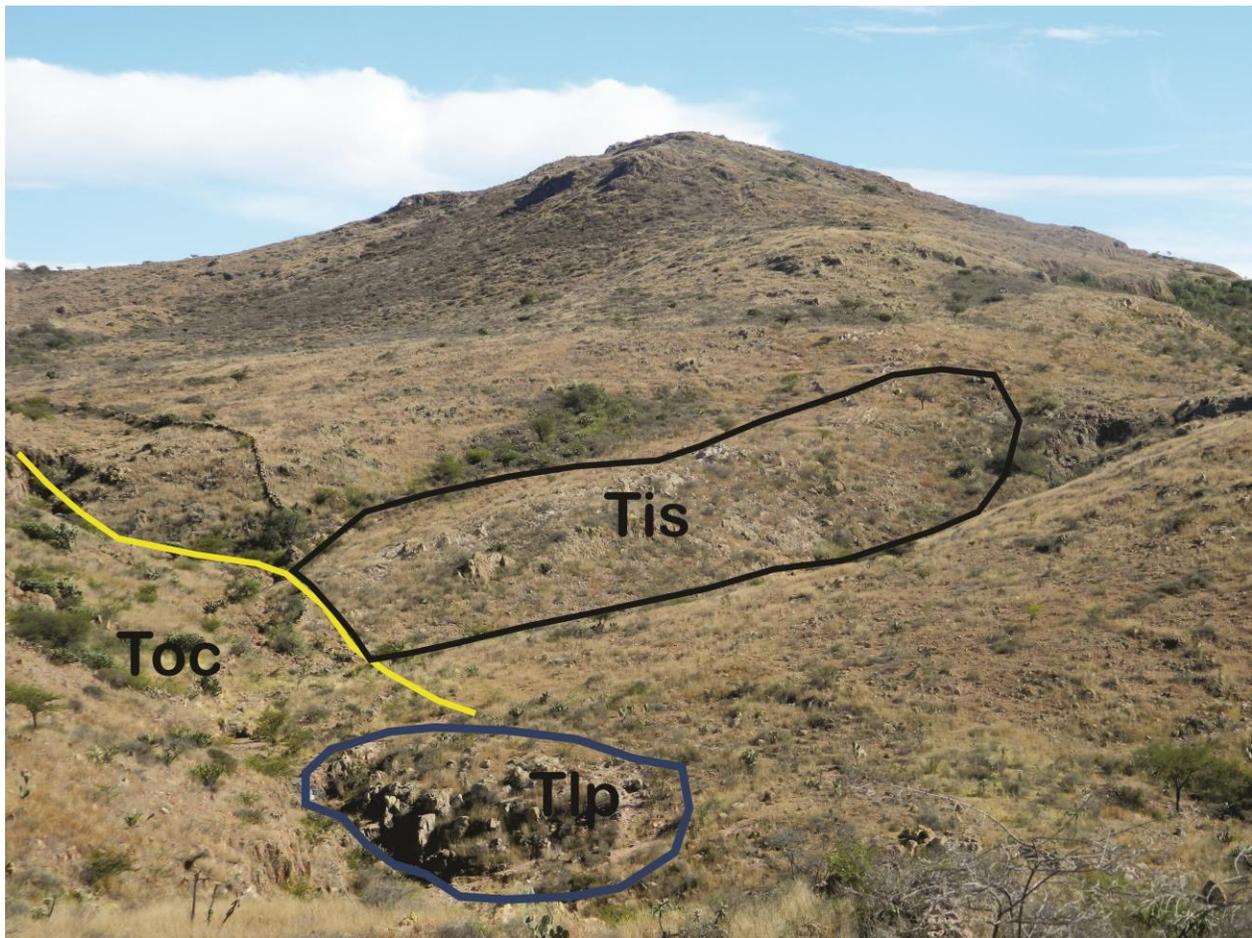


**Figura 37. Dique sigmoidal (líneas rojas) emplazado en la latita Portezuelo (Tlp), al oeste de la falla San Juan Capistrán**

A partir de donde se une la falla San Juan Capistrán con la falla Enramadas, se expone en la mayoría de los bloques segmentado por fallas, las unidades volcánicas Ignimbrita Santa María, y

Traquita Ojo Caliente, con diferentes grados de basculamiento. En cambio, la unidad Latita Portezuelo, es muy limitada, o no se presenta, aunque es prominente en la esquina superior del área estudiada.

En la falla Las Chivas se ponen en contacto las tres unidades principales: Tlp, Toc y Tis (Figura 38). En el contacto entre Tlp y Toc se presenta un alto brechamiento, lo cual está marcado con el desarrollo de brecha cataclástica; en cambio, entre la Toc y la Tis, el desarrollo del brechamiento se observa en menor grado.



**Figura 38.** Falla Las Chivas (línea amarilla), la cual sirve de separación de las unidades Tis (en negro), Tlp (en azul) y Toc (lado izquierdo de la imagen).

Después de que se le une la falla sur del GE, la falla Enramadas sigue hacia el SE en un curso bastante regular hacia el poblado de El Arbolito (que en esa parte denomino falla El Arbolito), constituyendo quizás la estructura más importante, en la cual se documentan también las evidencias de desplazamiento lateral como una componente significativa en el tectonismo de la región, pues justo frente a la presa en ese poblado, a margen de terracería se puede observar el

plano de falla de manera espectacular, y en una estructura tipo “Riedel”, una estructura sigmoide donde un bloque hundido de la denominada Latita portezuelo, está bordeado por fallas tipo “normal-lateral” (“pitch” cambiante paulatinamente de esencialmente lateral, a lateral normal con inclinación de 46° en sentido horario en las estrías). Otra estructura sigmoideal de aproximadamente 80m de extensión (Figura 39), se ubica en otra estructura tipo “Riedel” donde es levantado un bloque de Ignimbrita Santa María, sobre la Traquita Ojo Caliente, se ubica en el punto de coordenadas 21°49′14.61″; 100°43′00.06″.



**Figura 39 Arreglo sigmoideal (delineado en rojo) de la unidad Tis; cerca de la falla Arbolito 1.**

Otra estructura semejante se observó en la falla Fracción Sanchez (Figura 40), donde además se presenta un dique piroclástico con un arreglo sigmoideal.



Figura 40. Separación de las unidades ignimbrita Santa María (Tis) (izquierda) y la traquita Ojo Caliente (Toc) (derecha) en la familia de fallas de Fracción Sánchez.

### 3.5 Conglomerados y aluviones (Cuaternario)

En la zona oeste del Graben de Enramadas se localiza una secuencia conglomerática de naturaleza polimíctica, la cual está cubierta por un delgado espesor de material aluvial, sobre el que se ha desarrollado un suelo muy somero. Esta secuencia clástica está bien expuesta en el corte de la carretera, del puente de Enramadas hacia el oeste. El conglomerado descansa de manera discordante (discordancia erosional) sobre la Ignimbrita Panalillo Inferior. El conglomerado presenta clastos subredondeados a subangulosos, los diámetros mayores son de aproximadamente 10 a 30cm y los pequeños, de diámetros menores de 1cm. La secuencia presenta depósitos con soporte en matriz muy compacta, y en menor grado, soporte en clastos. Siendo de naturaleza heterolitológica, contiene material correspondiente a las unidades litológicas que bordean el GE. Cerca del poblado de Enramadas el conglomerado presenta una longitud aproximadamente de 100m, espesores de aproximadamente 4m cercano al puente de

Enramadas (mitad del graben) y disminuyendo su espesor hacia el noroeste donde el espesor es de cerca de 2m. Del otro lado del poblado de Enramadas (dividido por la carretera federal 57) la longitud del conglomerado abarca aproximadamente 80m con espesores de 5m de espesor en la parte del puente de Enramadas y hacia el noroeste un espesor de 3m. Contiene algunas intercalaciones de depósitos volcánicos primarios estratificados (no son epiclásticos).

El conglomerado no presenta una horizontalidad, presenta una discordancia erosional angular, e internamente presentan una inclinación marcada en diferentes partes de la pared donde se aprecian. Se midió dicha inclinación en diversas partes del conglomerado, la cual fue de 20°-24°NW (Figura 41).

En el caso del aluvión presenta poco espesor en la parte del graben por lo que no se realizó una separación en el mapa para resaltar mejor la litología que apenas cubre. Donde es un poco mayor su espesor, se ha desarrollado un suelo muy incipiente (Figura 42).



**Figura 41.** Los conglomerados que se presentan en la parte noroeste del graben, al oeste del puente peatonal de Enramadas presentan un basculamiento de  $20^{\circ}$  a  $24^{\circ}$  hacia el SE, hacia la falla Coahuila-Texas. Se resalta con línea punteada una discordancia angular, y la presencia de horizontes de material volcánico intercalados.

En el caso del aluvión presenta poco espesor en la parte del graben por lo que no se realizó una medición, debido a la altura donde se encontraba y en algunas partes no se presenta sino que es sustituido por suelo muy joven de poco espesor. Tanto el conglomerado y el aluvión así como la ignimbrita Panalillo Inferior (Tap) puede haber sido afectados por el mismo proceso de deformación que inclino estas unidades ya que presentan un ángulo de inclinación similar con la misma dirección.



Figura 42. Detalle de los depósitos de ceniza volcánica intercalados entre los depósitos conglomeráticos. Nótese el pobre desarrollo de suelo.

## Capítulo 4 Análisis de paleo-esfuerzo

Los resultados de los paleo-esfuerzos se presentan a partir de las estrías obtenidas en los planos de falla de los sistemas de fallas encontrados. Se siguió las indicaciones de autores como Angelier (1984), Etchecopar et al. (1981) y Casas-Sainz et al. (1990) en la toma de datos; en este caso, las estrías principalmente. Se obtuvieron los rumbos, inclinaciones, estrías, orientación de la estría, así como la litología presente.

Para los planos de falla con indicadores cinemáticos, en una primera fase se separó las estrías en tres grupos: 1) con estrías de ángulos menores a  $30^\circ$ ; 2) estrías con ángulo entre  $31^\circ$  y  $74^\circ$  y 3) estrías con ángulos mayores a  $75^\circ$  (Angelier, 1989; Botero-Santa *et al.*, 2020). En una segunda fase, se separaron por dirección de las fallas. Cuando se revisó esta primera fase en cada conjunto de fallas (Falla Enramadas, Falla San Juan Capistrán, Falla la Boquilla, Falla Ojo Caliente,

Falla Ojo Caliente 3, Falla Arbolito, Falla Arbolito 1, Falla Fracción Sánchez, Falla Santa María, Falla Catedral y Falla Coahuila-Texas). Cuando se tuvo esta primera fase, se optó por utilizar la separación por dirección para obtener los diferentes regímenes de esfuerzo. Para los cálculos de los regímenes de esfuerzo se utilizó el programa Win-Tensor (Versión 5.8.9, Delvaux, 2019). En este programa se utilizaron los métodos P y T, Diedros Rectos y Método de Optimización Rotacional (este último, solo en algunos casos donde el número de estrías lo permitía).

#### **4.1 Presentación de resultados de paleo-esfuerzo**

##### **Falla Enramadas**

La Falla que delimita en su parte este al GE presenta una orientación NW-SE con algunas inflexiones en su dirección. En esta falla se han localizado tres fallas asociadas; la primera con la misma dirección NW-SE pero con inclinación hacia el NE; la segunda falla con dirección W-E que presenta inclinación hacia el N y la tercera con una dirección NE-SW con inclinación hacia el SE. Se registraron fallas del tercer orden con direcciones similares a las fallas asociadas. Las fracturas encontradas presentan una dirección NW-SE, las cuales serían paralelas a la falla principal y perpendicular a las fallas asociadas.

##### **Falla San Juan Capistrán**

La falla delimitante S es la que forma el otro hombro del GE. En esta zona se ha encontrado fallas asociadas con dirección NE-SW que indica que este otro sistema de fallamiento ocurrió posteriormente al emplazamiento de la secuencia piroclástica que constituye a la Tap. De igual manera, la Tap del hombro S no es correspondiente al mismo nivel al que se encuentra esta unidad (la Tap) del hombro S, lo que indica que de alguna manera una de ellas formo parte de un evento posterior.

El análisis cinemático de ambas fallas (esto debido a que ambas presentan pocos indicadores y se trabajaron juntos, obteniéndose un resultado que corresponde a una extensión oblicua (Método del Diedros Rectos) (Figura 43) con orientación NE-SW y un  $R= 0.56$ ; el valor del radio permite, junto a la posición vertical del esfuerzo  $\sigma$ . Si se toma en cuenta el radio indicaría una extensión pura, lo cual se confirma con el método P y T y el método de optimización rotacional

(aunque este hay que tomarlo con cuidado por el bajo número de datos). La ubicación de los ejes son  $\sigma_1=47/102$ ;  $\sigma_2=32/331$  y  $\sigma_3=26/223$ .

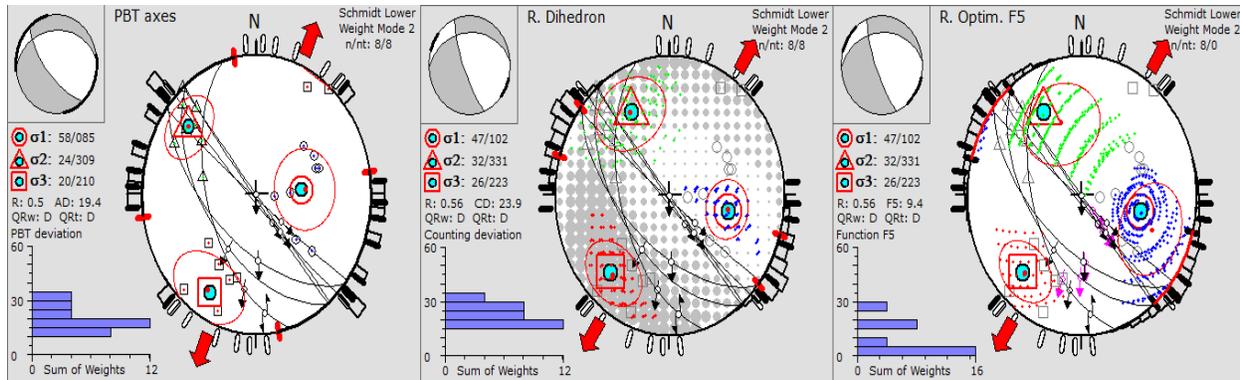


Figura 43. Datos de las fallas Enramadas y San Juan Capistrán. Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional.

### Falla La Boquilla

La Falla de la Boquilla es una falla con orientación NW-SE similar a las fallas que delimitan el graben de Enramadas. La falla se localiza al oeste de la falla que conforma el hombro S del Graben de Enramadas (GE). En esta se pueden encontrar algunas fallas asociadas o secundarias que tienen diferentes orientaciones, predominado la dirección NE-SW, la cual es la misma para las fracturas. El análisis de paleo-esfuerzos de la falla indica un proceso de extensión *strike-slip* con un  $R=0.83$  que indicaría una transtensión. La dirección de la extensión es NE-SW con la intervención de esfuerzos de fallamiento a rumbo de dirección NW-SE. La localización de los ejes de esfuerzos son  $\sigma_1=86/107$ ;  $\sigma_2=03/307$  y  $\sigma_3=01/217$ . El caso del método P y T indica la presencia de una extensión pura debido a que el radio es diferente ya que su valor es de 0.63. Por su parte, el Método de Optimización Rotacional es similar al de Diedros Rectos por lo que es una extensión *strike-slip* (Figura 44).

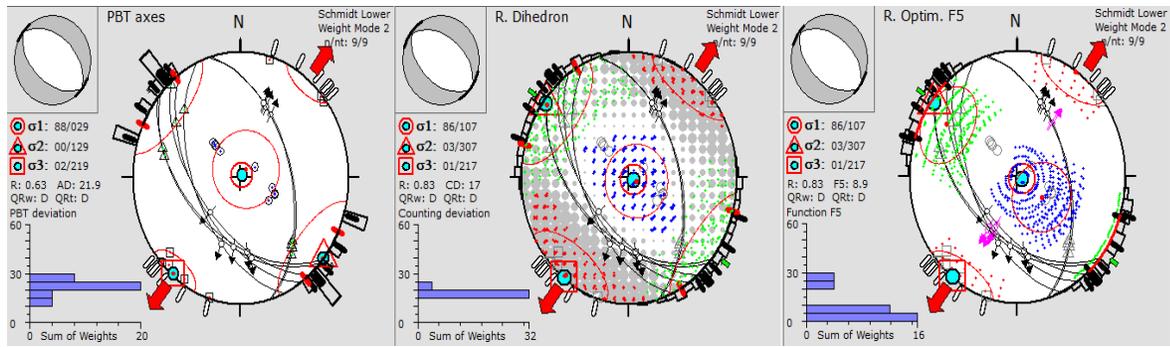


Figura 44. Datos de la falla La Boquilla (NW-SE). Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional.

En la falla La Boquilla se encontró un sistema de fallas con orientación N-S el cual al ser analizados sus paleo-esfuerzos se encontró que presenta la misma dirección de extensión de la falla principal, con la diferencia que es un régimen extensional puro, tanto en el caso del Método de Diedros Rectos, así como en el Método P y T (Figura 45). El  $R=0.62$  para el primero y  $0.68$  para el segundo. La localización de sus ejes son  $\sigma_1=71/305$ ;  $\sigma_2=18/144$  y  $\sigma_3=06/052$ .

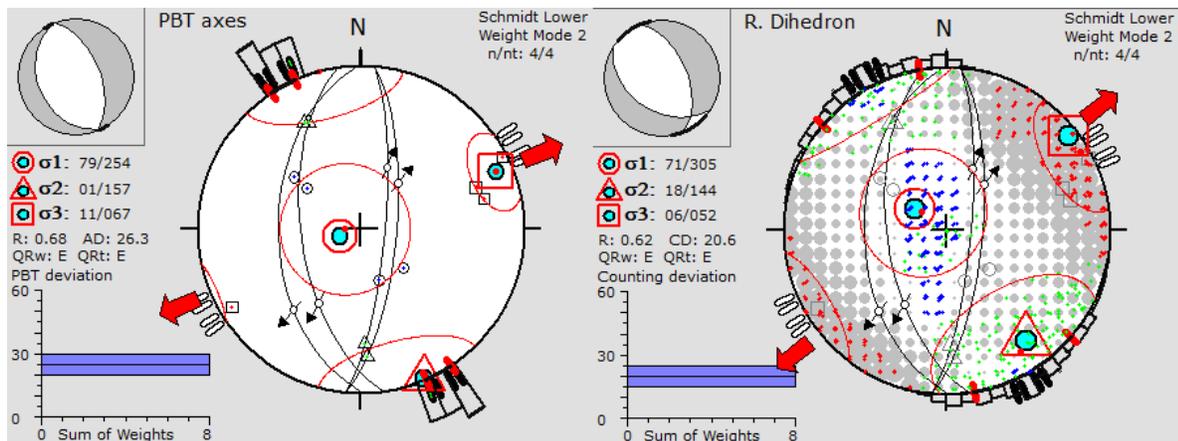


Figura 45. Datos de la Falla asociada N-S La Boquilla. Izquierda: método P y T; derecha: método de Diedros Rectos. Cuando no aparece el método de optimización rotacional es debido a que el número de estrías no son las adecuadas para un resultado confiable.

### Falla Ojo Caliente

La Falla Ojo Caliente posee una dirección NW-SE y es acompañada de otra que posee una orientación N-S. La inclinación de las fallas son hacia el NE y E respectivamente. El análisis de paleo-esfuerzos indica un régimen de esfuerzo extensivo puro, con una dirección de los esfuerzos NE-SW y con un  $R=0.73$ . Los ejes de los esfuerzos se localizan en  $\sigma_1=62/107$ ;  $\sigma_2=27/307$  y  $\sigma_3=08/213$ . Se tiene un pequeño pero marcado esfuerzo de fallamiento a rumbo

con dirección NW-SE. En los tres métodos que se han utilizado se presenta este evento de una extensión oblicua (Figura 46).

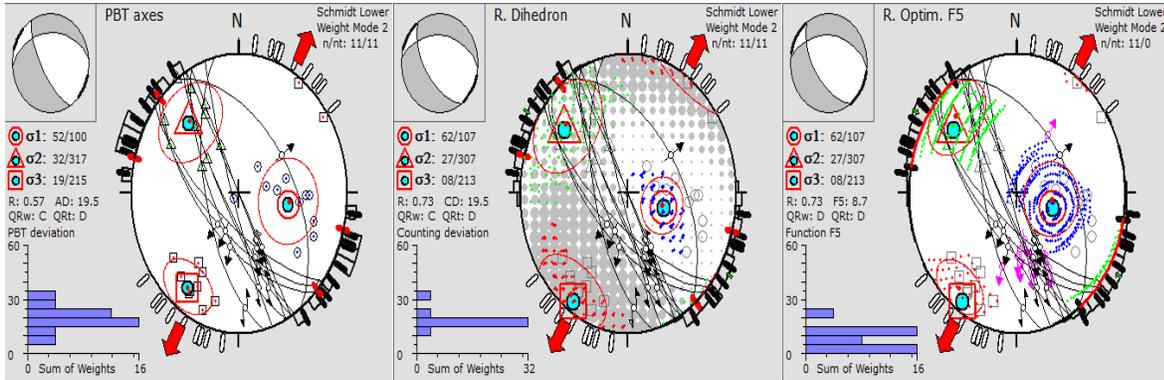


Figura 46. Datos de la falla Ojo Caliente. Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional.

### Falla Ojo Caliente 3

La falla Ojo Caliente 3 se localiza hacia el NW del poblado de Ojo Caliente, yendo hacia el camino que lleva a Pardo. La falla tiene una dirección NW-SE con una inclinación dominante hacia el SW. Hay una falla asociada con dirección NE-SW con inclinación hacia el SE (posiblemente relacionada a la falla asociada de la Falla Ojo Caliente).

El paleo-esfuerzo de la Falla Ojo Caliente 3 presenta una dirección NW-SE, indicando un régimen de esfuerzo de transtensión asociada a *strike-slip fault* (Figura 47). El  $R = 0.8$ , indicando una transtensión el cual difiere un poco en el método P y T, pero en este ya se aprecia el fallamiento a rumbo, aunque, por el valor del radio y la dirección de los ejes, es marcado aun como extensión pura. Los ejes de los esfuerzos son  $\sigma_1 = 67/324$ ;  $\sigma_2 = 19/105$  y  $\sigma_3 = 14/199$ . En esta falla no se usó el método de la optimización rotacional debido a que el número de estrías no era el óptimo para un resultado correcto.

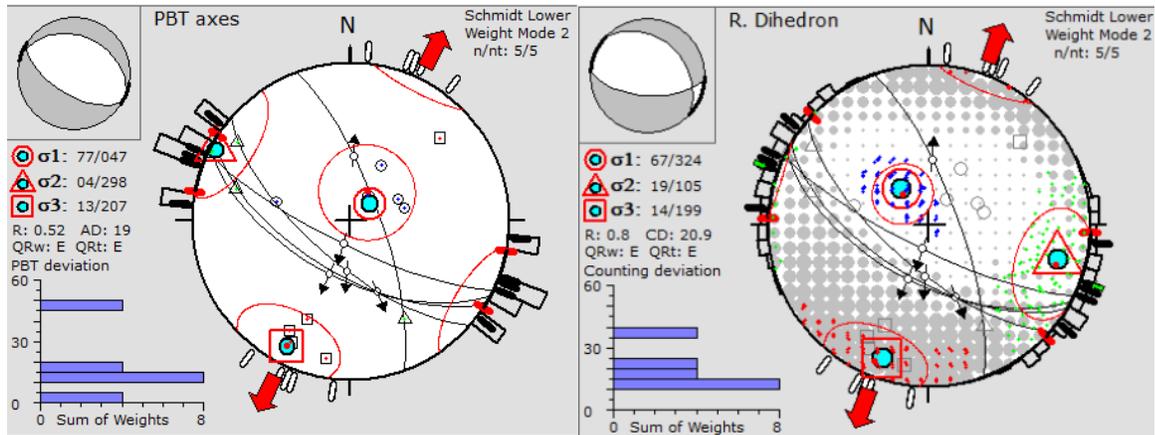


Figura 47. Datos de la falla Ojo Caliente 3. Izquierda: método P y T; derecha: método de Diedros Rectos.

### Falla Las Chivas

La falla se localiza hacia el SW del poblado de Ojo Caliente. La falla presenta una orientación NW-SE con una inclinación hacia el NE. Presenta dos fallas asociadas, una con orientación hacia el NE-SW con inclinación hacia el NW y otra con una orientación W-E, con una inclinación de 90° (vertical). La falla presenta diques con orientación NW-SE con inclinación hacia el SW.

El análisis de paleo-esfuerzos de la falla Las Chivas indica una extensión oblicua (Figura 48). Por el valor del radio ( $R= 0.69$ ) indicaría un régimen extensivo pero la presencia de fallas con componente lateral de menor ángulo indica la presencia de un esfuerzo que provoca este tipo de régimen. La localización de los ejes son  $\sigma_1= 44/094$ ;  $\sigma_2=32/326$  y  $\sigma_3=28/216$ . La dirección de la extensión es NE-SW. Sin embargo, el número de datos (estrías) en este caso no hace muy confiable el estudio.

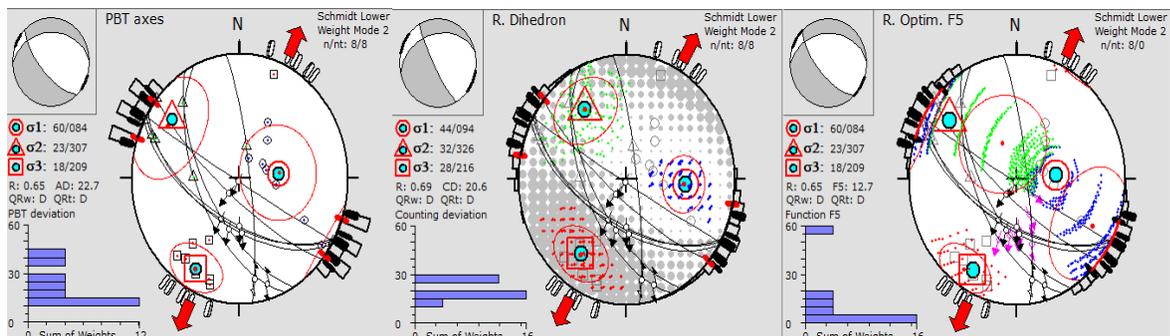


Figura 48. Datos de la falla Las Chivas. Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional.

## Falla Catedral

La falla se localiza al sureste del Ge y al Sur del poblado de Cerro Prieto. Presenta una orientación NW-SE con buzamiento hacia el SW y NE. El análisis de paleo-esfuerzos indico una extensión pura con dirección NE-SW. La localización de los ejes de los esfuerzos son:  $\sigma_1=64/319$ ;  $\sigma_2=25/120$  y  $\sigma_3=07/214$ . El radio de esfuerzo es  $R=0.5$  en los métodos P y T y Optimización Rotacional mientras que en el método de Diedros Rectos fue 0.65 pero en los tres caso indica la extensión pura (Figura 49).

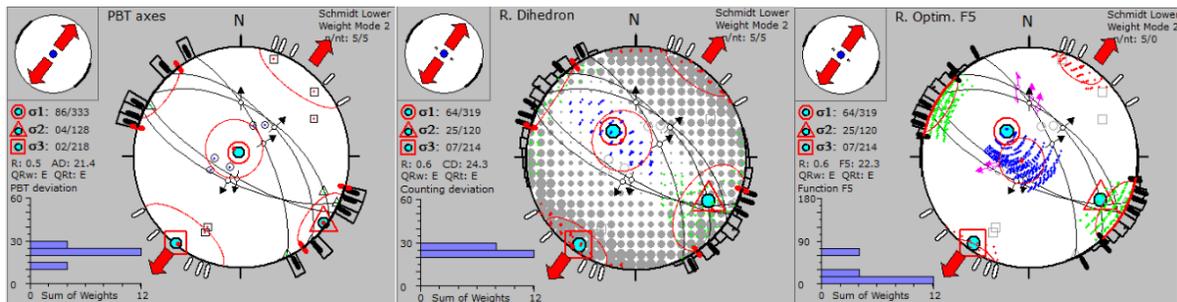


Figura 49. Datos de la falla Catedral. Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional.

## Falla El Arbolito

La falla Arbolito se localiza hacia la parte sureste del GE, cercano al municipio de Santa María de Río. La traza principal de la falla tiene una orientación NW-SE con una inclinación hacia el NE. Se pueden encontrar dos familias de fallas en diferente orientación, uno de ellos con orientación W-E con inclinaciones al NW. La otra familia de fallas tiene una orientación NE-SW con inclinaciones hacia el NW. En el análisis de paleo-esfuerzos se analizó la falla con dirección NW-SE. Se usaron once datos que al ser analizados se obtuvo una zona de extensión con un  $R=0.5$ , con una dirección NE-SW. La ubicación de los esfuerzos principales fueron  $\sigma_1=59/101$ ;  $\sigma_2=29/303$  y  $\sigma_3=10/308$ , siendo el primero el vertical. Usando el método de P y T se obtuvo un  $R=0.46$  el cuál corrobora la extensión, al igual que en el método de Optimización Rotacional, en el cual el  $R=0.5$  y el régimen es totalmente extensivo (Figura 50). Para esta falla se puede interpretar la presencia de un fallamiento normal con una discreta componente de movimiento lateral sinistral.

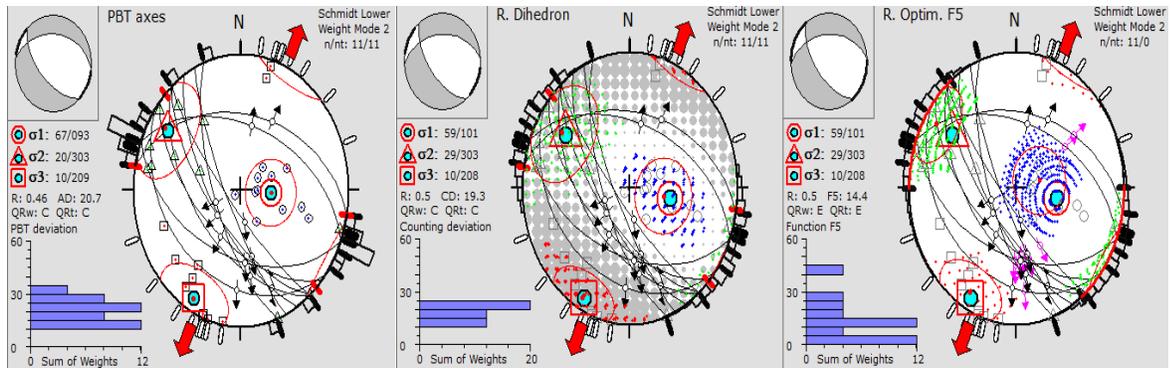


Figura 50 Datos de la falla El Arbolito. Izquierda: método P y T; centro: método de Diedros Rectos; Derecha: Método de optimización rotacional.

Se analizó la otra falla (W-E) de la falla El Arbolito, la cual presenta una régimen compresional *strike-slip* (transpresivo) (Figura 51), la dirección de la compresión corresponde a una orientación NE-SW con un  $R= 0.12$  con esfuerzos  $\sigma_1= 11/215$ ;  $\sigma_2=77/004$  y  $\sigma_3= 06/123$ . El método P y T indican un radio igual y un régimen compresivo oblicuo. Para esta falla no se aplicó el método de Optimización Rotacional debido a que el número de datos es bajo para obtener un resultado adecuado.

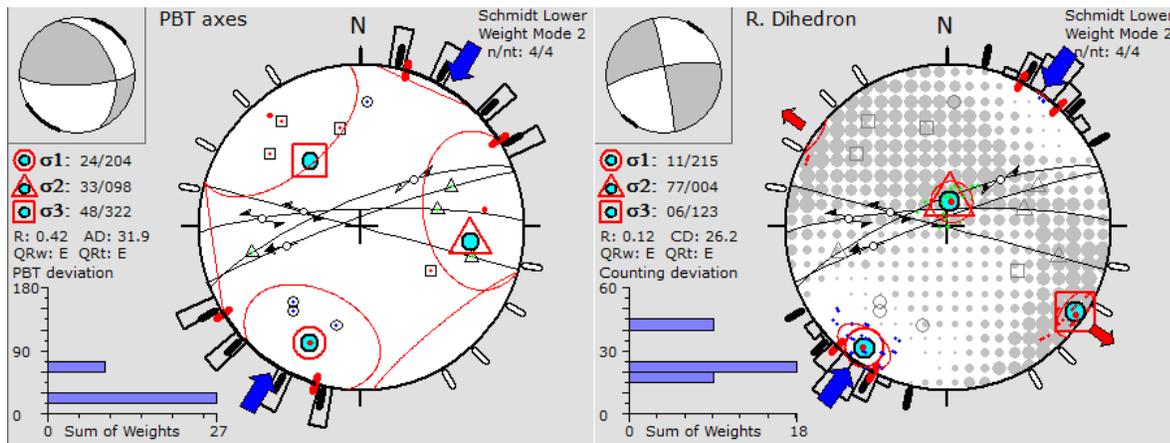


Figura 51 Falla asociada W-E El Arbolito. Izquierda: método P y T; derecha: método de Diedros Rectos.

### Falla El Arbolito 1

La falla el Arbolito 1 se localiza hacia el este del poblado de Santa María del Río y al sureste del poblado del Arbolito. La falla presenta una dirección NW-SE con una inclinación al NE.

El análisis de paleo-esfuerzos de la Falla Arbolito 1 corresponde a una estructura con orientación NW-SE. Presenta una extensión con dirección NE-SW con un  $R= 0.5$ , el cual indica un régimen extensivo (Figura 52), la ubicación de los esfuerzos son  $\sigma_1= 64/291$ ;  $\sigma_2=23/142$  y =

$\sigma_3=12/047$ . El método P y T indican el mismo régimen de esfuerzo. En el caso de esta falla no fue posible usar el método de Optimización de Tensor debido al bajo número de datos.

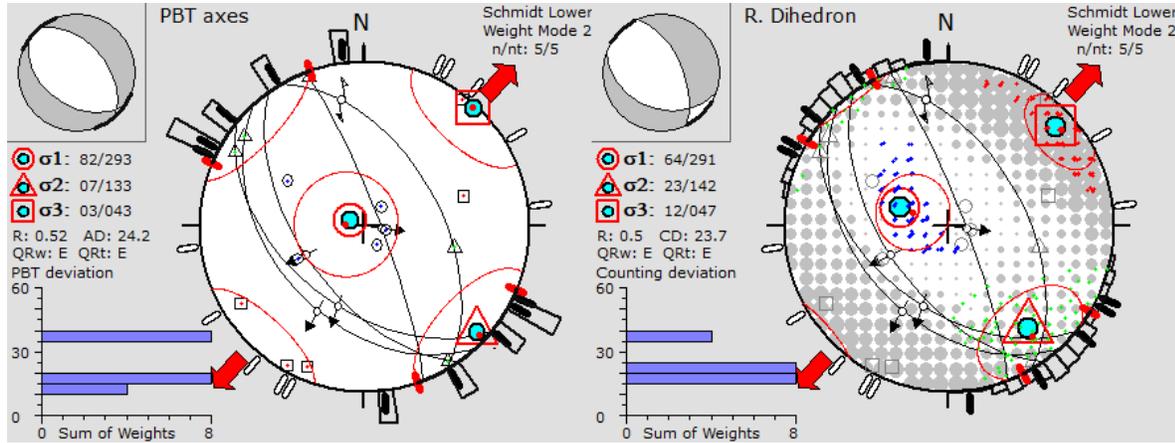


Figura 52. Datos de la falla El Arbolito. Izquierda: método P y T; derecha: método de Diedros Rectos.

### Falla Fracción Sánchez

En Falla Fracción Sánchez se localiza un sistema de fallas asociadas con dirección NE-SW con inclinación hacia el SE y NW. En el caso del método P y T se observa una extensión oblicua con la ubicación de sus esfuerzos  $\sigma_1=56/193$ ;  $\sigma_2=31/041$  y  $\sigma_3=13/303$ . Por su parte, el método de Diedros Rectos indica una falla tipo *strike-slip* (Figura 53) con sus esfuerzos localizados en  $\sigma_1=31/212$ ;  $\sigma_2=59/030$  y  $\sigma_3=01/121$ . Debido al bajo número de estrías en los planos de falla no se puede confiar completamente, además que la falla principal (NW-SE) no presenta estrías.

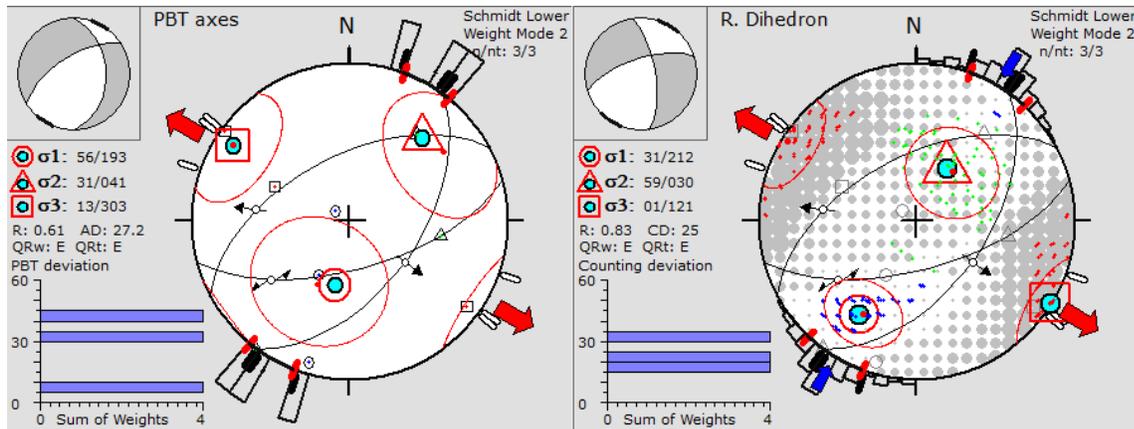


Figura 53. Dato de la falla Fracción Sánchez, sistema de fallas asociado NE-SW. Izquierda: método P y T; derecha: método de Diedros Rectos.

## Capítulo 5 Discusión y resultados de paleoesfuerzo

Las Fallas Enramadas y San Juan Capistrán son las que dan forma al GE, delimitando el bloque hundido. La hipótesis que se han examinado hasta el momento, es que esta estructura tectónica se formó, en un evento extensional en el Oligoceno durante el desarrollo de la Provincia de “Basin and Range” (PBR), y que mecanismo dominante correspondió a “cizalla pura”. Sin embargo, este graben se ubica justo en una franja de alineamientos regionales de orientación NW-SE denominado por Nieto-Samaniego *et al.* (2005), Sistema de Falla San Luis Tepehuanes (SFSLT) que se ha considerado indicativo de una frontera tectónica importante, y por lo tanto a destacar dentro de la Provincia de la PBR (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Aunque en su definición se menciona que estos lineamientos corresponden a fallas regionales, se les asigna principalmente dentro de fallas normales, comentando que algunas de las cuales presentan evidencia, en sus planos de falla, de una discreta componente lateral (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Loza-Aguirre *et al.*, 2008). Una hipótesis alternativa surge al examinar la geometría y expresión morfológica de las fosas tectónicas y fallamiento asociado en algunas de las fallas dentro del SFSLT, donde se ha reportado zonas de transpresión y transtensión en áreas discretas (Torres-Hernández y Tristán-González, 2015). Los trabajos anteriores sobre el GE, básicamente documentan fallamiento normal en el origen del graben, y recientemente, Botero *et al.* (2020), proponen que el fallamiento tuvo la influencia de la reactivación de una estructura cortical profunda cuyo efecto, por deslizamiento inicialmente a profundidad, alcanzó paulatinamente a hasta la superficie, donde tomó las debilidades de las rocas volcánicas generadas durante su enfriamiento (fracturas de enfriamiento), influenciando el desarrollo de los patrones de fallas que se exponen en esta parte del SFSLT. Ambas hipótesis (cizalla pura, o control del fallamiento por reactivación tectónica de estructuras corticales profundas con diferentes eventos de reactivación, hacen énfasis en fallamiento normal y basculamiento de bloques, pero no incluyen los efectos de zonas de concentración de esfuerzos de transtensión y transpresión que se han reportado en la parte media de la Mesa Central de México (MCM) (p.ej., la Megafalla Iaramídica de San Tiburcio, por Mitre-Salazar (1989), y otras que recientemente (aunque solo en resúmenes en congresos) se han mencionado para el sur de la

MCM (Torres-Hernández y Tristán-González, 2015), implican movimiento lateral entre bloques adyacentes, que en caso de la MCST, modifica visiblemente estructuras laramídicas. Las morfologías definidas para las estructuras generadas por cada uno de los mecanismos pueden usarse como criterios de análisis que nos guíen a definir si el mecanismo que operó, en este caso, cizalla pura, o transtensión, en la formación del GE.

Las dos fallas que limitan el GE presentan una dirección NW-SE, pero en uno de sus extremos convergen; esto es un rasgo común en estructuras generadas por fallamiento a rumbo, en zonas donde se acumulan esfuerzos de transtensión. Los indicadores cinemáticos documentados en los planos de falla (estrías, surcos, grietas de tensión, saltos), muestran movimiento oblicuo de los bloques, y en algunas fallas (p. ej., falla Ojo Caliente 3), las estrías pasan desde horizontales, a oblicuas y, a verticales, siguiendo a rumbo el plano de falla. Las fallas principales tienen indicadores cinemáticos que señalan una extensión oblicua. Es decir, que el graben no presenta el clásico fallamiento normal que se ha propuesto en trabajos anteriores (Labarthe-Hernández et al., 1982; Montoya-Castillo, 2011), al compararlo con las características que se han propuesto en la mayoría de los estudios donde muestran el clásico sistema de grabens (Abdunaser y McCaffrey, 2015; Camargo-Puerto, 2004; Davis y Reynolds, 1996; Deng *et al.*, 1986; Fossen, 2016; Griem, 2015; Gürbüz, 2010; Liu y Konietzky, 2018).

Esto, porque la presencia de tres tipos de estrías (horizontales, oblicuas y verticales) supondría un fenómeno no compatible con esfuerzos puramente extensionales, y, si además se superimprimen, como en algunos sitios se ha observado en este estudio, podrían suponerse dos eventos tectónicos en la dinámica de formación de este graben; o, alternativamente, un proceso en el que el deslizamiento a rumbo de dos bloques corticales, por la anisotropía natural de los materiales rocosos sometidos a cizalla, generen a rumbo curvaturas, suscitando la concentración de esfuerzos transtensionales y transpresionales alternando en sectores de la falla, ocasionando entonces, subsidencia de bloques (en el primer caso), o levantamiento de bloques (en el segundo caso). Estas posibilidades están intrínsecamente asociadas a fallamiento a rumbo (Campagna y Levandowski, 1991; Bilham y King, G., 1989).

Por la orientación de las fallas, se asume que la extensión se ejerció con dirección NE-SW, dándose a partir de posibles fracturas preexistentes que permitieron la formación de fallas más

grandes. Las fracturas se pudieron haber formado durante la formación de las unidades volcánicas como la ignimbrita Santa María (Tis) y la traquita Ojo Caliente (Toc). Botero-Santa *et al.* (2020) han documentado, para la parte cercana a Santa María del Río, un proceso similar que coincide con la extensión con dirección NW-SE. La presencia de un fallamiento oblicuo es muy visible en campo a través del análisis de la distribución de los diques, y la medición de inclinación de las estrías (“pitches”). Los diques son de naturaleza piroclástica, y constituyen las fuentes de la ignimbrita Panalillo Inferior (Tap), de la que no se ha obtenido una edad isotópica de la ignimbrita, pero por su posición estratigráfica posterior a la Latita Portezuelo (a la que cruzan numerosos diques) se puede estimar que su emplazamiento ocurrió entre los 30 a 28 Ma (en el Graben de Bledos, Torres-Hernández 2009 reporta 28 Ma para esta ignimbrita). En otro estudio (Montoya-Castillo, 2011) propone una edad de aproximadamente 25 Ma, sin aportar argumentos.

Dado que la Ignimbrita Panalillo Inferior constituye el relleno de los grabens que aquí se mencionan (Enramadas, Arriates y La Cantera), se asume que los procesos tectónicos y el vulcanismo y ocurrieron de manera sincrónica, y, dado que en muchos de los diques su geometría es sigmoidal (vista en planta) a diferentes escalas, es posible asumir que esfuerzos horizontales ( $\sigma_1$ , horizontal, Figura 54) generaron fallamiento a rumbo, y esto originó arreglo complejo de estructuras asociadas, donde la constante es la presencia de estructuras sigmoidales a varias escalas, tanto en diques como en depresiones tectónicas (grabens).

La falla más importante en este sistema es la falla Enramadas, que se prolonga en una traza casi continua hacia el poblado de El Arbolito prolongándose por casi 16 km, en una orientación de 310° aproximadamente. Sobre su traza (o en estructuras “Riedel” asociadas) es posible observar bloques levantados, y estructuras sigmoidales a diferentes escalas, además de los indicadores cinemáticos ya mencionados. Dado que en algunos sectores el bloque subsidente está muy segmentado, y sus estructuras tienen arreglos complejos donde resalta los que se exponen a la margen norte de la carretera entre Enramadas y Ojo Caliente, en posición oblicua respecto de la falla de Enramadas.



**Figura 54.** El cantil del fondo corresponde a la falla Enramadas, los bloques que se exponen en el corte de la carretera federal 57 muestran estructuras delimitadas por juegos de cizalla conjugados donde  $\sigma_1$  es vertical.

Dado que el proceso de formación de graben asociados a fallamiento lateral tiene etapas de desarrollo paulatinas, estos tienen etapas de incipiente a extremadamente desarrollados. Mann *et al.* (1983) distingue que la etapa (1) inicia con el movimiento en una falla de movimiento a rumbo, durante el cual empiezan a delinear lo que definirá las cuencas con la aparición de las zonas de relevo, y las fallas oblicuas a las estructuras principales; (2) inicia la apertura de la cuenca a través de las fallas en la zona de relevo (“releasing fault bends”) que produce “spindle shaped basins” definidas y con frecuencia bisectadas por fallas de deslizamiento oblicuo (“oblique slip faults”) conectando los extremos discontinuos de las fallas de deslizamiento a rumbo; (3) al incrementarse el desplazamiento por deslizamiento a rumbo, produce cuencas de formas que coloquialmente se denominan sigmoidales (“lazy S shaped”) para las desarrolladas por fallas sinistral, y “lazy Z shaped”, para las desarrolladas por fallas dextrales; (4) la aparición de cuencas tipo “pull-apart” o grabens en forma de rombo, como resultado del alargamiento de una de las grietas tipo “S” o tipo “Z”; y (5) la posible evolución al inicio de una cuenca oceánica. Tomando en cuenta estos criterios, el GE, presenta morfología que indica que solo alcanzó una etapa incipiente de desarrollo. La forma sigmoidal de este graben está de acuerdo con estos criterios y su asociación a fallamiento a rumbo sinistral.

Las características anotadas son más compatibles con un desarrollo de fallamiento lateral-normal, más que un proceso extensional del tipo cizalla pura, donde los bloques en la depresión

tectónica se bascula hacia las fallas que los delimitan y las fallas normales internas son paralelas o casi paralelas a las fallas mayores que delimitan la cuenca. El proceso de formación del graben no corresponde a una extensión por el desarrollo de fallas normales, sino lateral u oblicua (como lo muestra el análisis de los paleoesfuerzos); si bien, el proceso no tuvo una historia muy prolongada, sino más bien incipiente.

La forma sigmoide (en planta) de los diques piroclásticos alimentadores de la Ignimbrita Panalillo Inferior, sugieren cortes de cizalla con  $\sigma_1$  horizontal, y por lo tanto planos de corte verticales, lo cual es coherente con el alto ángulo de las fallas principales en el área de estudio.

Las fallas de orientación NE-SW tienen una expresión más discreta en el área estudiada, aunque de manera general han sido mencionadas en trabajos anteriores (Montoya-Castillo, 2011) como posibles reflejos del desarrollo del graben de Villa de Reyes (GVR), aquí se resaltan dos estructuras como de especial significado tectónico, estas son: la falla Coahuila-Texas, y un lineamiento inferido que se denominó Cerro Prieto. El primero con una traza seguible y que divide en dos al hombro norte del GE (incluso al bloque hundido), porque tiene asociadas otras estructuras paralelas al NW, que se infiere son paralelas a la que limita al GVR. Esto le da una gran importancia, dado que el GE está truncado en su parte occidental, y si la falla Coahuila Texas (FCT) corta al GE, el principio de relación de corte permite suponer que fue posterior a su formación. Si realmente se asocia a la FCT con el desarrollo del GVR, se tendrá un argumento para suponer dos eventos de deformación en el Oligoceno Medio. El que formó al GE, y el que formó al GVR; y su naturaleza al parecer muy contrastante. El que delineó estructuras NW-SE, con influencia de fallamiento a rumbo, y la de orientación NE-SW, por procesos extensionales. Si fue posterior el GVR, entonces parte del GE está sepultado bajo el relleno del valle. Un mapa magnetométrico publicado por López-Loera y Tristán-González (2015) muestra una anomalía en la continuación (¿sepultada?) del GE, que pudiera apoyar este argumento (Figura 55).

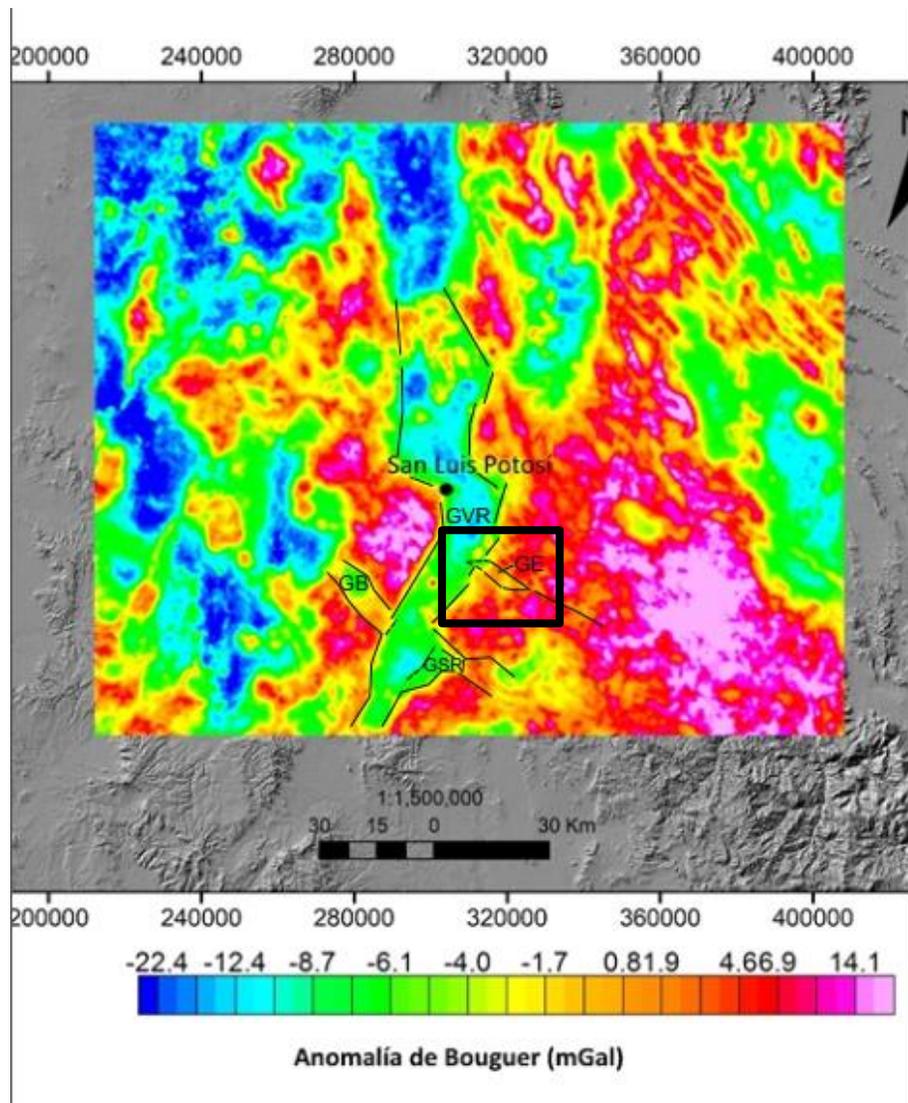


Figura 55. Ubicación del Graben de Enramadas (GE, recuadro negro) y otros grabens importantes en la región, mapa gravimétrico. Elaboró: Randall Guevara-Betancourt (aun no publicado).

Otro elemento de análisis es que de la FCT al oeste, es muy importante el espesor de conglomerados, y al este de esta falla, su espesor es muy discreto. La complejidad de la secuencia que incluye delgados depósitos volcánicos y una discordancia angular en los conglomerados, supone una historia de acomodo tectónico paulatino.

El lineamiento Cerro Prieto, aunque especulativo (no se documentó un plano de falla), llama la atención que divide, en forma abrupta, dos zonas con conjuntos litológicos que contrastan en cuanto que al oriente de esta estructura inferida, se expone en grandes bloques tectónicos a la Ignimbrita Santa María, la cual no es expuesta al oeste de este lineamiento.

En el caso de los diques la forma que presentan si llegan a ser sigmoidales. El arreglo sigmoidal se presenta en el mismo plano de falla, el cual solo puede darse mediante un fallamiento oblicuo (Piccardi *et al.*, 2006; Rakshit *et al.*, 2018), indicando que la falla La Boquilla tampoco es un producto de un fallamiento normal.

La falla de Ojo Caliente 3 (con base en datos de campo) corresponde a un fallamiento oblicuo. En esta falla se ha detectado juegos de pitches en diferente ángulo de lo que indica un movimiento progresivo en el movimiento de los bloques, pasando de ser horizontales a verticales con un desarrollo paulatino.

La falla Ojo Caliente presenta un fallamiento normal con componente lateral izquierda en la cual el análisis indico una extensión pura con dirección NE-SW. Esta falla presenta un juego de fallas secundarias que presentan una orientación N-S, similar en dirección a la falla de La Boquilla. La presencia del sistema N-S indica una posible rotación del bloque, en el cual puede estar relacionado al evento que produjo la rotación del bloque de la falla de La Boquilla; otro de los aspectos es que las unidades litológicas afectadas son las mismas en ambas fallas. En el caso de los diques se observan un mayor arreglo sigmoidal en la parte cercana al GE. Los diques ubicados en la traza de esta falla no presentan una marcada forma sigmoidal sino casi de forma tabular. Visto de manera regional las fallas Enramadas y San Juan Capistrán, así como las fallas cercanas de fallas presentan una dinámica similar entre ellas, no con todas las características (direcciones de pitch, fallas asociadas, rotación, arreglo de los diques y tipo de fallamiento), pero si relacionados en las etapas ocurridas durante la formación del GE.

Las fallas analizadas hacia la parte este-sureste de GE mostraron similitudes y diferencias marcadas con respecto a las fallas del GE. Se puede observar un evento extensivo el cual posee una dirección NE-SW con fallas con orientación NW-SE, siendo las fallas Santa María, El Arbolito y El Arbolito 1 las más claras. Se tiene evidencia que la falla El Arbolito presenta una extensión a partir de fallas (NW-SE) que se produjeron por la presencia previa de fracturas (Botero-Santa *et al.*, 2020); cuyo análisis coincide con la dirección obtenida en este trabajo. A diferencia de la falla El Arbolito, la falla El Arbolito 1 afecta de manera diferente a la litología. En el caso de la falla El Arbolito 1 los diques son muy pocos los registrados y presentan una forma recta, solo el dique asociado a la falla Fracción Sánchez presenta arreglo sigmoidal con orientación NW-SE.

Esta falla es la más alejada del GE, dicha falla presenta una falla asociada con orientación (NW-SE) que sirve de división entre las unidades ignimbrita Santa María (Tis) y traquita Ojo Caliente (Toc) y es en esta división donde se observa el dique sigmoidal. La falla Fracción Sánchez se presenta un fallamiento a rumbo que se presenta una compresión NE-SW que provoca el levantamiento de la unidad ignimbrita Santa María (Tis) con respecto a la traquita Ojo Caliente (Toc). Es posible que el fallamiento a rumbo que presenta el conjunto de fallas dirección NE-SW en la Falla El Arbolito esté relacionado con la falla Fracción Sánchez y que sean temporalmente correspondientes.

La falla Las Chivas presenta las características de una extensión oblicua vista con el análisis de los paleo-esfuerzos, sus diques con el arreglo sigmoidal está relacionado a este tipo de extensión. Se presenta un dique con una característica muy particular, este es cortado por la litología de la Tlp, esto significa que el dique fue afectado posteriormente a su emplazamiento por la falla, cuyo basculamiento coincide con la dirección del graben de Villa de Reyes (GVR) (NW).

## **5.1 Etapas de deformación**

**Etapas 1:** La primera etapa que tuvo lugar en la dinámica del GE corresponde a las zonas de extensión que produjeron las fosas mediante eventos extensivos con dirección NE-SW. Dichos eventos no solo generaron el GE sino el graben de Los Arriates.

La generación de estas fosas está relacionada a un evento transtensivo. Se infiere que las fallas mayores del GE se formaron por la existencia de fracturas presentes antes de la etapa, ya que se conoce que en el tipo de rocas volcánicas presentes tienden a presentar fácilmente un fracturamiento durante el proceso de enfriamiento (ignimbritas, sobre todo) (Botero-Santa *et al.*, 2020). La extensión presente no se debió a un fallamiento del tipo normal, sino que corresponde a un fallamiento oblicuo con un desplazamiento normal con componente lateral izquierda.

En el graben paralelo al GE (Arriates) la edad de la formación sería correspondiente ya que en todos se presenta la litología de la Ignimbrita Panalillo Inferior (Tap) en su relleno.

**Etapas 2:** Esta etapa está relacionada a la primera, generando una rotación de las fallas cercanas al GE que produjo fallas asociadas con orientación N-S de manera gradual a partir de la

dirección de falla NW-SE, la cual debió de darse al momento posterior (o inmediata) de la extensión en el GE y los Arriates, cuya rotación solo está confirmada en el primero. Este fallamiento rotacional produjo que la parte este y oeste del graben no sean correspondientes, lo cual es visible sobre todo con relación a los espesores de la Tap del hombro oeste con el hombro este del GE.

**Etapas 3:** La etapa está representada por la presencia de fallas NE-SW que abarcan desde el GE con la falla Coahuila-Texas hasta la parte sureste con la falla Fracción Sánchez, además del lineamiento de Cerro Gordo.

**Etapas 4:** la etapa corresponde a un proceso que involucro la etapa final de la dinámica del GE. Posteriormente al emplazamiento de la ignimbrita Panalillo Inferior (Tap) así como posterior a la presencia del conglomerado del Paleógeno. La forma en que se evidencia la deformación es la presencia de un basculamiento en diversas zonas del Ge y alrededores (cerca del graben de los Arriates).

Con estos datos obtenidos se infiere que este evento esté relacionado con etapas de extensión del GVR posterior a la deposición de los conglomerados, de los cuales no se conocen una fecha exacta, pero si debió ser posterior a los 25 Ma, posterior al emplazamiento de la ignimbrita Panalillo Inferior (Tap), de la que Torres-Hernández (2009) reportó una edad de 28 Ma (edad K/Ar).

## **5.2 Relación con una cuenca pull apart**

Con los resultados obtenidos en el estudio de los paleo-esfuerzos, de la cinemática de las fallas, la forma de las estructuras así como la geomorfología y las observaciones en campo, se documenta que un graben clásico, puramente extensional, sino desarrollado por esfuerzos de transtensión. Por las evidencias en las fallas presentes se puede inferir que la zona de estudio forma parte de una cuenca tipo pull-apart, con las características morfológicas y mecanismos de formación definidos por Burchfield y Stewart (1966), como asociados a esfuerzos de transtensión, ligados a fallamiento a rumbo, y en este caso, de tectonismo que no llevó a etapas de madurez el desarrollo de la cuenca (Figura 56).

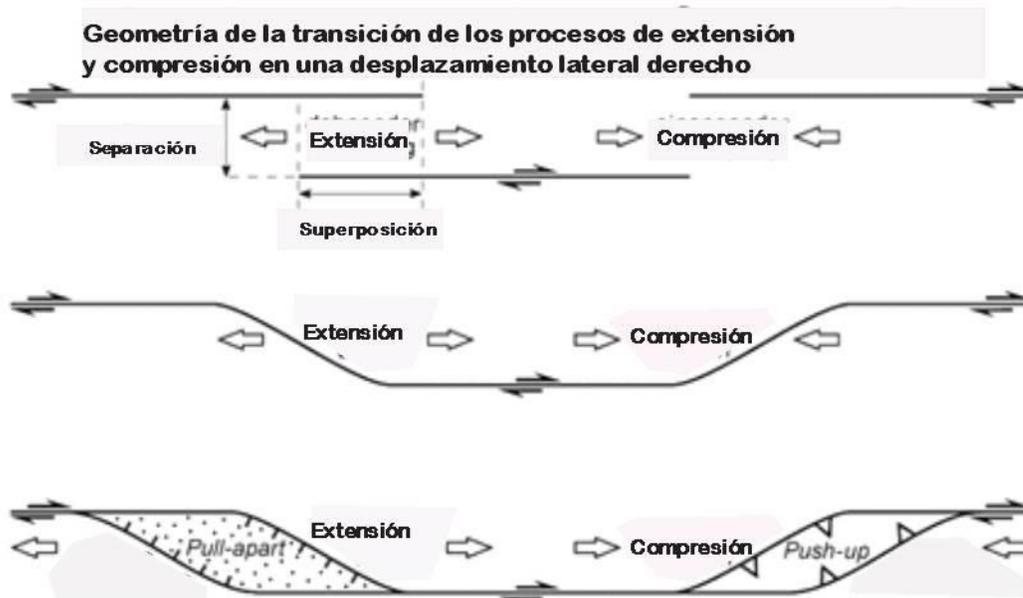
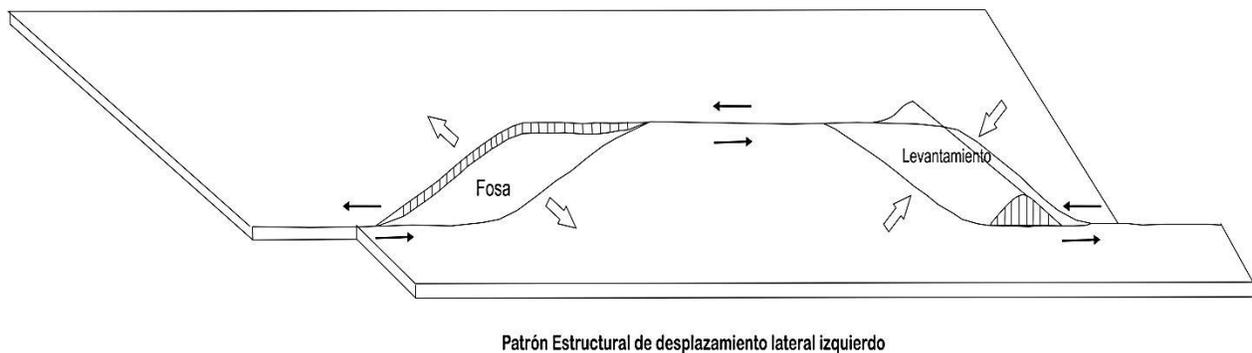


Figura 56 Etapas del desarrollo de una cuenca pull-apart. Superior: una falla lateral que comienza el movimiento; al centro: comienza a darse los procesos de extensión y compresión; inferior: se forma la cuenca pull-apart con fallas normales (extensión) y fallas inversas (compresión). Modificado de Burg, 2018.

Los pitch en los planos de las fallas principales indican la presencia de un fallamiento a rumbo (pitches subhorizontales con los cambios graduales hasta llegar a ser casi de 90°), las cuales se localizaron en el área del GE y estructuras secundarias asociadas. Se han registrado las fallas que delimitan al graben y tienen un arreglo y características que hacen que esta cuenca tectónica no sea similar a los grabens conocidos en la región, los cuales tienen características de haberse formado principalmente por esfuerzos extensionales (tipo cizalla pura), ajustándose al parecer, a los mecanismos que de manera teórica han aportado diversos autores (p.ej., Burg, 2018; Gürbüz, 2010; Mann *et al.*, 1983; Padilla-Sánchez, 2013). En este caso, en las fallas que delimitan al GE se documenta la influencia de fallamiento a rumbo, por lo que se le clasifica como una cuenca tipo pull apart. El análisis de esfuerzos realizado, sugieren que en la etapa tardía de su desarrollo, experimento una rotación discreta, lo cual es una característica común en el desarrollo de este tipo de cuencas según lo han reportado en otros casos de estudio diversos autores (Aribowo, 2017) en Sumatra y observado también experimentalmente (p.ej., Automoui *et al.*, 2006; Gürbüz, 2010).

Se conoce que no todas las cuencas pull-apart presentan la misma forma o la misma dinámica porque cada región tiene características únicas, pero hay rasgos comunes en la aplicación de

esfuerzos en los materiales de la corteza, los que se han registrado de manera teórica y experimental (Atmaoui *et al.* 2006). Siendo un fenómeno muy complejo, algunos autores (Morozov *et al.*, 2014; Sagy y Hamaiel, 2017) han documentado otras consideraciones dinámicas y procesos que no siempre podemos distinguir u observar en nuestro caso de estudio particular. Otra de las posibles causas de la singularidad de cada cuenca es el grado de madurez en su desarrollo. Debemos recordad las 4 etapas propuestas por Gürbüz (2010) y Wu y colaboradores (2009) en el cual el desarrollo del graben pasa por cuatro etapas de formación, pero en cada caso, el desplazamiento a rumbo de bloques corticales no necesariamente lleva al desarrollo de todas las etapas (Liu y Konietzky, 2018), además debe considerarse si eventos posteriores modifican la estructura de la cuenca pull-apart (Gürbüz, 2010; Strauss *et al.*, 2001). En el caso del GE la evidencia de una zona transtensiva, el levantamiento de unidades litológicas más viejas con respecto a más jóvenes y evidencias litológicas de zonas compresivas hacia el sureste del GE y los datos que empatan con los modelos experimentales permiten proponer que el graben de Enramadas forma parte de una estructura mayor (Figura 57), en cuya formación influyeron el desplazamiento lateral (a rumbo) de bloques cuyo traza principal es la falla Enramadas-Arbolitos, a la que se liga el desarrollo del GE por mecanismos propios de los que generan cuencas tipo pull-apart.



**Figura 57** Esquema de la cuenca pull-apart del graben de Enramadas (fosa) y la posible zona de compresión (derecha), generado a partir de una movimiento lateral izquierdo (sinestral). Propuesto a partir del esquema original de Burg (2018) y modificado en base a los datos de la cinemática.

## **Conclusiones**

1.-La dinámica del GE está relacionada a eventos geológicos de tectónica y vulcanismo que sucedieron en el Oligoceno Medio, y cuya temporalidad específica la marca la Ignimbrita Panalillo Inferior, que aunque en el Graben de Bledos se ha reportado una edad de 28 Ma (Torres-Hernández, 2009), está pendiente la datación de esta unidad en este graben en particular. De cualquier manera, como su emisión estuvo ligada al desarrollo del graben al que rellena, y dado que está afectada por el tectonismo relacionado con la etapa tardía de la formación del graben, probablemente su morfología actual se terminó de delinear hasta hace 25Ma (esto también ha sido estimado por Montoya-Castillo, 2011) Otros grabens de menor escala (Los Arriates, y La Cantera) delimitados por fallas paralelas a las del GE, presentan la misma historia en cuanto a que su formación estuvo ligada a la emisión de flujos piroclásticos en eventos sucesivos cuyas fuentes fueron diques piroclásticos asociados a las fallas, pero también presentes en los hombros de los grabens.

2.- El análisis de paleo-esfuerzos utilizando los métodos P y T, Diedros rectos y, en algunos casos, el método de optimización rotacional indicó una extensión oblicua con dirección NE-SW para el GE junto a las fallas cercanas con la misma orientación

3.-Parte de la estructura ha sido afectada por otro evento de fallamiento de orientación NE-SW, lo cual está representado por la falla Coahuila-Texas, que divide en dos al GE, y probablemente ese fallamiento estuvo ligado a la formación del GVR.

4.-La historia posterior a esas dos etapas de fallamiento está grabada en el grado de erosión parcial de la ignimbrita Panalillo Inferior en el bloque subsidente, y la secuencia de conglomerados (entre el que se intercalan algunos depósitos estratificados de material volcánico) que se exponen en los cortes de la Carretera Federal 57 a la altura de Enramadas. Estos conglomerados probablemente sean de edad Mioceno Tardío-Plioceno, porque presentan una discordancia angular erosional entre los depósitos inferiores y los que tienen intercalados

los depósitos estratificados de material volcánico. El desarrollo posterior lo representa la delgada capa de material aluvial que soporta el suelo actual del Cuaternario.

5.-Con los datos recolectados en campo, la obtención de paleo-esfuerzos y la comparación con aspectos teóricos, se pudo obtener tanto las etapas de deformación como la posible dinámica que tuvo el GE. La conclusión es que se puede considerar como graben desarrollados por esfuerzos transpresivos ligados a una componente de movimiento lateral de la falla Enramadas-El Arbolito, por lo que se le clasifica como cuenca del tipo pull-apart que parte de una cizalla pura.

## **Referencias**

**Abdunaser, K. M. y K. J. W. McCaffrey**, 2015, A new structural interpretation relating NW Libya to the Hun Graben, western Sirt Basin based on a new paleostress inversion. *J Earth Syst. Sci.* 124, No. 8: 1745-1763.

**Aguillón-Robles, Alfredo, Margarito Tristán-González, Ramón Torres-Hernández, Luis A. Bustos-Gutiérrez**, 2003, Carta Geológico Minera Santa María del Río F14-C14 Escala 1:50 000 Estado de San Luis Potosí. Consejo de Recursos Minerales. S.L. P.41 pp.

**Alaniz-Álvarez, Susana, A.F. Nieto-Samaniego, Ma. Teresa Orozco-Esquivel, Luis F. Vasallo y Shunshan Xu**, 2002, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: Implicaciones en la deformación post-eocénica del centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LV, Núm 1: 12-29.

**Alberti, Mauro**, 2010, Analysis kinematic correlations in faults and focal mechanisms with GIS and Fortran programs. *Computer and Geosciences* 36: 186-194.

**Allmandiger, Richard**, 2016, Faultkin. Software. Dep. of Earth & Atmospheric Sciences. Cornell University. USA.

**Anderson, Ernest M.**, 1905, The Dynamics of Faulting. *Transactions of the Edinburgh Geological*

**Angelier, Jacques**, 1979, Determination of the mean principal directions of stress for a given fault population. *Tectonophysics*, 56: 17-26.

**Angelier, Jacques, Albert Tarantola y Bernard Vallete**, 1982, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress- I. Single phase of populations: a new method of computing the stress tensor. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 69:607-621

**Angelier, Jacques**, 1984, Tectonic Analysis of Fault Slip Data Set. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, No. B7: 5835-5848.

**Angelier, Jacques**, 1989, From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, Vol 11, No. 1/2: 37-50. *Society* 8: 387-402.

**Adreani, L., Jérôme Gattacceca, Claude Rangin, Juventino Martínez-Reyes y Francois Demory**, 2014, Counterclockwise rotation in the Late Eocene-Oligocene volcanic fields of San Luis Potosí and Sierra de Guanajuato (Eastern Mesa Central, Mexico). *Tectonophysics* 637: 289-304.

**Aranda-Gómez, J. Jorge, Christopher Henry y James F. Luhr**, 2000, Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México. *Boletín de la Sociedad Geológica V. LIII*: 59-71.

**Aranda-Gómez, J. Jorge, James F. Luhr, Todd B. Housh, Gabriel Valdez-Moreno y Gabriel Chávez-Caballero**, 2005, El volcanismo tipo intraplaca del Cenozoico tardío en el centro de México: una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana Tomo LVII, Núm. 3*: 187-225.

**Aribowo, Sonny**, 2017, The geometry of pull-apart basins in the southern part of Sumatran strike-slip fault zone. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 118.

**Arslan, A., Talip Güngör, Burhan Erdogan y Cees W. Passchier**, 2013, Tectonic transport directions of the Lycian nappes in southwest Turkey constrained by kinematic indicators. *Journal of Asian Earth Sciences* 64: 198-209.

**Atmaoui, N., N. Kukowski, B. Stöckhert y D. König**, 2006, Initiation and development of pull-apart basin with Riedel shear mechanism: insights from scaled clay experiments. *Journal Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 95: 225-238.

**Ayala, L.**, 2018, Aplicación de los Indicadores Cinemáticos en Geología Regional y Exploración. *Sociedad Geológica del Perú*.

**Bahat, D., Avinoam Ravinovitch y Vladimir Frid,** 2005, Tensile fracturing in Rocks. Tectonofractographic and Electromagnetic Radiation Methods. Springer.

**Barboza-Gudiño, J. Rafael, Markus Hoppe, Martín Gómez-Anguiano, Pánfilo R. Martínez-Macías,** 2004, Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 24, núm. 3: 299-319.

**Barboza-Gudiño, J.R., Aurora Závala-Monsiváis, Gastón Venegas-Rodríguez y Luis D. Barajas-Nigoche,** 2010, Late Triassic stratigraphy and facies from northeastern Mexico: Tectonic settings and provenance. Geosphere 6 (5): 621-640.

**Bilham, R., y Geoffrey King,** 1989, The Morphology of Strike-Slip Faults: Examples from the San Andreas Fault, California. Journal of Geophysical Research, Vol. 94, No. B8: 10,204-10,216.

**Botero-Santa, P., Sushan Xu, Ángel Nieto-Samaniego y Susana Alaniz-Álvarez,** 2020, Efecto de las fracturas de enfriamiento de la formación de fallas normales: Ejemplo de Satan María del Río, San Luis Potosí, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 72(1): 1-20.

**Bott, M. H. P.,** 1959, The Mechanism of Oblique Slip Faulting. Geological Magazine, Vol. XCVI No. 2: 109-117.

**Burg, Jean Pierre,** 2018, Skript zu Strukturgeologie. ETH Zürich, Research Collection.

**Camargo-Puerto, J. A.,** 2004, Manual de Geología Estructural. Guía para la Interpretación y Elaboración de Mapas Geológicos. Editorial Universidad Surcolombiana.

**Casas-Sainz, A. M., I. Gil Piña y J. L. Simón-Gómez,** 1990, Los métodos de análisis de paleoesfuerzos a partir de poblaciones de fallas: sistemática y técnicas de aplicación. Estudios geológicos, 46: 385-398.

**Camargo-Puerto, J. A.,** 2004, Manual de Geología Estructural. Guía para la Interpretación y Elaboración de Mapas Geológicos. Editorial Universidad Surcolombiana.

**Consejo de Recursos Mineros,** 1992, Monografía Geológico-Minera del estado de San Luis Potosí. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Minas e Industria Básica.

**Cuéllar-Cárdenas, M.A., A.F. Nieto-Samaniego, G. Levresse, S. Alaniz-Álvarez, Luigi Solari, C. Ortega-Obregón y M. López-Martínez,** 2012, Límites temporales de la deformación por

acortamiento Laramide en el centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* Vol. 29, Núm 1: 179-203.

**Davis, G. y Stephen Reynolds**, 1996, *Structural Geology of Rocks and Regions*. 2° Ed. John Wiley & Sons, Inc.

**Delaney, P., David D. Pollard, Joseph I. Ziony y Edwin H. McKee**, 1986, Field relations between dikes and joints: emplacement processes and paleostress analysis. *Journal of Geophysical Research* Vol. 91 B5: 4920-4938.

**Delvaux, Damien**, 2019, Win-Tensor Software. Royal Museum Central Africa, Dep. of Geology and Mineralogy. Terverum, Belgium.

**Deng, Qidong, Daning Wu, Peizhen Zhang y Shefa Chen**, 1986, Structure and Deformational Character of Strike-Slip Fault Zones, *PAGEOPH* Vol. 24: 203-223.

**Doblas, Manuel**, 1998, Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics* 295: 187-197.

**Etchecopar, A., G. Vasseur y M. Daignieres**, 1981, An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Journal of Structural Geology*, Vol. 3, No.1: 56-65.

**Ferentinos, G., Nikos Georgiou, Dimitris Christodoulou, Maria Geraga y George Papathodorou**, 2018, Propagation and termination of a strike slip fault in an extensional domain: The westward growth of the North Anatolian Fault into Aegean Sea. *Tectonophysics* 745: 183-195.

**Fossen, H., 2016**, *Structural Geology*. Cambridge University Press. Frish, W., Martin Meschede y

**Ronald Blakey**, 2011, *Plate Tectonics. Continental Drift and Mountain Building*. Springer.

**Griem, Wolfgang**, 2015, *Geología Estructural Virtual*. [www.geovirtual2.cl](http://www.geovirtual2.cl)

**Gómez-Anguiano, M. y R. Herrera-Corona**, 2012, Inventario físico de los recursos mineros de la carta Jateado H13-C69. Servicio Geológico Mexicano. 131pp.

**Gürbüz, Alper**, 2010, Geometric characteristic of pull-apart basins. *Geological Society of America*.

**Henry, C. D. y J. J. Aranda-Gómez**, 1992, The real southern Basin and Range: Mid-late Cenozoic extension in Mexico. *Geology* Vol. 20: 701-704.

**Hippolyte, J.C., Françoise Bergerat, Mal B. Gordon, Olivier Bellier y Nicolas Espurt**, 2012, Keys and pitfalls in mesoscale fault analysis and paleostress reconstruction, the use of Angelier's methods. *Tectonophysics* 581: 144-162.

**Hodges, K.V., L. W. McKenna, J. Stock, J. Knapp, L. Page, K. Sternlof, D. Silverberg, G. Wüst y J. D. Walker**, 1989, Evolution of extensional basin and basin range topography west of Dead Valley, California. *Tectonics* Vol. 8, Num. 3: 453-467.

**Jasso-Lara, Anjuly A.**, 2015, Análisis estructural del sistema de fallas normales del bloque Ojo Caliente Santa María del Río, S.L.P. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, Área de Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 145 pp.

**Keller, E. y Robert Blodgett**, 2007, Riesgos Naturales. Pearson Prentice Hall. Madrid, España. 422 pp.

**Khanbari, Khaled y Philippe Huchon**, 2010, Paleostress analysis of the volcanic margins of Yemen. *Arab Journal Geosciences* 3: 529-538.

**Labarthe-Hernández, Guillermo y Margarito Tristán-González**, 1978, Cartografía Geológica Hoja San Luis Potosí, Folleto Técnico No. 59. Instituto de Geología y Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

**Labarthe-Hernández, G. y M. Tristán-González**, 1979, Cartografía Geológica de Hoja Tepetate, S.L.P., Folleto Técnico No. 66. Instituto de Geología y Metalurgia. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 46 pp.

**Labarthe-Hernández, G. y M. Tristán-González**, 1980, Carta Geológica Hoja Santa María. Folleto Técnico No. 67. Instituto de Geología y Metalurgia. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí. 33 pp.

**Labarthe-Hernández, G. y M. Tristán-González**, 1981, Cartografía Geológica Hoja Ahualulco. Folleto Técnico No. 70. Instituto de Geología y Metalurgia. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. S.L.P. 34 pp.

**Labarthe-Hernández, Guillermo y Margarito Tristán-González y Jorge Aranda**, 1982, Revisión Estratigráfica del Cenozoico en la parte central del Estado de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Folleto Técnico No. 85. Instituto de Geología y Metalurgia.

**Lacombe, O. y P. Laurent**, 1996, Determination of desviatoric stress tensors base don inversión of calcite twin data experimentally deformed monophasé samples: preliminary results. *Tectonophysics* 255: 189-202.

**Liesa, C. L., José L. Simón, Lope Ezquerro, Luis E. Arlegui y Aránzazu Luzón**, 2019, Stress evolution and structural inheritance controlling an intracontinental extension basin: The central-northern sector of the Neogene Teruel Basin. *Journal of Structural Geology* 118: 362-376.

**Liu, Yuan y Heinz Konietzky**, 2018, Particle-Based Modeling of Transtensional Pull-Apart Basins. *Tectonics* 37: 4700-4713.

**Longwell, Chester y Richard Fkint**, 1965 *Geología Física*. Editorial Limusa-Wiley. México. 545 pp.

**López-Doncel, Rubén**, 2017, La Plataforma Valles-San Luis y su transición a la Cuenca Mesozoica del Centro de México. *Geología de la Mesa Central de México. Curso de campo*. Instituto de Geología-UASLP.

**Loza-Aguirre, Isidro, Ángel Nieto-Samaniego, Susana Alaniz-Álvarez y Alexander Iriondo**, 2008, Relaciones estratigráficas-estructurales en la intersección del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes y el Graben de Aguascalientes, México Central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 25, núm. 3: 533-548.

**Maerten, L., Franz Maerten, Mostfa Lejri y Paul Gillespie**, 2016, Geomechanical paleostress inversión using fracture data. *Journal Structural Geology* 89:197-213.

**Mann, P., Mark Hempton, Dwight Bradley y Kevin Burke**, 1983, Development of Pull-apart Basins. *The Journal of Geology*, Vol. 91 No. 5: 529-554.

**Marshak, S. y Gautam Mitra**, 1998, *Basic Methods of Structural Geology*. Prentice-Hall Inc.

**Miyouna, T., Hardy Medry Dieu-Veill Nkodia, Olivier Florent Essouli, Moussa Dabo, Florent Boudzomou y damien Delvaux**, 2018, Strike-slip deformation in the Onsiki Formation, Brazaville, Republic of Congo. *Cogent Geosciences* 4: 1-32.

**Montoya-Castillo, Luis A.**, 2011, Graben de Enramadas: un ejemplo de control estructural del vulcanismo generado por diques piroclásticos en el NW del Campo Volcánico Río Santa María, S.L.P. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, Área Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 69 pp.

**Morozov, Yu A., M. G. Leonov y D.V. Alekseev**, 2014, Pull-Apart Formation Mechanism of Cenozoic Basins in the Tien Shan and their Transpressional Evolution: Structural and Experiment Evidence. *Geotectonics* Vol. 48 No. 1: 24-53.

**Nieto-Samaniego, A.**, 1994, Deformación Tridimensional y Patrones de Complejos de Fallas en niveles superficiales de la corteza: teoría y estudio de tres casos mexicanos. Tesis Doctoral. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Geofísica. UNAM.

**Nieto-Samaniego, A.F., S. Alaniz-Álvarez y G. Labarthe**, 1997, La deformación Cenozoica Poslaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 4, Núm. 1: 13-25.

**Nieto-Samaniego, A.F., Susana Alaniz-Álvarez y Antoni Campubrí**, 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana Tomo LVII, Núm. 3: 285-318.

**Ocampo-Díaz, Yam Zul E., Marisol P. Pinzon-Sotelo, Gabriel Cávez-Caballero, Ariel Ramírez-Díaz, Margarita Martínez-Paco, Fernando Velasco-Tapia, Martín Guerrero-Suastegui y José Rafael Barboza-Gudiño**, 2016, Propuesta nomenclatural y análisis de procedencia de la Formación Concepción del Oro (antes Formación Caracol): implicaciones sobre evolución tectónica del sur de Norteamérica durante el Cretácico Tardío. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Volumen 33, Núm. 1: 3-33.

**Orue-Etxebarria, X., J. I. Baceta, E. Apellaniz, M. Martín Rubio y G. Bernaola**, 2012, Geodiversidad de la Franja Litoral Deba-Zumaia. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua. España. 48 pp.

**Padilla y Sánchez. J. Ricardo**, 2013, *Geología Estructural*. Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de México.

**Pascal, Christophe y Jacques Angelier**, 2003, SORTAN: An analytical method to determine fault slip as induced stress. *Mathematical Geology*, Vol. 35 No. 5: 627-642.

**Pascal, Christophe**, 2020, *Paleostress Inversion Techniques 1° Edition Methods and Applications for Tectonics*. Elsevier.

**Piccardi, Luigi, Emanuele Tondi y Giuseppe Cello**, 2006, Geo-structural evidence for active oblique extension in south-central Italy. *Thew Adria Microplate: GPS Geodesv. Tectonics and Hazards* 95-108.

**Quintero-Legorreta, Odranoel**, 2002, Análisis estructural de fallas potencialmente activas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. LV, Núm. 1:1-11.

**Rakshit, R., Devojit Bezbaruah y Babul Bharali**, 2018, Oblique slip faulting associated with involving central Indo-Burmese región from Early Pleistocene deformational sequences. *Solid Earth Sciences* 3: 67-80.

**Reches,Z. y James Dieterich**, 1983, Faulting on rocks in three-dimensional strain fields I. failure of rocks in polyaxial, servocontrol experiments. *Tectonophysics*, 95: 111-132.

**Reches, Ze'ev**, 1987, Determination of tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield condition. *Tectonics*, Vol. 6, No. 6: 849-861.

**Rodríguez-León, Lorena**, 2012, Evolución Geológica del Campo Volcánico Salinas-Villa de Ramos. Tesis de Maestría. Posgrado en Geología Aplicada. Facultad de Ingeniería-Instituto de Geología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 71 pp.

**Rodríguez-Ríos, R. y Ju. M. Torres-Aguilera**, 2009, Evolución petrológica y geoquímica del vulcanismo bimodal oligoceno en el campo volcánico de San Luis Potosí (México). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26(3): 658-673.

**Röller, Klaus y Claudia A. Trepmann** (2003-2008), Stereo32. Software. Institute Geologie, Mineralogie und Geophysik. Ruhr Universität Bochum, Deutschland.

**Sagy, A. y Y. Hamaiel**, 2017, Three-dimensional structure and evolution of an asymmetric pull-apart basin. *Journal Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 106:1619-1630.

**Strauss, P., M. Wagneich, K. Decker y R. Sachsenhofer**, 2001, Tectonics and sedimentation in the Fohnsdorf-Seckau Basin (Miocene-Austria): from pull-apart basin to a half-graben. *Journal Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 90: 549-559.

**Tarback, Edward y Frederick Lutgens**, 2005, *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. Pearson Prentice Hall. USA. 686 pp.

**Tolson, Gustavo**, 1996, Un Catálogo de Indicadores Cinemáticos en Rocas Cizalladas. *GEOS*, 16(1): 9-14.

- Toro, R. A. y J. A. Osorio**, 2005, Determinación de los tensores de esfuerzo actuales para el segmento norte de los Andes calculados a partir de mecanismos focales de sismos mayores. Boletín de Geología Vol. 27, No. 1: 14-24
- Torres-Hernández, J. R.**, 2009, Origen y emplazamiento de las Ignimbritas Cantera y Panalillo del Campo Volcánico de San Luis Potosí. Tesis Doctoral. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. 204 pp.
- Torres-Hernández, R. y M. Tristán-González**, 2015, Evidencias de Transpresión Tectónica en la parte sur de la Mesa Central de México. Resumen de la Sesión de Geología estructural y Tectónica, Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana. Puerto Vallarta, México.
- Tristán-González, M. y J. R. Torres-Hernández**, 1994, Geología de la Sierra de Charcas, Estado de San Luis Potosí. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Volumen 11, Núm. 2: 117-138.
- Tristán-González, M., A. Aguillón-Robles, J. R. Barboza-Gudiño, J. R. Torres-Hernández, H. Bellon, R. López-Doncel, R. Rodríguez-Ríos y G. Labarthe-Hernández**, 2009, Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 61, Núm 3: 287-303.
- Tranos, Markos y Olivier Lacombe**, 2014, Late Cenozoic faulting in SW Bulgaria: Fault geometry, kinematics and driving stress regimes. Implications for late orogenic processes in the Hellenic hinterland. Journal of Geodynamics 74: 32-55.
- Wu, Jonathan E., Kent McClay, Paul Whitehouse y Tim Dooley**, 2009, 4D analogue modelling of transpresional pull-apart basins. Marine and Petroleum Geology 26: 1608-1623.
- Xu, S.S., Nieto-Samaniego, A., Alaniz-Álvarez, A.**, 2004, Vertical shear mechanism of faulting and estimation of strain in The Sierra San Miguelito. Mesa Central, Mexico: Geological Acta, 2: 189-201.
- Xu, S-S, A.F. Nieto-Samaniego y S. Alaniz-Álvarez**, 2004, Tiling mechanism in domino faults of the Sierra de San Miguelito, central Mexico. Geological Acta Vol. 2 N°3: 189-201
- Xu, Shushan, A.F. Nieto-Samaniego, S. Alaniz-Álvarez y J. M. Grajales-Nishimura**, 2008, Evolution of normal faults in the Oligocene volcanic field of the Mesa Central, Mexico. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 60: 81-82.

**Yamaji, Atsushi y Katsushi Sato**, 2011, Clustering of fracture orientations using a mixed Bingham distributions and its application to paleostress analysis from dike or vein orientations. *Journal of Structural Geology* 33: 1148-1157.

**Yamaji, Atsushi, Katsushi Sato y Satoshi Tonai**, 2010, Stochastic modeling for the stress inversion of vein orientations: Paleostress analysis of Pliocene epithermal veins in southwest Kyushu Japan. *Journal of Structural Geology* 32: 1137-1146.

## Anexo I. Tablas de datos de campo

**Tabla 2 Datos Falla Arbolito 1**

PUNTO	RUMBO	ECHADO	PITCH	PLUNGE	X	Y	TIPO	Grupo	Conj	OBSERVACIONES	MUESTRA
295	160	22			322104	2414245	so			buzamiento sw	
296	342	78			322104	2414245	fractura			buzamiento ne	
297	300	42			322282	2413923	f piro			buzamiento sw	
298	348	43			322261	2413912	so			buzamiento ne	
299	110	29			322261	2413912	so			buzamiento sw	
300	332	89			322261	2413912	falla			harina de falla	
301	138	43	76 s		322261	2413912	falla	2	1		
302	315	86			322261	2413912	falla				
303	338	86			322261	2413912	falla				
304	266	72	88 s		322296	2413837	falla	3	1		
305	286	80	86 s		322296	2413837	falla	3	1		
306	129	50	76 sw		322296	2413837	falla	2	1	presencia piroclasticos	
307	6	32			322352	2413813	so			buzamiento e	
308	4	32			322352	2413813	so			buzamiento e	
309	330	52	30 sw		322358	2413813	falla	2	1	normal	
310	306	27			322358	2413813	so			buzamiento ne	
311	339	82	86 ne		322524	2413787	falla	3	2	buzamiento ne	
312	280	73	69 se		322524	2413787	falla	2	3	buzamiento s	
313	175	85	75 sw		322524	2413787	falla	2	2		
314	145	58	85 nw		322574	2414009	falla	3	2	buzamiento sw	
315	314	16			322574	2414009	falla			buzamiento ne	
316	234	80			322481	2414024	so				
317	315	22			322628	2413941	so			buzamiento ne	
318	50	22			322628	2413941	so				
319	122	80			322644	2413917	so			buzamiento sw tlp	

320	177	51	70 sw		322462	2414080	falla	2	2	buzamiento w	
321	308	20			322462	2414080	so			buzamiento ne	
322	130	86			322513	2414111	so			buzamiento sw	
323	285	29			322546	2414172	so			buzamiento n	

**Tabla 3 Datos Falla Cerro Prieto**

PUNTO	RUMBO	ECHADO	PITCH	X	Y	TIPO	OBSERVACIONES	MUESTRA	Grupo	Conjunto
195	310	68		315660	2421925	dique				
196	290	70		315660	2421925	dique				
197	320	86		315660	2421925	dique				
198	45	70		315660	2421925	dique				
199	315	50		315660	2421925	dique				
200	316	85		315660	2421925	dique				
201	336	45		315660	2421925	dique				
202	120	83		315660	2421925	dique				
203	250	68	89 NW	316436	2422457	indicador			2	2
204	100	55	15 S	316436	2422457	indicador			2	1
205	64	78		316436	2422457	fractura				
206	103	74	61 S	316454	2423789	indicador			2	1
207	305	80		316454	2423789	dique				
208	294	25		316454	2423789	SO				
209	222	88		316454	2423789	fractura				
210	337	57		316766	2424008	dique				
211	334	56		316766	2424008	dique				
212	319	56	90 SW	316766	2424008	indicador			3	1
213	335	70	88 NE	316766	2424008	indicador			3	1
214	66	67	60 E	318434	2419383	indicador			2	2
215	210	55		318434	2419383	plano				
216	237	49		318434	2419383	plano				
217	120	75	85 SE	320774	2421301	indicador			3	1
218	95	50	68 SE	320774	2421301	indicador			2	1
219	66	68		320774	2421301	fractura				
220	350	78		320774	2421301	fractura				
221	35	57		320774	2421301	fractura				
222	176	72		320774	2421301	fractura				
223	175	69		320774	2421301	fractura				
224	173	75		320774	2421301	fractura				
225	179	72	61	320610	2421403	indicador				

			SW							
226	155	52		320610	2421403	flujo				
227	180	88		318727	2419299	fractura				
228	330	86		318727	2419299	fractura				
229	335	85		318727	2419299	fractura				
230	325	65		318727	2419299	fractura				
231	140	86	34 NW	318533	2419194	indicador			2	1
232	170	81	67 SW	318533	2419194	indicador			2	1
233	28	90		318533	2419194	fractura				
234	228	78	90 NW	318533	2419194	indicador			3	1
235	235	55		318533	2419194	fractura				
236	305	55	68 E	318533	2419194	indicador			2	1
237	114	70	88 W	318533	2419194	indicador			3	1

**Tabla 4 Datos Falla Coahuila-Texas**

PU NT O	RU MB O	ECH ADO	PITCH	X	Y	TIPO	Gr up o	Conj	OBSERVACIONES	MUESTR A
37	322	75	18 SE	319716	2417689	falla 1				
38	95	68		319716	2417689	falla			presencia de indicadores cinematicos en 3 diversas direcciones, posiblemente 3 etapas? Sigmoide	
39	341	62		319716	2417689	falla				
40	299	89		319716	2417689	falla				
41	301	73		319716	2417689	falla				
42	282	89		319716	2417689	falla				
43	304	78	79NE 49SE 36NW	319716	2417689	indicador	2	1		
44	292	90		319716	2417689	indicador				SM-06
45	309	53	23 NW	320309	2428060	indicador	2	1	presencia de estrias y pliegues por flujo de lavas	
46	189	90	14 SW	320349	2428085	indicador	2	2		
47	298	75		320309	2428060	falla				
48	220	71		320309	2428060	falla				
49	79	87		320309	2428060	falla				
50	350	73		323687	2429081	flujo			roca volcanica de tex porfiritica	SM-07
51	27	74	77 NE	319528	2427852	indicador	3	2		
52	184	82	78 SE	319528	2427852	indicador	3	2	estrias en diferente dirección a las convencionales	
53	157	56		318972	2426365	flujo				
54	349	83	40 NW	318972	2426365	indicador	2	1		
55	292	89		318972	2426365	falla				SM-08

56	280	89		318972	2426365	dique				
57	316	72		318972	2426365	falla				
58	125	59		318972	2426365	falla				
59	16	77		318482	2426103	falla			presencia de cataclastitas (harina de falla)	
	304	78	79NE	319716	2417689	indicador	3	1		

Tabla 5 Datos Falla El Arbolito

PUNTO	RUMBO	ECHADO	PITCH	X	Y	TIPO	Grupo	Conj	OBSERVACIONES	MUESTRA
142	151	58		322084	2414390	plano				
143	75	78		322084	2414390	plano				
144	319	78		322084	2414390	plano				
145	202	82		322084	2414390	plano				
146	291	50	84 N	322084	2414390	indicador	3	1		
147	248	76	56 NW	322084	2414390	indicador	2	5		
148	71	75	58 NW	322084	2414390	indicador	2	2		
149	295	41		322084	2414390	plano				
150	160	66		322120	2414459	fractura				
151	150	81		322042	2414627	flujo				
152	145	68		322003	2414657	flujo				
153	252	90	90 NW	321987	2414685	indicador	3	1		
154	148	68	26 SE	321902	2414720	indicador	2	1		
155	140	55	48 SE	321856	2414757	indicador	2	1		
156	155	79	50 SE	321846	2414846	indicador	2	1		
157	280	43	75 NE	321604	2414801	indicador	3	1		
158	263	54	72 NE	321604	2414801	indicador	2	2		
159	194	68		321594	2414798	plano				
160	276	90		321594	2414798	plano				
161	196	81		321594	2414798	plano				
162	215	68		321594	2414798	plano				
163	254	65		321594	2414798	plano				
164	250	78		321594	2414798	plano				
165	250	81		321594	2414798	plano				
166	250	85	51 W	321594	2414798	plano	2	5		
167	268	81	40 W	321670	2414793	indicador	2	4		
168	140	67	90 NE	321670	2414793	indicador	3	2		
169	194	90	72 SE	321670	2414793	indicador	2	3		
170	260	90		321882	2414631	dique				
171	60	81		322622	2414525	flujo				
172	98	55		322622	2414525	plano				

173	94	72	87 S	322622	2414525	indicador	3	1		
174	112	49	72 SE	323813	2415660	indicador	2	1		
175	302	80	80 NW	323813	2415660	indicador	3	2		
176	140	80	74 S	323751	2415677	indicador	2	1		
177	310	31		323570	2415684	indicador				
178	132	57		323777	2415695	flujo				
179	118	82	61 W	323807	2415647	indicador	2	4		
180	234	57	82 W	323807	2415647	indicador	3	3		
181	295	90	45 W	323807	2415647	indicador	2	4		
182	160	70	90 SW	323803	2415633	indicador	3	2		
183	105	90	69 SW	323803	2415633	indicador	2	4		
184	128	33	60 NE	323803	2415633	indicador	2	1		
185	48	68	54 E	321536	2419290	indicador	2	2		
186	208	90	73 NW	320096	2417566	indicador	2	3		
187	209	83	82 W	320096	2417566	indicador	3	3		
188	260	90	81 NW	320096	2417566	indicador	3	1		
189	163	73		320069	2417665	vitrofiledo				
190	1	55	81 E	320066	2417692	indicador	3	4		
191	295	14		319991	2417683	estrato				
192	19	70		320020	2417695	fractura				
193	155	72	38 SE	319971	2417596	indicador	2	1		
194	131	59	84 SE	319971	2417596	indicador	3	2		

**Tabla 6 Datos Falla Fracción Sánchez**

PUNTO	RUMBO	ECHADO	PITCH	PLUNGE	X	Y	TIPO	Grupo	Conj	OBSERVACIONES	MUESTRA
400	36	54	90 SE		325411	2410749	ind	3	1	SE	
401	208	79			325411	2410749	falla			NW arreglos anemostados	
402	75	65	43 SW		325391	2410833	ind	2	1	SE	
403	302	35			325391	2410833	foli			NE	
404	302	40			325391	2410833	foli			NE	
405	302	42			325391	2410833	foli			NE	
406	235	77	60 W		325400	2410833	ind	2	1	NW	
	150	67	80 SW		325400	2410833	f1	3	1	SW	
408	114	62	90 SW		325400	2410833	f1	3	2	S	
409	66	88			325400	2410833	f2			SE	
410	60	90			325400	2410833	f2			S	
411	60	82			325400	2410833	f2			SE	

412	73	64			325400	2410833	f2			S	
413	105	82			325400	2410833	f2			S	
414	105	78	90 S		325400	2410833	f1	3	2	SE	
415	75	70			325400	2410833	f2			N	
416	202	49			325400	2410833	falla			N	
417	105	90			325400	2410833	dique			Divide Tis con Toc	
418	152	30			325427	2410969	falla			SW	
419	muestra				325442	2411128				dique piroclastico	Pi
420	306	80			325482	2411219	falla			falla normal	
421	105	90			325482	2411219	dique			Toc bordea el dique	
422	105	84			325482	2411219	falla				
423	316	45			325482	2411219	foli			NE flujo piroclastico	
424	168	88			325474	2411265	dique				
425	315	35			325452	2411291	dique			NE	D2
426	300	80	76 N		325461	2411306	falla	2	1	NE	
427	307	58			325466	2411348				NE	
428	285	29			325498	2411398	foli			N	
429	202	50	66 W		325435	2411299	f1	2	2	NW	
430	60	90			325406	2411333	dique				SM09
431	242	56	51 W		325405	2411326		2	1	NW	
432	186	58	84 W		325412	2311341	f1	3	1	NW	
433	30	90			325379	2411339	dique				
434	200	90			325172	2411093	dique			conjugados	
435	250	90			325172	2411093	dique			conjugados	
436	322	41			325172	2411093	foli			NE	
437	170	42			325161	2411093	fractura			W	
438	170	39	76 W		325161	2411093	falla	2	2	W	
439	232	89	28 W		325161	2411093	falla	2	1	NW	
conglomerado					325182	2411124					
conglomerado					325005	2410952					
conglomerado					325132	2410914					
conglomerado					325237	2410892					
conglomerado					325265	2410869				fin del conglomerado ?	

**Tabla 7 Datos Falla La Boquilla**

PUNTO	RUMBO	ECHADO	PITCH	X	Y	TIPO	Grupo	Conj	OBSERVACIONES	MUESTRA
106	5	72	65 NE	316766	2417981	falla	2	3	secundaria asociada	
107	282	78	85 NE	316766	2417981	falla	3	1	secundaria asociada	
108	315	84	74 SE	316766	2417981	falla	3	1	secundaria asociada	
109	343	51	59 NE	316766	2417981	indicador	2	1	falla	
110	344	52	51-53-50 SE	316766	2417981	indicador	2	3	3 indicadores	
111	160	68		316766	2417981	falla				
112	130	51	57 S	316766	2417981	indicador	2	1		
113	132	49	51 SW	316766	2417981	indicador	2	1		
114	168	75		316766	2417981	falla				
115	156	55	58 SW	316766	2417981	indicador	2	1		
116	319	72		316747	2417930	flujo			presencia de sigmoides	
117	350	90	72 SE	316370	2417489	indicador	3	1	dextral derecho	
118	82	66	56 SW	316370	2417489	indicador	2	2		
119	95	29	35 SE	316370	2417489	indicador	2	1		
120	172	60	57 SW	316370	2417489	indicador	2	1		
121	47	52	51 SE	316370	2417489	indicador	2	2	harinas de falla	
122	140	58	88 SW	316124	2417681	indicador	3	2		
123	146	56	57 SW	316124	2417681	indicador	2	1		
124	105	59	77 SW	316124	2417681	indicador	3	2		
125	209	69		315788	2417867	flujo				
126	225	55		315788	2417867	fractura			flujo	
127	219	77		315788	2417867	fractura			flujo	
128	215	73		315788	2417867	fractura			flujo	
129	219	83		315788	2417867	fractura			flujo	
130	219	80		315794	2417873	flujo			fallas Riddel	
131	323	65	4 SW	315633	2418043	indicador	1	1		

132	50	73	73 SE	315633	2418043	indicador	2	2	falla	
133	5	78	58 SE	315633	2418043	indicador	2	3	falla	
134	44	90		315633	2418043	falla				
135	86	75	62 S	315633	2418043	indicador	2	2		
136	179	48	52 SW	315666	2418309	indicador	2	1		
137	348	90		315303	2418309	dique				
138	358	90		315303	2418309	dique				
139	359	90		315303	2418309	dique				
140	151	72	40 SE	315247	2418353	dique	2	1	estria	
141	312	90	87 NW	313250	2419639	indicador	3	1		
foto	312	90		315788	2417772				foto de fallas arroyo	
dique -Panal				314924	2418945				dique o Panalillo Inf	
Toc				314737	2419123				Traquita Ojo Caliente	
Panalillo				313795	2419457				Panalillo Inferior	
Panalillo				313377	2419835				Panalillo Inferior	

**Tabla 8 Datos Falla Ojo Caliente 3**

PUNTO	RUMBO	ECHADO	PITCH	X	Y	TIPO	Grupo	Conj	OBSERVACIONES	MUESTRA
61	122	86		317900	2416856	falla				
62	143	83		317900	2416856	falla				
63	140	79		317900	2416856	falla				
64	106	28		317900	2416856	S0				
65	122	81		317900	2416856	dique				MS-09
66	120	73		317900	2416856	dique				
67	126	80		317900	2416856	falla				
68	120	81		317900	2416856	falla				
69	144	66		317900	2416856	falla				
70	124	86		317900	2416856	falla				
71	84	18		317900	2416856	estrato				
72	92	31		317900	2416856	estrato				
73	81	20		317900	2416856	estrato				
74	308	90	90 NE	317203	2416970	indicador	3	1		
75	284	63	85 NE	317101	2417021	indicador	3	2		

76	90	78		316940	2416763	falla				
77	261	22		316940	2416763	S0				
78	34	84		316117	2415919	foliacion				
79	158	79		316117	2415919	falla				
80	36	51	38 SW	315881	2415637	indicador	1	2		
81	96	90	11 W 79 SE	315832	2415629	indicador	1	3		
82	90	88	6 W	315832	2415629	indicador	1	3	presencia de diversas estrias y conjunto 3-1	
83	146	86		315832	2415629	fractura				
84	31	81		315832	2415629	fractura				
85	142	62		315832	2415629	fractura				
86	5	82		315832	2415629	fractura				
87	75	75	63 SW	315157	2415331	indicador	2	2		
88	112	82		315157	2415331	fractura				
89	289	80	61 NE	315169	2415655	indicador	2	2		
90	340	75	59 NE	315169	2415655	indicador	2	1	posible estria por flujo	
91	118	61	87 SW	315098	2415733	flujo	3	1		
92	116	78	88 SW	315021	2415848	indicador	3	1		
93	173	68	90 SW	315021	2415848	falla	3	2		
94	174	78	21 N	315021	2415848	falla	1	2		
95	143	59	19 N	315021	2415848	falla	1	1		
96	130	65	19 N	314836	2415994	indicador	1	1		
97	132	65	19 N	314836	2415994	indicador	1	1		
98	121	63	60 SE	314836	2415994	indicador	2	1		
99	131	69	75 SE	314836	2415994	indicador	3	1		
100	45	65	62 W	314836	2415994	indicador	2	2		
101	131	69	89 NW	314836	2415994	indicador	3	1		
102	62	73		314836	2415994	falla				
103	115	85		314836	2415994	falla				
104	319	88		314836	2415994	indicador			lateral izquierda	
105	318	81		314949	2415790					

**Tabla 9 Datos Falla Ojo Caliente**

PUNTO	RUMBO	ECHADO	PITCH	X	Y	TIPO	Grupo	Conj	OBSERVACIONES	MUESTRA
1	325	50	90	317227	2419109	falla 2	3	1	estria 90°	
2	345	86		317175	2419202	dique			sigmoide	ST-01
3	327	90		317136	2419199	dique				
4	76	70		317009	2419239	fractura				
5	111	70		316842	2419136	dique				
6	117	51		316802	2419140	flujo			direccion de flujo	
7	105	55		316802	2419140	dique				
8	321	60		316732	2419174	dique				
9	171	35		316732	2419174	flujo			direccion de flujo	
10	104	82		316796	2419191	dique				
11	82	90		316694	2419203	flujo				
12	336	76		316694	2419203	clivaje				
13	206	80		316694	2419203	clivaje				
14	144	71		316603	2419111	brecha				ST-02
15	154	90	60	316603	2419111	falla 1	2	1	mineralizacion	ST-03
16	129	72	60	316578	2419144	falla 1	2	1	indicador cinematico	
17	28	52	90	316574	2419171	falla 2	3	1	estria vertical	
18	149	79	51	316574	2419171	falla 1	2	1	hay varias estructuras	
19	4	49		316552	2419199	falla 1			componente l izq	
20	135	62	73	316550	2419221	ind mov	2	1	def lat izq	
21	151	90	54	316546	2419228	ind mov	2	1		
22	151	78	29	316515	2419288	ind mov	2	1		
23	162	85	31	316502	2419322	ind mov	2	1	des lat der	
24	264	65	0	316502	2419322	ind mov	1	1	presencia de ridel	
25	167	65	21	316481	2419367	ind mov	1	1		
26	155	90		316425	2419416	relevo			posible relevo	
27	290	90		316562	2419143	dique			cerca de flujos	
28	80	19		316470	2418975	vitrofito				
29				316397	2419002					ST-04
30				316505	2419056				cerca del arroyo	ST-05
31	295	90		316598	2419049	dique				
32	132	66	90	316669	2419064	falla	3	1		
33	154	71	75	316669	2419064	falla	3	1	estrias	
34	231	90		317085	2419156	dique				
35	314	69		317175	2419202	dique				
26	82	29		317136	2419199	flujo				

**Tabla 10 Datos Falla Santa María**

PUNTO	RUMBO	ECHADO	PITCH	X	Y	TIPO	Grupo	Conj	OBSERVACIONES	MUESTRA
-------	-------	--------	-------	---	---	------	-------	------	---------------	---------

238	306	74		320680	2412759	fractura			Tis	
239	315	72		320680	2412759	fractura				
240	30	78		320680	2412759	fractura				
241	120	70		320680	2412759	fractura				
242	319	80		320680	2412759	fractura			sigmoide?	
243	334	74		320680	2412759	fractura			sigmoide?	
244	10	76		320680	2412759	fractura			sigmoide?	
245	145	74		320680	2412759	falla			harina	
246	290	90		320415	2412817	falla			mineralizacion	
247	310	90		320415	2412817	falla			mineralizacion	
248	320	90		320415	2412817	falla				
249	335	68		320316	2413066	falla			mineralizacion	
250	5	56		320272	2413129	plano f				
251	60	76	48 E	320297	2413179	indicador	2	1		
252	275	90		320297	2413179	falla				
253	95	90		320297	2413179	falla				
254	220	50		320297	2413179	falla				
255	50	71		320297	2413179	falla				
256	70	52		320297	2413179	falla				
257	114	50		320297	2413179	falla				
258	192	80		320297	2413179	falla				
259	145	86		320297	2413179	falla				
260	240	86		320327	2413199	falla				
261	175	75		320327	2413199	falla				
262	344	72		320327	2413199	falla				
263	240	58		320327	2413199	falla				
264	325	72	79 NW	320327	2413199	falla	2	1		
265	290	68	27 E	320327	2413199	falla	2	1		
266	254	75		320087	2413136	plano f			mineralizacion	
267	70	77		320022	2413156	plano f				
268	294	65		320001	2413125	plano f				
269	30	82		320001	2413125	plano f				
270	40	72		320001	2413125	plano f				
271	30	70		320001	2413125	plano f				
272	14	69		320001	2413125	plano f				
273	342	68		320001	2413125	plano f				
274	355	67		320001	2413125	plano f				
275	45	90		319630	2413236	plano f				
276	150	71		320348	2413029	plano f				
277	170	65		320387	2412965	flujo			latita	
278	100	71		320399	2412954	plano f				

279	130	80		320399	2412954	plano f				
280	330	82		320399	2412954	plano f				
281	40	72		320399	2412954	plano f				
282	33	89		320399	2412954	plano f				
283	130	53		320397	2412921	plano f				
284	65	88		320397	2412921	fractura				
285	48	85		320397	2412921	fractura				
286	129	74		320397	2412921	fractura				
287	130	86		320397	2412921	fractura				
288	140	74		320397	2412921	fractura				
289	150	74		320397	2412921	fractura				
290	132	52		320412	2412883	fractura				
291	25	52		320412	2412883	fractura				
292	225	66		320412	2412883	fractura				
293	255	79		320446	2412813	fractura				
294	164	60		320446	2412813	fractura				

**Tabla 11 Datos Falla Las Chivas**

PUNTO	RUMBO	ECHADO	PITCH	X	Y	TIPO	Grupo	Conj	OBSERVACIO	MUESTRA
1	335	18		320441	2416250	Falla				
2	295	25		319844	2416262	foli				
3	275	25		319844	2416262	foli				
4	188	84		319987	2416265	falla				
5	270	24		319987	2416265	foli				
6	280	24		319987	2416265	foli				
7	330	20		320033	2415880	foli				
8	290	62		319927	2415733	foli				
9	150	17		319884	2415693	Falla				
10	86	90		319895	2415582	frac				
11	118	81		319895	2415582	frac				
12	275	88		319651	2415438	Falla				
13	275	90		319651	2415438	dique				
14	125	60		319635	2415405	dique				
15	115	90		319635	2415405	dique				
16	110	90		319629	2415371	dique				
17	110	80		319629	2415371	dique				
18	260	56	60 w	319629	2415371	Falla	2	1		
19	290	90	75 w	319629	2415371	Falla	3	1		
20	155	58	15 se	319583	2415284	Falla	1	1		
21	349	78		319583	2415284	frac			r1	
22	100	69		319583	2415284	frac			r1	

23	118	60	90 sw	319583	2415284	Falla	3	1		
24	353	82	20 se	319583	2415284	Falla	1	1		
25	175	9		319583	2415284	foli				
26	130	78	90 sw	319583	2415284	Falla	3	1		
27	150	65	66 sw	319583	2415284	Falla	2	1		
28	334	30		319567	2415648	Falla				
29	122	59	70 sw	319402	2415688	Falla	2	1		
30	120	62	75 sw	319402	2415688	Falla	2	1		
31	115	56		319402	2415688	dique				
32	210	7		319177	2415809	foli				
33	120	88	90 sw	319177	2415809	Falla	3	1		
34	310	35		319266	2416024	foli				
35	169	85		319266	2416024	Falla				
36				319994	2415808				Tlp	x
Tap				320156	2416564					
Tap				320058	2416694					
Cgl				319976	2416803					
Tlp-Toc				319959	2415780					
Tlp-Toc lim				319864	2415587					
Tlp-Tis				319494	2415576					
Tis (dif)				319438	2415648					
Tis-Toc				319177	2415809					
Toc				319276	2416094					
Tlp				319361	2416215					

**Tabla 12 Datos Falla Delimitante Este (E)**

PUNTO	RUMBO	ECHADO	PITCH	X	Y	TIPO	Grupo	Conj	OBSERVACIONES	MUESTRA
1	320	31		317003	2420716	FALLA			NE	
2	12	78		316714	2420636	FALLA			NW	
3	82	72		316714	2420636	FALLA 3			SE	
4	24	81		316714	2420636	FALLA 3			NW	
5	45	8		316686	2420649	FALLA 3			NE	
6	30	42		316648	2420724	FOLI			NW	
7	163	55	40 SE	316648	2420724	IND	1	1	SW	
8	163	55	20 SE	316648	2420724	IND	1	1	SW	
9	300	80		316648	2420724	FALLA			SW	
10	330	81		316648	2420724	FALLA			SW	
11	275	80		316648	2420724	FALLA			SW	
12	271	80		316648	2420724	FALLA			SW	
13	140	81		316648	2420724	FRACT			SW	

14	270	12		316422	2420972	FOLI			NW	
15	10	76		316422	2420972	FALLA 2			W	
16	290	30		316229	2421217	FALLA			NE	
17	322	90		316229	2421217	DIQUE				
18	340	90		316229	2421217	DIQUE				
19	340	90		316229	2421217	DIQUE				
20	325	90		316229	2421217	DIQUE				
21	170	55		316229	2421217	FRACT			E	
22	130	90		316229	2421217	FRACT			NE	
23	328	10		315834	2421557	FOLI			NE	
24	330	72		315834	2421557	DIQUE			NE	
25	325	80		315971	2421528	FALLA			SW	
26	340	80		315971	2421528	DIQUE			NE COMPLEJO DIQUES	
27	290	73		315021	2421524	FALLA			FALLA MAESTRA	
28	140	90	0	316033	2421389	FALLA	1	1		
29	141	88	70 SW	316033	2421389	FALLA	2	1		
30	128	88	66 S	316033	2421389	FALLA	2	1		
31	175	90	0	316331	2421068	FALLA	1	1		
32	50	71		317043	2420299	FALLA				
33	75	90		317043	2420299	FALLA				
34				316993	2420321				brecha tap	
35				316988	2420330				fin brecha	
36				316714	2420636				discordancia conglom	
37				316436	2420659				cgl con matriz soport	
38				316422	2420972				cgl tap	
39				316670	2420694				falla (vista)	
40				316762	2420582				entrada diques	
41				316057	2421513				contacto tap-tlp	
42				316161	2421268				cgl basculada carretera	
43				316042	2421543					muestra