



# Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ingeniería  
Colegio de Geofísica

*“Análisis geológico-estructural de la Falla Tuxtla-Malpaso en las cercanías de Felipe Ángeles, Veracruz y Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: implicaciones en los yacimientos naturalmente fracturados del SE de México”*

## TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
Licenciatura en Ingeniería Geofísica

PRESENTA:

María Fernanda Sampayo Rodríguez

Director Interno:

M. I. Raúl Vázquez Sánchez

Director Externo

Dr. Alberto Vázquez Serrano

Puebla, Pue.

Junio 2023

INGENIERÍA  
FACULTAD





**BUAP**

Oficio No. SAC/0307/2023

**C. María Fernanda Sampayo Rodríguez -201654336-  
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería  
Geofísica  
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**“ANÁLISIS GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA FALLA TUXTLA-MALPASO EN LAS CERCANÍAS DE FELIPE ÁNGELES, VERACRUZ Y TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS: IMPLICACIONES EN LOS YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS DEL SE DE MÉXICO”**

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Asesor de tema al Mtro. Raúl Vázquez Sánchez.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

**Atentamente**

**“Pensar bien para vivir mejor”  
H. Puebla de Z. a 03 de febrero de 2023**

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora  
Director**



**M'ACGZ/M'VGL/barv  
C.c.p. Archivo**

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**  
**Director de la Facultad de Ingeniería**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**P r e s e n t e.**

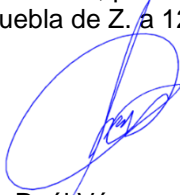
El que suscribe: Mtro. Raúl Vázquez Sánchez, asesor del tema de tesis:

**“ANÁLISIS GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA FALLA TUXTLA-MALPASO EN LAS CERCANÍAS DE FELIPE ÁNGELES, VERACRUZ Y TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS: IMPLICACIONES EN LOS YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS DEL SE DE MÉXICO.”**

Presentada por la C. María Fernanda Sampayo Rodríguez -201654336-, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/0307/2023 con fecha de emisión 03 de febrero de 2023, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

**A t e n t a m e n t e**  
**“Pensar bien, para vivir mejor”**  
**H. Puebla de Z. a 12 de junio de 2023**



**Mtro. Raúl Vázquez Sánchez**  
**Asesor de Tema**

**M'RVZ/BARV**  
**C.c.p. Archivo**

## **Agradecimientos**

Agradezco al proyecto PAPIIT IA100221 “Estudio integral de fallas y fracturas de la Provincia de Fallas Laterales de Chiapas: implicaciones en la reactivación, herencia y formación de fracturas” por el apoyo a la realización de esta tesis. Al Instituto de Geología de la UNAM por el préstamo del material de campo.

Gracias a Dios, por todos sus cuidados y bendiciones que ha derramado en mi vida. Por darme la sabiduría y fortaleza para alcanzar todas mis metas.

Quiero agradecer al Dr. Alberto Vásquez Serrano por la dirección y revisión de esta tesis. Gracias por la confianza depositada en mí para la elaboración de esta tesis, por retarme a incursionar en una nueva área de estudio, por todo el apoyo, lecciones, consejos y conocimiento compartido. Al M. I. Raúl Vásquez Sánchez por haber pensado en mí para este trabajo, por la confianza y por el apoyo académico y moral brindado. Gracias por todas las clases y enseñanzas compartidas, por motivarnos a ser unos mejores ingenieros.

A mis padres, Ramón y Matilde, por el apoyo incondicional dado durante toda mi vida. A mi papá, por todo su amor, el apoyo económico brindado y por motivarme cada día a superarme. A mi mamá, por su amor incondicional, por creer siempre en mí y por cada uno de sus cuidados. A mi hermano Saúl, por toda su motivación, amor y por ser un ejemplo para mí. A mi abuelita Tina, por tenerme presente en todas sus oraciones, por todo su amor y por cada una de las historias compartidas.

Agradezco a la familia Santiago González (Rosa, Edgar, Samantha e Iker) por siempre estar presentes, por todo el amor brindado y por cada una de las aventuras compartidas.

A mis amigos Ana, Alexia y Aarón, por haberse convertido en mi segunda familia en Puebla, por su amistad, por cada una de las aventuras y risas compartidas. En especial a Evelyn, por compartir esta aventura llamada Universidad, por las largas pláticas, risas y desveladas, por todo el aprendizaje, apoyo y consejos brindados. A Edgar por su amistad a lo largo de tantos años.

A mi mejor amiga Scarlett, por su amistad incondicional y todo el cariño demostrado a lo largo de los años, por creer siempre en mí y por todo el apoyo, así como a su familia por hacerme parte de ella.

Finalmente, agradezco a los sinodales, a la M. C. Daniela Delgado Ayala y al Ing. Isaac Raúl Soriano Garibo por la revisión de este escrito, así como cada una de las sugerencias y observaciones realizadas en pro de la mejora de este trabajo.

## **Dedicatoria**

*A mis padres, Ramón y Matilde,  
por ser mi más grande ejemplo  
de superación y trabajo duro.*

# Índice

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Capítulo 1. Introducción .....	3
1.1 Localización del área de estudio .....	4
1.2 Planteamiento del problema.....	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Objetivos .....	6
1.4.1 Objetivo General.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Hipótesis .....	6
Capítulo 2. Marco teórico .....	7
2.1 Fallas.....	7
2.1.1 Elementos y geometría de una falla .....	8
2.1.2 Tipos de fallas.....	10
2.1.3 Anatomía de las fallas y de las zonas de fallas .....	12
2.2 Fallas de desplazamiento de rumbo (o fallas laterales) .....	13
2.2.1 Fallas de transferencia y transformantes.....	14
2.2.2 Fallas transcurrentes .....	14
2.2.3 Reconocimiento de las fallas de desplazamiento lateral y sus desplazamientos.....	16
2.2.4 Desarrollo y anatomía de las fallas de desplazamiento lateral .....	16
2.2.5 Curvaturas de falla y cruces .....	19

2.2.6	Transpresión y transtensión .....	19
2.3	Cinemática de las fallas .....	20
2.3.1	Indicadores cinemáticos .....	21
2.3.2	Enfoque cinemático de los datos de desplazamiento de fallas.....	24
2.3.3	Mecanismos focales o pelotas de playa .....	27
2.4	Yacimientos de petróleo naturalmente fracturados .....	28
2.4.1	Fracturas .....	29
2.4.2	Clasificación geológica de las fracturas.....	30
2.4.3	Morfología de las fracturas .....	31
Capítulo 3. Marco Geológico .....		33
3.1	Estratigrafía de la zona de Felipe Ángeles, Veracruz.....	33
3.1.1	Jurásico .....	33
3.1.2	Cretácico .....	35
3.1.3	Paleógeno .....	36
3.1.4	Neógeno .....	37
3.1.5	Cuaternario .....	38
3.2	Estratigrafía de la zona de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.....	38
3.2.1	Jurásico .....	38
3.2.2	Cretácico .....	39
3.2.3	Paleógeno .....	41
3.2.4	Neógeno .....	43
3.2.5	Cuaternario .....	45

Capítulo 4. Marco Tectónico.....	46
4.1 Sierra Madre de Chiapas .....	46
4.2 Provincia de Fallas Laterales de Chiapas .....	47
4.3 Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso .....	49
4.4 Sismicidad en la Provincia de Fallas laterales de Chiapas .....	50
Capítulo 5. Metodología .....	51
5.1 Trabajo de campo .....	51
5.1.1 Identificación de la estratigrafía y estructuras.....	53
5.1.2 Mediciones estructurales .....	54
5.1.3 Identificación de indicadores cinemáticos.....	55
5.2 Trabajo de gabinete .....	56
5.2.1 Identificación de lineamientos estructurales .....	56
5.2.2 Creación de mapas geológicos-estructurales.....	57
5.2.3 Creación de secciones geológicas .....	57
5.2.4 Procesado de datos estructurales .....	58
Capítulo 6. Resultados .....	60
6.1 Estructuras a escala kilométrica.....	60
6.1.1 Zona norte de la falla Tuxtla-Malpaso (Área de Felipe Ángeles) .....	60
6.1.2 Zona centro de la falla Tuxtla-Malpaso (Área de Tuxtla Gutiérrez).....	64
6.2 Estructuras a escala mesoscópica .....	70
6.2.1 Datos de estratificación .....	70
6.2.2 Fracturas geológicas en el área de estudio .....	71
6.2.3 Orientación de las fracturas geológicas.....	75

6.3	Relación frecuencia-tamaño de las estructuras en la zona de falla Tuxtla-Malpaso	81
Capítulo 7. Discusión .....		83
7.1	Historia de deformación de la falla Tuxtla-Malpaso.....	83
7.1.1	Deformación de la falla Tuxtla-Malpaso.....	83
7.1.2	Desplazamiento de la falla Tuxtla-Malpaso .....	89
7.2	Evolución de la falla Tuxtla-Malpaso a través del tiempo.....	92
7.3	Implicaciones en los yacimientos de hidrocarburos del sureste de México.....	94
7.3.1	Importancia del estudio de las fallas y fracturas .....	96
Capítulo 8. Conclusiones .....		100
Bibliografía .....		102
Anexos .....		107

## Índice de figuras

Figura 1.1. Ubicación del área de estudio del Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso.....	4
Figura 2.1. Descripción de una falla y zona de falla. a) Falla. b) Esquema de la relación de la falla principal y las estructuras secundarias. c) Zona de falla, donde se muestra la deformación producida por la falla. (Modificado de Van Der Pluijm y Marshak, 2004).....	7
Figura 2.2. Fallas normal (a), inversa (b) y lateral izquierda (c), y sus mecanismos focales correspondientes. (Modificado de Fossen, 2010).....	8
Figura 2.3. Geometría y elementos de una falla. a) Elementos de una falla normal con componente lateral derecha. b) Perfil lateral de la falla. c) Vista en planta de la falla. d) Perfil perpendicular al rumbo de la falla. (Modificado de Fossen, 2010) .....	9
Figura 2.4. Diagrama de los tipos de fallas de acuerdo al movimiento de sus bloques. a) Falla normal. b) Falla inversa. c) Falla lateral derecha. d) Falla lateral izquierda. (Modificado de Van Der Pluijm y Marshak, 2004) .....	11
Figura 2.5. Falla de desplazamiento lateral izquierda. a) Falla lateral izquierda afectando a capas horizontales. b) Falla lateral izquierda afectando a capas paralelas a la falla. (Modificado de Fossen, 2010) .....	13
Figura 2.6. Modelo físico con dos bloques de madera debajo de una capa de arcilla utilizado por Riedel para entender la zona de falla lateral y sus estructuras secundarias. (Modificado de Fossen, 2010).....	17
Figura 2.7. Esquema comparativo de la orientación de las diferentes estructuras que se forman en una zona de falla lateral derecha e izquierda con base en el modelo de Riedel. (Modificado de Serrano-López, 2020) .....	18
Figura 2.8. Deformación que ocurre en una cizalla simple. (Modificado de Fossen, 2010) .....	20
Figura 2.9. Fracturas secundarias asociadas a fallas según su cinemática. a) Falla lateral derecha. b) Fallas lateral izquierda. La nomenclatura utilizada es la siguiente: M; plano de falla principal, R; fracturas Riedel, R'; fracturas antitéticas, T; fracturas extensionales y P; fracturas de cizalla. (Elaborado con base en Tolson, 1996).....	22
Figura 2.10. Análisis cinemático de datos de fallas. a) Falla normal. b) Proyección estereográfica de los componentes de la falla normal. c) Mecanismo focal obtenido a partir de datos de fallas. (Modificado de Fossen, 2010).....	24

Figura 2.11. a) Esquema de los componentes de una falla normal. b) Proyección de los componentes de la falla normal en un estereograma. (Modificado de Fossen, 2010) ...	26
Figura 2.12. Mecanismos focales asociadas a diferentes cinemáticas de fallas. P; compresión y T; extensión. (Modificado de Fossen, 2010) .....	27
Figura 2.13. Ejemplo de los componentes de una pelota de playa asociada a una falla inversa. (Modificado de Fossen, 2010) .....	28
Figura 2.14. Fracturas presentes en una formación de caliza.....	29
Figura 3.1. Afloramiento perteneciente a la Formación Salina, también denominada como capas rojas, ubicado dentro del núcleo del anticlinal Cerro Pelón (izquierda). Rocas de la Formación Salina ubicadas a 4 km al norte del poblado de San Miguel de Allende, Veracruz (derecha).....	33
Figura 3.2. Afloramiento de caliza de la Formación Chinameca ubicado dentro del anticlinal Cerro Pelón. En este afloramiento se observó presencia de petróleo y olor a gas en las rocas, además de materia orgánica.....	35
Figura 3.3. Afloramiento de margas de la Formación Méndez, ubicado sobre el camino hacia las Isabeles, al sur de Río Playas.....	36
Figura 3.4. Depósitos de arenisca con conglomerado del Eoceno, ubicados cerca del poblado de las Isabeles.....	37
Figura 3.5. Depósitos de limolita del Mioceno, encontrados en el poblado de San Miguel de Allende, Veracruz. ....	38
Figura 3.6. Afloramiento de caliza del Grupo Sierra Madre situado dentro del Cañón del Sumidero, Chiapas.....	39
Figura 3.7. Afloramiento de caliza de la Formación Angostura, ubicado en las inmediaciones de la Carretera Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas.....	40
Figura 3.8. Afloramiento de estratos de arenisca y lutita de la Formación Soyaló. (Foto obtenida de Serrano-López, 2020).....	41
Figura 3.9. Afloramiento de arenisca intercalada con caliza de la Formación Lomut. (Foto obtenida de Serrano-López, 2020).....	42
Figura 3.10. Afloramiento del Grupo Modelo. Izquierda: limolitas; Derecha: caliza. (Fotos obtenidas de Serrano-López, 2020).....	43
Figura 3.11. Afloramiento de la Formación Ixtapa. (Foto obtenida de Serrano-López, 2020).....	44

Figura 3.12. Fotografía de depósitos de ceniza y lahar. (Foto obtenida de Serrano-López, 2020).	45
Figura 4.1. Representación del punto triple formado por las placas tectónicas de Cocos, Caribe y Norteamericana. La línea roja discontinua corresponde a la trinchera Mesoamericana. La línea violeta discontinua delimita el área de la Cuenca Salina del Istmo. La línea negra discontinua representa a la Sierra Madre Oriental. Las líneas negras continuas representan fallas. RT; Ridge de Tehuantepec, SMC; Sierra Madre de Chiapas, SFPM; Sistema de Fallas Polochic-Motagua, SMO; Sierra Madre Oriental. (Mapa realizado con base en Witt et al., 2012)	47
Figura 4.2. Principales unidades fisiográficas de la Sierra Madre de Chiapas. Las líneas negras continuas representan las fallas del Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso (SFTM). Las líneas rojas representan las fallas del Sistema de Fallas de la Sierra Alta (SFSA). FGLV; Falla Grijalva-Las Ventas, SFSA; Sistema de Fallas de la Sierra Alta, PAI; Cuenca pull-apart de Ixtapa, FM; Fallas Malpaso, SCC; San Cristóbal de las Casas, FSC; Falla San Cristóbal; TX; Tuxtla Gutiérrez, FT; Falla Tuxtla, SFTM; Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso. (Mapa realizado con base en Witt et al., 2012)	49
Figura 5.1. Trabajo de campo realizado en las cercanías del poblado de Río Playas, Veracruz. a) Identificación de la estratigrafía y litología de la zona de estudio. b) Medición de datos estructurales.	51
Figura 5.2. Ubicación de la zona de trabajo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y de las estaciones de trabajo. Estaciones de trabajo: TXSC; Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas, TXCHI; Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén, CASCHO; Cascada El Chorreadero...	52
Figura 5.3. Medición de planos de falla y de fracturas realizados en la carretera Tuxtla Gutiérrez–San Cristóbal de las Casas.	53
Figura 5.4. Vista de las diferentes funciones de la aplicación FieldMove Clino. a) Uso de la brújula–clinómetro para la toma de un dato de estratificación. b) Proyección de los datos tomados en un mapa georreferenciado. c) Base de datos estructurales y notas adicionales.	55
Figura 5.5. Indicadores cinemáticos identificados en planos de falla. En color rojo se señala las estrías, en color azul los escalones y las flechas amarillas indican el sentido del movimiento del bloque faltante. a) En la parte superior se tiene un plano de falla con cinemática normal, mientras que en la parte inferior se tiene un plano con cinemática lateral derecha. b) Plano de falla con cinemática lateral izquierda.	56

Figura 5.6. Trazado de lineamientos estructurales en mapa topográfico escala 1:50 000. .....	57
Figura 6.1. Mapa de lineamientos geomorfológicos de la zona norte de la falla Tuxtla-Malpaso, perteneciente al área de Felipe Ángeles, Veracruz. ....	61
Figura 6.2. Sección geológica AA' ubicada en las cercanías de Felipe Ángeles, Veracruz. FTM; Falla Tuxtla-Malpaso, K/Pg; contacto Cretácico-Paleógeno. Exageración vertical: 7x. ....	62
Figura 6.3. Roseta de fracturas y mecanismo focal obtenidos a partir de los lineamientos geomorfológicos de la zona norte de la falla Tuxtla-Malpaso. En el mecanismo focal el plano de falla está resaltado con color rojo. La línea amarilla en la roseta de fracturas indica la orientación preferencial de las fracturas. FEANG; Felipe Ángeles, n; número de muestras.....	63
Figura 6.4. Mapa de lineamientos geomorfológicos de la zona centro de la falla Tuxtla-Malpaso en el área de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Estaciones de trabajo: TXSC; Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las casas, TXCHI; Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén, CASCHO; Cascada El Chorreadero.....	65
Figura 6.5. Sección geológica BB' ubicada en el Cañón del Sumidero, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Esta sección se elabora mediante fotografías tomadas en el área. FTM; Falla Tuxtla-Malpaso. Exageración vertical: 3x.....	66
Figura 6.6. Sección geológica CC' ubicada en las inmediaciones de la carretera, Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas. FTM; Falla Tuxtla-Malpaso. Exageración vertical: 2x. ....	67
Figura 6.7. Rosetas de fracturas y mecanismos focales obtenidos a partir de los lineamientos geomorfológicos de la zona centro de la falla Tuxtla-Malpaso. En el mecanismo focal el plano de falla está resaltado con color rojo. La línea amarilla en la roseta de fracturas indica la orientación preferencial de las fracturas. TXCHI; Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén, TXSC; Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas, n; número de muestras.....	69
Figura 6.8. Estratificación de capas de caliza en la zona de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. a) Caliza masiva, no se distingue la estratificación, solo las fracturas. b) Estratificación mediana a gruesa de capas de caliza en la carretera Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas. c) Estratificación observada en la Cascada El Chorreadero. d) Estratificación observada en el Cañón del sumidero, se observan capas de gran espesor. ....	70

Figura 6.9. Diagrama de polos de los planos de estratificación de la zona de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Se observa la tendencia de los datos de estratificación y la orientación promedio de los datos mediante el plano resaltado en color rojo.....	71
Figura 6.10. Foto tomada en el transecto Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas, donde se observa una fractura extensional rellena por brecha de falla (amarillo) y planos de fallas normales (rojo). Las flechas rojas indican el sentido del movimiento del bloque. ....	72
Figura 6.11. Fracturas extensionales observadas en la zona de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, con dirección N. a) Fracturas abiertas. b) Fracturas rellenas de arcilla. c) Fracturas rellenas de brecha de falla. Las líneas rojas delimitan las paredes de las fracturas, las flechas rojas indican el sentido de apertura. d) Fracturas rellenas de calcita y presencia de fósiles, en amarillos se resaltan las vetillas de calcita y la materia orgánica. ....	73
Figura 6.12. Plano de falla e indicadores cinemáticos observados en campo. Falla joven con cinemática lateral izquierda, con presencia de escalones (azul), estrías (rojo) donde las flechas rojas indican la dirección de estas y crecimiento mineral (amarillo). ....	74
Figura 6.13. Planos de fallas observadas en campo. a) Plano de falla correspondiente a una falla normal, el bloque que falta es el que cae (en rojo se señala el sentido del movimiento), también se observan fracturas extensionales rellenas de arcillas (azul). b) Plano de falla con cinemática lateral izquierda ubicada en la Cascada El Chorreadero, como indicador cinemático se observan escalones los cuales están resaltados en rojo y en amarillo se señala el sentido de movimiento del bloque faltante. c) Plano de falla con cinemática lateral derecha, se pueden observar escalones (azul) y estrías, las flechas amarillas indican la dirección de las estrías. ....	74
Figura 6.14. Planos de falla donde se observa la intersección de dos planos de estrías. a) Plano con escalones donde se interceptan los planos de una falla normal (escalones remarcados de color rojo) y una falla lateral izquierda (escalones marcados con color azul). b) Plano de falla con escalones como indicadores cinemáticos que indican la presencia de una falla normal (escalones rojos) y falla lateral derecha (escalones azules). Las flechas indican el sentido de movimiento de los bloques. ....	75
Figura 6.15. Rosetas de fracturas obtenidas mediante el software GEORient, para las diferentes estaciones de los transectos Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas y Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén. En las rosetas se resalta en color amarillo la dirección	

predominante de las fracturas. Estaciones de trabajo: TXSC; Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas, TXCHI; Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén, CASCHO; Cascada El Chorreadero. ....78

Figura 6.16. Mecanismos focales obtenidos para cada transecto (Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas y Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén). Se distingue entre dos eventos de deformación para cada transecto. En color rojo se resalta el plano de falla y las flechas indican la cinemática. ....80

Figura 6.17. Gráfico log-log de longitud de falla vs frecuencia acumulada. Donde se presentan los datos de longitud de falla y su respectivo ajuste de potencia. C; valor de la pendiente, FTM; Falla Tuxtla-Malpasso, A; Área del mapa en kilómetros de donde se obtuvieron los datos. (Gráfico modificado de Cladouhos y Marrett, 1996) .....82

Figura 7.1. Evidencia encontrada en campo que indica la presencia de dos eventos de deformación, permitiendo así identificar la reactivación de la Falla Tuxtla-Malpasso. a) Presencia de dos conjuntos de estrías superpuestas en el mismo plano de falla pero con diferente dirección. Las flechas azules indican las estrías con cinemática lateral izquierda, mientras que las flechas rojas indican las estrías con cinemática normal. Siendo la falla normal más antigua que la lateral izquierda. b) Representación a escala mesoscópica de los eventos de deformación que tuvieron lugar en la zona de estudio. Las flechas negras indican la cinemática de la falla principal, se aprecian fracturas extensionales, donde las pertenecientes a la cinemática izquierda (flechas rojas) se encuentran cortando a las de la cinemática derecha (flechas azules). c) Presencia de fracturas extensionales donde las fracturas más recientes son las generadas por cinemática izquierda (flechas rojas) y las más antiguas pertenecen a una cinemática derecha (flechas azules). ....84

Figura 7.2. Columna estratigráfica de la cuenca de Ixtapa del Cretácico al Pleistoceno. A la derecha se indican las descripciones de la estratigrafía. En la izquierda se indican los eventos de deformación que dieron lugar a la falla Tuxtla-Malpasso. (Modificado de Serrano-López, 2020). ....87

Figura 7.3. Sección DD', reconstrucción del anticlinal Cerro Pelón, ubicado en la zona norte de la falla Tuxtla-Malpasso para la determinación de la deformación y acortamiento. FTM; Falla Tuxtla-Malpasso, lo; elongación inicial de la capa, lf; elongación final de la capa, Δl; desplazamiento, Fm. Méndez; Formación Méndez, Fm. Chinameca; Formación Chinameca. ....89

Figura 7.4. Vista en planta de la falla Tuxtla-Malpaso. Relación geométrica entre la falla Tuxtla-Malpaso, el análisis se realiza mediante un triángulo rectángulo usando la función trigonométrica $\text{sen}\theta$ , haciendo uso del cateto opuesto (c.o.) y la hipotenusa (H), siendo esta última la distancia del desplazamiento mínimo de la falla Tuxtla-Malpaso.....	91
Figura 7.5. Evolución de la cinemática de la falla Tuxtla-Malpaso a través del tiempo y desarrollo de la cuenca pull-apart de Ixtapa.....	93
Figura 7.6. Sismos y mecanismos focales registrados en el sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso. Información obtenida del catálogo de sismos del Servicio Sismológico Nacional. (Figura modificada de Guzmán-Speziale, 1989). .....	94
Figura 7.7. Ubicación de los campos y pozos petroleros de exploración y desarrollo ubicados en las cercanías de la falla Tuxtla-Malpaso en la provincia petrolera Cinturón Plegado de Chiapas (CPCH). (Mapa elaborado con información del CNH).....	95
Figura 7.8. Afloramiento de la Formación Chinameca situada en la zona norte de la falla Tuxtla-Malpaso catalogada en el sistema petrolero como una roca almacén. a) Caliza impregnada de petróleo y olor fétido a gas. b) Fracturas encontradas en el afloramiento, estas fracturas se encuentran rellenas por hidrocarburos.....	97

## Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de las fallas de desplazamiento lateral. (Obtenido de Sylvester, 1998) .....	15
Tabla 2. Cálculo de la deformación y acortamiento.....	90
Tabla 3. Cálculo del desplazamiento mínimo horizontal. ....	91

## Resumen

La falla Tuxtla-Malpaso se encuentra en la Provincia de Fallas Laterales de Chiapas, la cual abarca una gran parte de la Sierra de Chiapas, así como, el extremo suroriental del estado de Veracruz. Dicha falla presentan una cinemática lateral izquierda y un rumbo general NW50SE, y una longitud aproximada de 200 kilómetros. Se considera una falla joven y activa, que comenzó su actividad en el Mioceno superior. Se asocian estructuras secundarias a esta falla, tales como fallas, fracturas y pliegues. A pesar de su ubicación y de su gran longitud, no se dispone de un estudio geológico-estructural detallado que se centre en el estudio de la cinemática de la falla, así como en la geometría, distribución y tamaño de las fracturas geológicas asociadas a la falla principal. En este trabajo se llevó a cabo el análisis cinemático de la falla, así como de la geometría, distribución y tamaño de las estructuras secundarias en la zona norte y centro de la falla, en las cercanías de Felipe Ángeles, Veracruz y Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. El análisis de los mapas geomorfológicos, las secciones geológicas, los mecanismos focales y las rosetas de fracturas, así como la evidencia obtenida en campo, como lo es que en un mismo plano se corten dos grupos de fracturas con diferentes orientaciones, permitieron comprender la evolución estructural de la falla y determinar que la geometría actual de la falla Tuxtla-Malpaso es el producto de una reactivación, por lo que se propone la existencia de dos etapas de deformación en la falla Tuxtla-Malpaso. La actividad más antigua tuvo lugar al comienzo del Mioceno superior y presenta una cinemática lateral derecha y una dirección NE-SW. La actividad más reciente tuvo lugar durante el Mioceno superior-Plioceno y continúa actualmente con una cinemática lateral izquierda y un rumbo NW-SE. Por otro lado, las fracturas observadas en la zona de estudio presentan una orientación preferencial NW-SE y NE-SW, y son del tipo extensional en su gran mayoría, aunque también se asocian con fallas normales según el modelo de Riedel. La distribución de las fracturas, su cantidad y orientación permitieron sugerir que las rocas calcáreas del Jurásico tardío-Cretácico temprano expuestas en el área de estudio pueden ser un buen análogo de los yacimientos naturalmente fracturados del sureste de México.

## **Abstract**

The Tuxtla-Malpaso fault is located in the Chiapas Strike-slip Fault Province, which covers a large part of the Sierra de Chiapas, as well as the southeastern edge of the state of Veracruz. This fault has a left-lateral kinematics and a general strike NW50SE, and approximately 200 kilometers long. This is considered a young and active fault, beginning their activity in the upper Miocene. This fault has secondary structures associated with it, such as faults, fractures and folds. Despite its location and great length, there is no detailed geological-structural study available that focuses on the study of the kinematics of the fault, as well as the geometry, distribution and size of the geological fractures associated with the main fault. In this work, the kinematic analysis of the fault was carried out, as well as the geometry, distribution and size of the secondary structures in the northern and central zone of the fault, in the vicinity of Felipe Angeles, Veracruz and Tuxtla Gutierrez, Chiapas. The analysis of geomorphological maps, geological sections, focal mechanisms and fracture rosettes, as well as evidence obtained in the field, such as the fact that two groups of fractures with different orientations are cut in the same plane, allowed understanding the structural evolution of the fault and determining that the current geometry of the Tuxtla-Malpaso fault is the product of a reactivation, so it is proposed the existence of two stages of deformation in the Tuxtla-Malpaso fault. The oldest activity occurred at the beginning of the upper Miocene and has a right-lateral kinematics and a NE-SW direction. The most recent activity occurred during the upper Miocene-Pliocene and continues today, with a left-lateral kinematics and a NW-SE strike. The fractures observed in the study area present a preferential NW-SE and NE-SW orientation, and are mostly extensional, although they are also associated with normal faults according to the Riedel's model. The distribution of fractures, their quantity and orientation allowed us to suggest that the late Jurassic-early Cretaceous calcareous rocks exposed in the study area may be a good analog of the naturally fractured reservoirs of southeastern Mexico.

## Capítulo 1. Introducción

En el sureste de México se pueden encontrar un sinnúmero de estructuras geológicas, las cuales son de gran interés para los geocientíficos, debido a que su análisis permite comprender la historia geológica del país. Tal es el caso de la Provincia de Fallas Laterales de la Sierra de Chiapas, compuesta principalmente por el Sistema de Fallas Tuxtla–Malpaso, con cinemática lateral izquierda y rumbo NW-SE (Witt *et al.*, 2012). Este sistema ha sido activo desde el Mioceno y se ha sugerido que puede ser la herencia y/o reactivación de fallas relacionadas con la apertura del Golfo de México (Pindell y Kennan, 2001; Witt *et al.*, 2012; Vásquez, Grajales y Rangel, 2021).

El presente estudio tiene como principal objetivo conocer la historia de deformación del Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso, mediante un análisis geológico-estructural centrado en dos zonas de estudio principalmente: Felipe Ángeles, Veracruz y Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. El estudio comprende trabajo de campo y gabinete. El trabajo de campo consistió en revisar la estratigrafía de la zona, obtener datos estructurales de fallas, fracturas, planos de estratificación e identificación de indicadores cinemáticos. El trabajo de gabinete, por su parte, consistió en la elaboración de mapas de lineamientos geomorfológicos, secciones geológicas, rosetas de fracturas, mecanismos focales y determinación del desplazamiento mínimo de la falla. Los resultados obtenidos son importantes para entender la actual geometría de la falla y determinar si este sistema de fallas es producto de la reactivación de fallas más antiguas, así como comprender sus implicaciones en los yacimientos naturalmente fracturados de hidrocarburos del sureste de México.

## 1.1 Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la porción sur de México y comprende el Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso en su sector norte y central (Figura 1.1). El sector norte se encuentra al sur del estado de Veracruz, específicamente en los alrededores de la localidad de Felipe Ángeles, perteneciente al municipio de Las Choapas. Esta localidad se encuentra ubicada entre los poblados de Río Playas, el Triunfo, Descanso y Xochitlán, Veracruz. La primera zona abarca un área aproximada de 361 km<sup>2</sup> y está delimitada por los vértices con coordenadas 17°15' N y 94°00' W, 17°15' N y 93°45'42" W, 17°20'42" N y 93°45'42" W, 17°27'14" N y 93°53'02" W y 17°27'14" N y 94°00' W.

El sector central de la falla Tuxtla-Malpaso se ubica en el centro del estado de Chiapas, en los alrededores del municipio de Tuxtla Gutiérrez y abarca un área aproximada de 543 km<sup>2</sup>, y la cual está delimitada por los vértices con coordenadas 17°00' N y 93°13' W, 17°00' N y 92°59'26" W, 16°51'52" N y 92°59'26" W, 16°41'08" N y 92°40" W, 16°32'34" N y 92°45' W y 16°48' N y 93°13' W. En esta zona se realizaron tres transectos estructurales, el primero se encuentra en la autopista San Cristóbal de las Casas–Tuxtla Gutiérrez, el segundo en las inmediaciones de la carretera internacional Tuxtla Gutiérrez–Chicoasén y el último dentro del Cañón del Sumidero.

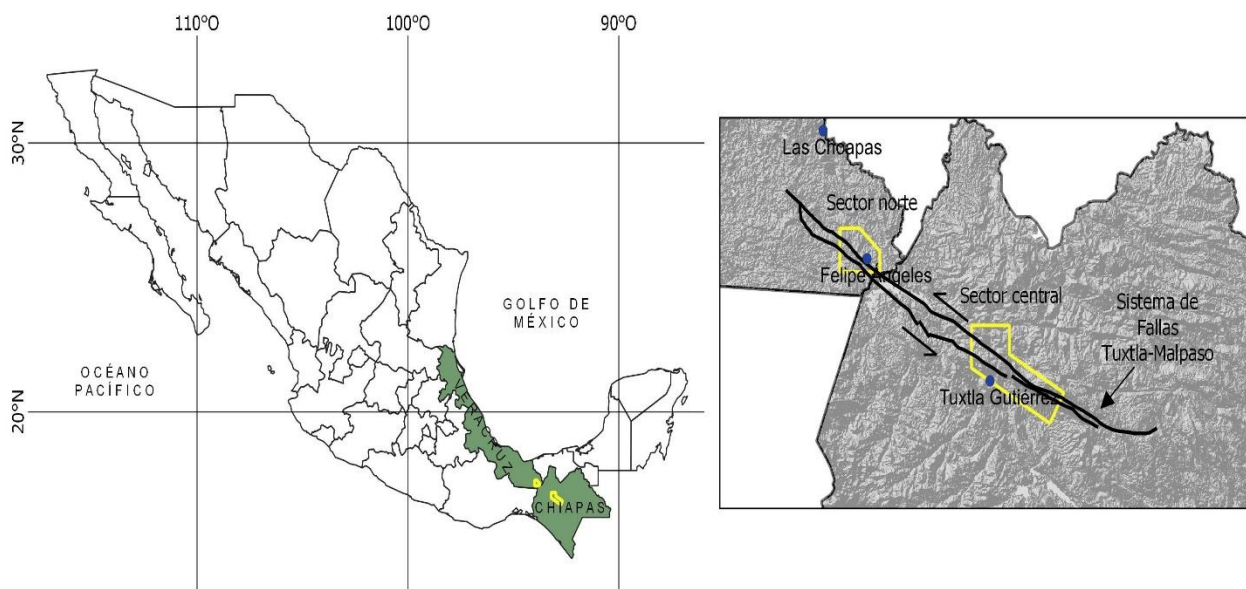


Figura 1.1. Ubicación del área de estudio del Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Los estudios previos desarrollados en el Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso no presentan un análisis geológico-estructural detallado para definir con total precisión la cinemática, geometría, distribución y tamaño de las estructuras dentro de dicho sistema. El conocimiento de estos aspectos permitirá determinar si la geometría actual del Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso es consecuencia de neoformación o reactivación de estructuras previas.

## **1.3 Justificación**

La importancia de llevar a cabo un análisis geológico-estructural detallado del Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso es ampliar el conocimiento sobre la historia de deformación de este sistema, y de esta forma comprender la cinemática, geometría, distribución y tamaño de las estructuras asociadas a esta falla (fracturas).

Los resultados obtenidos en esta investigación serán de utilidad para la industria petrolera, debido a que las fallas juegan un papel importante en la migración y acumulación de hidrocarburos en el sureste de México. Conocer la geometría y distribución de las fracturas ayudará a identificar si estas podrían estar teniendo un efecto positivo o negativo en los yacimientos de hidrocarburos que se encuentran en el sureste de México.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Realizar un análisis geológico-estructural de la falla Tuxtla-Malpaso para conocer su cinemática, geometría, distribución y tamaño, así como su implicación en los yacimientos de hidrocarburos del sureste de México.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Realizar una revisión detallada de la estratigrafía de las regiones de Felipe Ángeles, Veracruz y Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, a través de la búsqueda bibliográfica y trabajo de campo.
- Elaborar la cartografía geológica-estructural del área de estudio, haciendo uso de la información topográfica, geológica y observaciones hechas en campo para la creación de mapas geológicos y de lineamientos.
- Analizar la cinemática de la Falla Tuxtla-Malpaso mediante las mediciones sistemáticas de planos de falla, la identificación de estrías y determinación de indicadores cinemáticos.
- Realizar un análisis de la geometría, distribución y tamaño de las fracturas geológicas dentro del Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso.
- Determinar la relación que existe entre la falla Tuxtla-Malpaso y los yacimientos de hidrocarburos mediante el análisis de los resultados obtenidos.

## **1.5 Hipótesis**

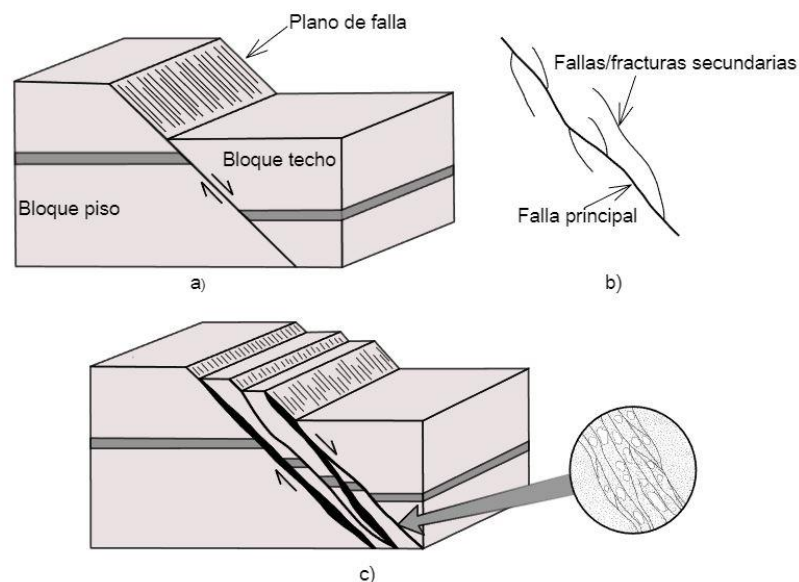
La geometría actual del Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso con cinemática lateral izquierda y rumbo NW-SE, es el resultado de la reactivación de una falla más antigua (Witt *et al.*, 2012), su actividad puede estar ligada a la migración y almacenamiento de hidrocarburos en el sureste de México.

## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1 Fallas

Las fallas son zonas complejas de deformación, que están compuestas por múltiples superficies de deslizamiento, fracturas secundarias y quizás también bandas de deformación (Fossen, 2010). Al examinarlas en una escala de kilómetros, estas fallas pueden considerarse como una sola, sin embargo, cuando se observan en campo, estas pueden consistir en múltiples fallas más pequeñas, por lo que la escala de observación es de suma importancia en la descripción de la geología estructural de una falla. Por esta razón, la mayoría de los geólogos consideran a una falla como un volumen de roca deformada que es relativamente delgada en una dimensión (Fossen, 2010).

Van Der Pluijm y Marshak (2004) señalan que las fallas son fracturas en las que el deslizamiento se produce principalmente por procesos de deformación frágil; esta definición ayuda a distinguir entre una zona de falla y una zona de cizalla. La zona de falla puede tener una anchura de varios kilómetros a lo largo de las fallas; las rocas suelen romperse y pulverizarse conforme los bloques de la corteza a los lados opuestos de la falla chocan entre sí (Figura 2.1) (Tarbuck y Lutgens, 2005). Mientras que las zonas de cizalla están dominadas principalmente por deformación dúctil, y generan foliación que se dobla hasta ser paralela a la dirección de máximo desplazamiento (Fossen, 2010).



*Figura 2.1. Descripción de una falla y zona de falla. a) Falla. b) Esquema de la relación de la falla principal y las estructuras secundarias. c) Zona de falla, donde se muestra la deformación producida por la falla. (Modificado de Van Der Pluijm y Marshak, 2004)*

En consecuencia, una falla en términos de los mecanismos de deformación, según Fossen (2010), puede definirse como una discontinuidad con desplazamiento paralelo a la pared debido a un mecanismo de deformación frágil.

### 2.1.1 Elementos y geometría de una falla

Para poder hablar de fallas, clasificarlas y comprender cómo se han formado, es necesario conocer los principales conceptos relacionados con estas y los elementos que las conforman. Para esto, se debe tratar a una falla como una superficie geométrica en un cuerpo rocoso. Según Van Der Pluijm y Marshak (2004), uno de los conceptos fundamentales para estudiar una falla es el de pared de falla, que es la roca adyacente a la superficie de falla, así como el de bloque de falla, que es un cuerpo rocoso que se movió como consecuencia del deslizamiento de la falla. Además de estos elementos, también es importante definir el plano de falla, el cual es el plano o superficie a lo largo del cual ha ocurrido el desplazamiento (Camargo–Puerto, 2004).

Si la falla que se estudia no tiene un plano vertical, se puede hablar de un bloque rocoso que está inmediatamente por encima de la falla conocido como bloque de techo y, por el contrario, si el bloque rocoso está inmediatamente por debajo de la falla, se puede hablar de un bloque de piso (Tarbuck y Lutgens, 2005). Es importante señalar que estos bloques no se pueden diferenciar para fallas verticales.

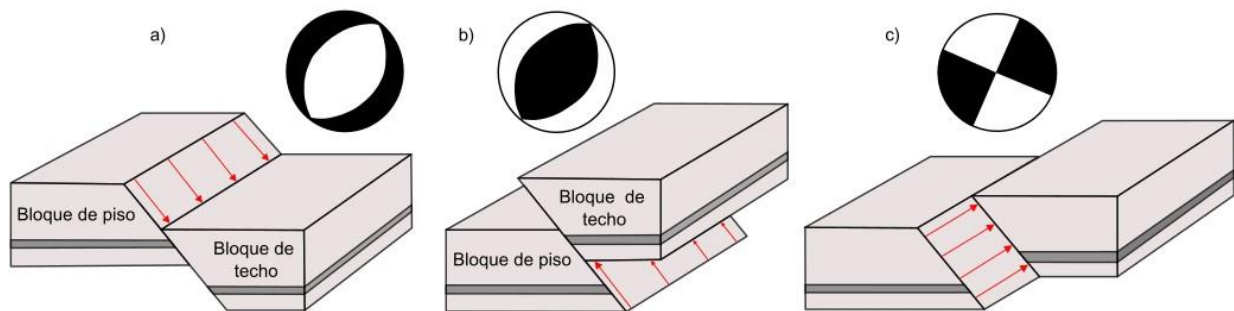


Figura 2.2. Fallas normal (a), inversa (b) y lateral izquierda (c), y sus mecanismos focales correspondientes. (Modificado de Fossen, 2010)

Cuando ocurre una falla y los bloques involucrados chocan entre sí, se produce una zona compleja de deformación que está asociada a la superficie de falla y que se ajusta a un plano conocido como zona de falla (Suárez–Burgoa, 2017). El movimiento de la falla hace que los bloques se deslicen uno respecto al otro, por lo que su posición original cambia,

a esto se le conoce como desplazamiento neto, representado por el vector de desplazamiento, que conecta dos puntos que estaban conectados en el estado no deformado. Para poder obtener el desplazamiento neto es importante conocer el *pitch* (también conocido como *rake*) siendo éste el ángulo que se forma entre una línea horizontal medida sobre el plano de falla y el vector de deslizamiento denotado principalmente por las estrías, las cuales son usadas para describir la dirección de movimiento de la falla (Fossen, 2010).

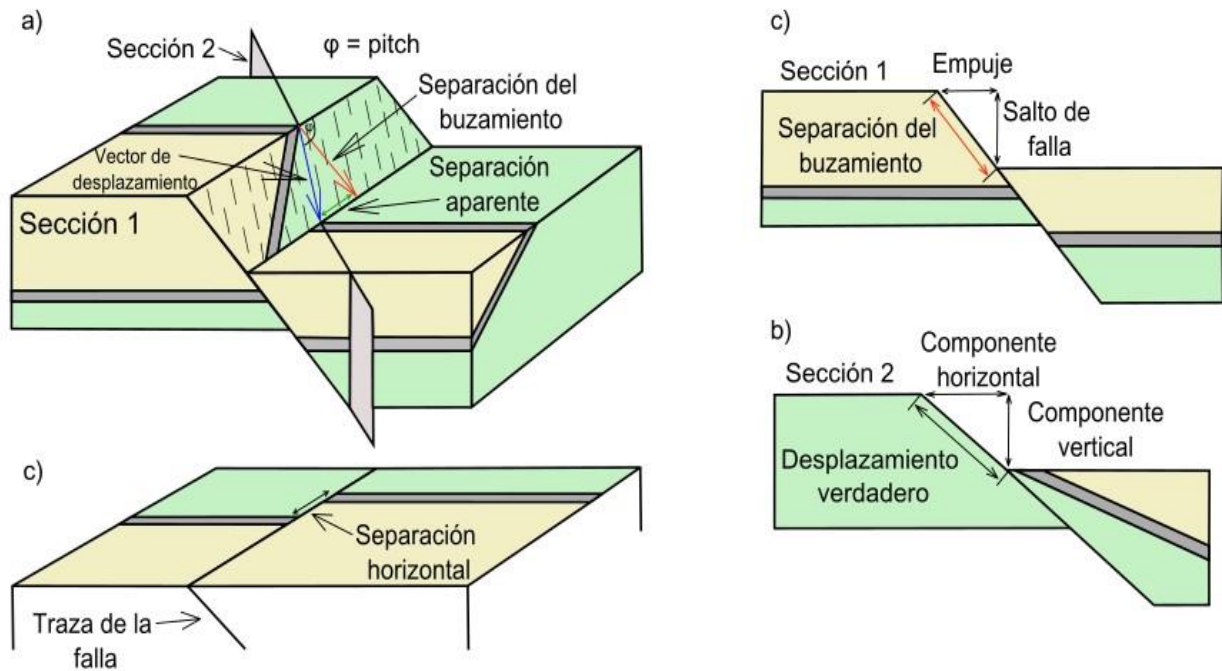


Figura 2.3. Geometría y elementos de una falla. a) Elementos de una falla normal con componente lateral derecha. b) Perfil lateral de la falla. c) Vista en planta de la falla. d) Perfil perpendicular al rumbo de la falla. (Modificado de Fossen, 2010)

El desplazamiento que se observa entre los bloques en una sección o plano es denominado separación aparente y está asociado a una separación horizontal, siendo esta la separación que hay entre las capas observadas en un mapa o plano horizontal. Mientras que la separación que se puede observar en una sección vertical lleva por nombre separación de buzamiento y esta separación puede ser descompuesta en dos componentes, una vertical y otra horizontal, siendo la componente horizontal conocida como levantamiento o rechazo y el lanzamiento o salto de falla asociado a la componente vertical (Fossen, 2010).

## **2.1.2 Tipos de fallas**

Se pueden clasificar por sus movimientos, que pueden ser predominantemente horizontales, verticales u oblicuos. Para este trabajo es de interés el estudio de las fallas con desplazamiento vertical y horizontal debido a los objetivos del mismo.

### **a. Fallas de desplazamiento vertical**

Las fallas con desplazamiento vertical son aquellas fallas en las cuales el movimiento es paralelo a la inclinación de la superficie de falla (Tarbuck y Lutgens, 2005). Las fallas que tienen un plano de falla no vertical separan el bloque denominado techo del bloque denominado piso, se puede dividir en dos tipos: fallas normales e inversas.

#### **➤ Falla normal**

Es aquella en la cual el bloque denominado techo descendió respecto al bloque piso (Figura 2.4 a)). La mayoría de las fallas normales tienen buzamiento/inclinación de aproximadamente  $60^\circ$ , que tienden a disminuir con la profundidad, estas fallas provocan un alargamiento o extensión de la corteza. (Fossen, 2010; Tarbuck y Lutgens, 2005).

#### **➤ Falla inversa**

En este caso el bloque denominado techo ascendido en relación con el bloque piso (Figura 2.4 b)). Las fallas inversas tienen buzamientos/inclinación aproximadamente de  $30^\circ$ , estas fallas reflejan un acortamiento de la corteza, y las fuerzas compresivas producen generalmente pliegues además de fallas y provocan engrosamiento y acortamiento del material (Fossen, 2010; Tarbuck y Lutgens, 2005).

### **b. Fallas con desplazamiento horizontal**

Las fallas en las que el desplazamiento dominante es el horizontal y paralelo a la dirección de la superficie de la falla, se denominan fallas de desplazamiento horizontal (Tarbuck y Lutgens, 2005). Debido a que generalmente presentan un gran tamaño y linealidad, muchas de estas fallas de desplazamiento son visibles a una gran distancia.

## ➤ Falla lateral

Cuando el movimiento es lateral, entonces es una falla de deslizamiento lateral, siendo estas sinistral (lateral izquierda) cuando el movimiento del bloque de corteza del lado opuesto de la falla se mueve a la izquierda y dextral (lateral derecha) cuando el bloque se mueve hacia la derecha respecto al otro bloque (Figura 2.4 c) y d)). Estas fallas son más empinadas, por lo que llegan a tener una inclinación aproximada a los 90°. En lugar de tener una fractura única a lo largo de la cual tiene el movimiento, consisten en una zona de fracturas aproximadamente paralelas, cuya anchura pueden ser de varios kilómetros (Fossen, 2010; Tarbuck y Lutgens, 2005).

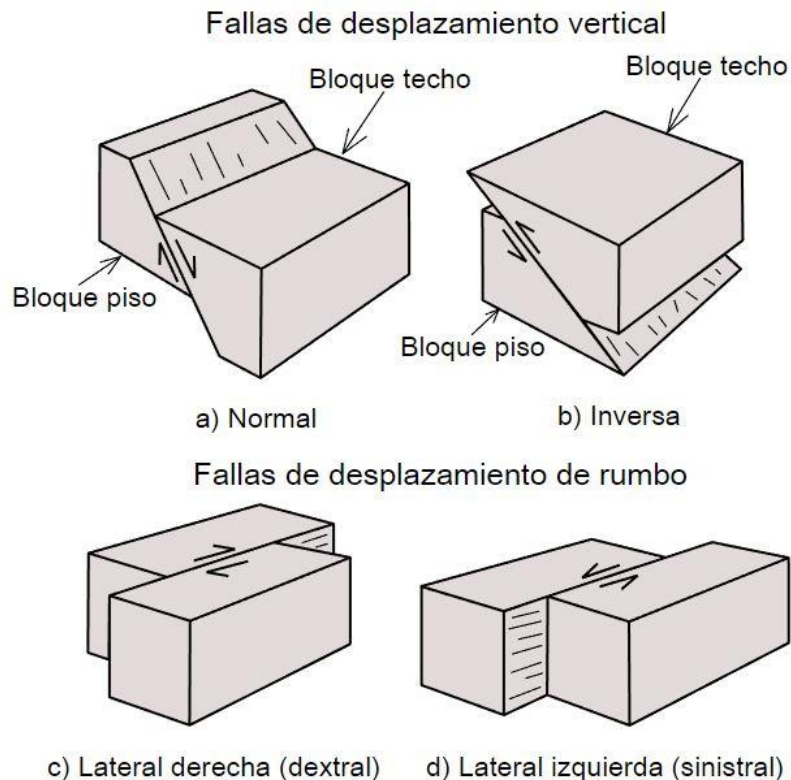


Figura 2.4. Diagrama de los tipos de fallas de acuerdo al movimiento de sus bloques. a) Falla normal. b) Falla inversa. c) Falla lateral derecha. d) Falla lateral izquierda. (Modificado de Van Der Pluijm y Marshak, 2004)

El término zona de falla tradicionalmente se asocia con una serie de fallas subparalelas o superficies de deslizamiento lo suficientemente cercanas entre sí para definir una zona. El ancho de esta zona depende de la escala de observación y en esta zona se pueden observar estructuras como *grabens* y *horst* (Fossen, 2010).

### **2.1.3 Anatomía de las fallas y de las zonas de fallas**

Las fallas dibujadas sobre una sección geológica generalmente son proyectadas como una línea de espesor uniforme. Las fallas rara vez son superficies o zonas de espesor constante, la mayoría de ellas son estructuras complejas que constan de una serie de elementos estructurales que pueden ser difíciles de predecir. Debido a las variaciones a lo largo de la falla, tiene sentido el distinguir entre el núcleo de la falla o la superficie de deslizamiento y el volumen circundante a la pared rocosa deformada conocida como la zona de falla (Fossen, 2010).

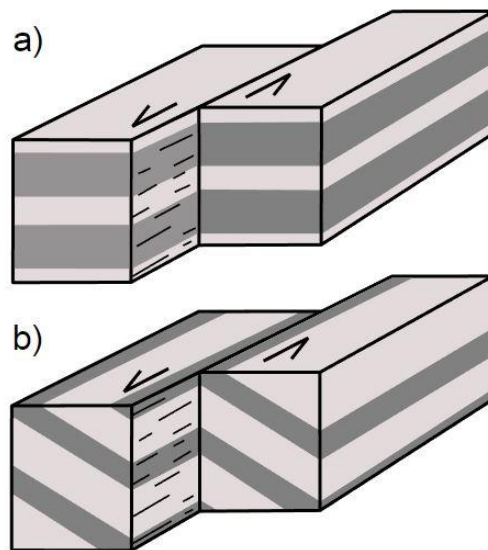
En el proceso de la generación de las fallas, las rocas tienden a romperse y a pulverizarse conforme los bloques chocan entre sí, por lo que, el núcleo de la falla puede estar compuesto desde una simple superficie de deslizamiento como una zona cataclástica de menos de un milímetro de espesor hasta una zona intensamente cortada de hasta varios metros de ancho donde solo se conservan restos de las estructuras rocosas primarias (Fossen, 2010). Las rocas quebradizas que se encuentran dentro de la zona de falla pueden clasificarse con base en sí las rocas son cohesivas o no cohesivas, es decir, si los fragmentos que componen la zona de falla permanecen pegados o no para formar una más coherente sin cementación o alteración posterior (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).

La zona de daño se caracteriza por una gran densidad de estructuras de deformación frágil, que envuelven el núcleo de la falla, lo que significa que se encuentran en la zona de la punta, así como en cada lado del núcleo. Las estructuras que se encuentran en la zona de daño incluyen bandas de deformación, fracturas por cizalla, fracturas extensionales y estilolitas (Fossen, 2010).

Las capas comúnmente se pliegan alrededor de las fallas, principalmente las rocas sedimentarias. El término clásico para este comportamiento es arrastre, esta zona puede ser más ancha o más estrecha que la zona de daño, o puede estar ausente. La diferencia entre la zona de daño y la zona de arrastre es que esta última está relacionada con la deformación dúctil, mientras que la zona de daño está asociada a la deformación frágil. Sin embargo, ambas son parte de la zona de deformación total asociada con las fallas (Fossen, 2010)

## 2.2 Fallas de desplazamiento de rumbo (o fallas laterales)

Una falla de desplazamiento de rumbo es aquella en la que la mayor parte de su movimiento es paralelo a la dirección de la falla, es decir, es paralela a la superficie de la Tierra (Sylvester, 1998). Las fallas de desplazamiento tienen una mayor inclinación a comparación de otras fallas, y la mayoría se pueden observar en los mapas como estructuras rectas. Aunque, también pueden presentar geometrías irregulares y curvaturas, pero es más común observarlas en la sección vertical que en la horizontal, perpendicular al desplazamiento (Foseen, 2010). Las fallas de desplazamiento pueden ocurrir en todas las escalas, y hoy en día estas pueden observarse en algunas de las fallas más grandes y famosas del mundo; como lo es la falla de San Andrés en California. Además, estas fallas pueden acumular una gran cantidad de desplazamiento (Foseen, 2010). Los desplazamientos de una sola falla pueden oscilar entre decenas o cientos de kilómetros, y esta puede reactivar cualquier tipo de falla preexistente.



*Figura 2.5. Falla de desplazamiento lateral izquierda. a) Falla lateral izquierda afectando a capas horizontales. b) Falla lateral izquierda afectando a capas paralelas a la falla. (Modificado de Fossen, 2010)*

Las fallas laterales pueden clasificarse como fallas transformantes las cuales cortan la litosfera o como fallas transcurrentes que están confinadas en la corteza. Cada clase de fallas puede subdividirse aún más de acuerdo con su función tectónica de placa o intraplaca (Sylvester, 1998).

### **2.2.1 Fallas de transferencia y transformantes**

Las fallas de transferencia son fallas de desplazamiento lateral que como su nombre lo indica, transfieren el desplazamiento entre una falla y otra, por medio de un movimiento deslizando. Este término se utiliza específicamente para aquellas fallas de desplazamiento cuyas puntas terminan en otras fallas o fracturas de extensión, por tal motivo, estas fallas se encuentran limitadas y no pueden crecer libremente, por lo que se ve afectada la relación longitud–desplazamiento (Fossen, 2010). Estas fallas ocurren a gran escala y conectan un gran número de estructuras, como lo son las fracturas abiertas o de extensión, con relleno mineral, vetas, diques, fallas normales de igual o diferente dirección, fallas oblicuas, inversas, entre otros (Fossen, 2010).

Fossen (2010) menciona que las fallas de transferencia oceánicas se descubrieron en 1960 debido a que se observó que las dorsales oceánicas se encuentran desplazadas por grandes fallas laterales y fueron nombradas como fallas transformantes. Siendo fallas de desplazamiento que se encuentran delimitadas por placas, es decir, dividen placas tectónicas o forman límites de placas, de una gran escala, que atraviesan la litosfera y acomodan completamente el movimiento entre las placas (Sylvester, 1998). El ejemplo más claro de una falla transformante es la falla de San Andrés en California, la cual tiene una longitud de 1200 km y forma un límite entre las placas Norteamérica y del Pacífico.

### **2.2.2 Fallas transcurrentes**

Son fallas de desplazamiento lateral que ocurren en la corteza continental y que tienen puntas libres, es decir, no están limitadas por otras estructuras, de tal modo que la relación entre la longitud y el desplazamiento es proporcional, es decir, si la longitud de la falla aumenta el desplazamiento también aumenta (Fossen, 2010). Las fallas transcurrentes, a diferencia de las fallas normales en zonas de *rift* continental o de las fallas inversas en un cinturón de pliegues y cabalgaduras, no se encuentran en áreas extensas, sino que estas se restringen a una sola zona, en donde el espesor de la zona de falla aumenta a medida que crece la falla y está acumula desplazamiento (Fossen, 2010). Estas fallas se forman dentro de las placas tectónicas, por tal motivo son fallas intraplaca, así mismo a las fallas transformantes que ocurren a lo largo de los límites de las placas se les llama fallas interplaca. Estas fallas interceptan la superficie de la Tierra, pero en profundidad pueden terminar contra estructuras como las fallas normales,

cabalgaduras, zonas de subducción, o pueden penetrar la transición frágil-dúctil y continuar en profundidad como zonas de cizalla (Fossen, 2010).

Tabla 1. Clasificación de las fallas de desplazamiento lateral. (Obtenido de Sylvester, 1998)

<b>Clasificación de las fallas de desplazamiento lateral</b>	
<u>Interplaca</u> (Localizado profundamente)	<u>Intraplaca</u> (sobre el basamento)
<b>Fallas transformantes</b> (limitan las placas, cortan la litosfera, acomodan completamente el movimiento entre las placas)	<b>Fallas transcurrentes</b> (confinado a la corteza)
<p><b>Fallas transformantes ligadas a dorsales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Desplazan segmentos de la corteza oceánica que tienen vectores de expansión de similar dirección, sentido y magnitud</li> <li>Ejemplos: Zonas de fracturas de Owen, Romanche y Charlie Gibbs</li> </ul> <p><b>Fallas transformantes de borde</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Separan diferentes placas que se mueven paralelas al límite de las placas, cambian su longitud en el tiempo</li> <li>Ejemplos: Falla de San Andrés (California), falla Chaman (Pakistán) y falla Alpina (Nueva Zelanda)</li> </ul> <p><b>Fallas transformantes ligadas a zonas de subducción</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Acomoda la componente horizontal de la subducción oblicua; corta y puede localizar intrusiones de arco y rocas volcánicas, ubicadas a unos 100 km hacia el interior de la fosa</li> <li>Ejemplos: Falla de Semanko (Burma), falla de Atacama (Chile) y la Línea tectónica media (Japón)</li> </ul>	<p><b>Fallas de desplazamiento indentadas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Bloques de continente-continente separados que se mueven entre sí debido a la convergencia de las placas</li> <li>Ejemplos: Falla del norte de Anatolia (Turquía); fallas de Karakorum, Altyn, Tagh y Kunlu (Tíbet)</li> </ul> <p><b>Fallas de desgarre</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Acomoda el desplazamiento diferencial dentro de un alóctono dado o entre el alóctono y las unidades estructurales adyacentes. Están restringidas a la corteza superior o a su cobertura sedimentaria</li> <li>Ejemplos: Fallas con dirección noroeste y noreste del cinturón de pliegues inversos de Asia (Canadá)</li> </ul> <p><b>Fallas de transferencia</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Transfiere el deslizamiento horizontal de un segmento de una falla de desplazamiento mayor a una transgresión o a una vecindad en échenlo</li> <li>Ejemplos: Fallas del valle inferior de Hope y del valle superior de Hurunui entre las fallas Hope y Kakapo (Nueva Zelanda), Falla Diagonal del norte y sur (este de Sinaí)</li> </ul> <p><b>Fallas transcurrentes de intraplaca</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ocurren lejos de los límites de placas, formadas por estrés que actúan al interior de las placas, reactivando fallas antiguas y propagándose vertical y horizontalmente a rocas no falladas</li> <li>Ejemplos: Falla de Garlock (California)</li> </ul>

### **2.2.3 Reconocimiento de las fallas de desplazamiento lateral y sus desplazamientos**

Las fallas de desplazamiento activas se pueden identificar por el desplazamiento que se puede observar en superficie, por características fisiográficas y por los mecanismos focales de sismos (Sylvester, 1998). Una de las principales características que presentan las fallas de desplazamiento activas o que han presentado actividad recientemente es que se puede observar en superficie una extrema linealidad tanto estructural como topográfica en distancias muy largas, junto con la presencia de una serie de fracturas distintivas. Además, se puede observar la presencia de una serie de fracturas escalonadas, fallas, pliegues en zonas estrechas y alargadas, donde se ven afectadas características como la estratificación, foliación, *sills* y otras fallas (Sylvester, 1998). Por lo tanto, las fallas de rumbo ponen en contacto a rocas de diferentes litologías, facies, edad, origen y estructura.

Para poder determinar la cantidad y la dirección del desplazamiento de cualquier falla, es primordial comprender los conceptos de deslizamiento y separación. Siendo la separación el desplazamiento aparente de un plano en dos dimensiones y tiene solo un significado geométrico, mientras que el deslizamiento es el desplazamiento real y este tiene un significado más cinemático (Sylvester, 1998). Otro concepto importante es *trace slip* el cual se refiere al desplazamiento que es paralelo a la traza de los marcadores de referencia en la superficie de la falla, como lo es la estratificación.

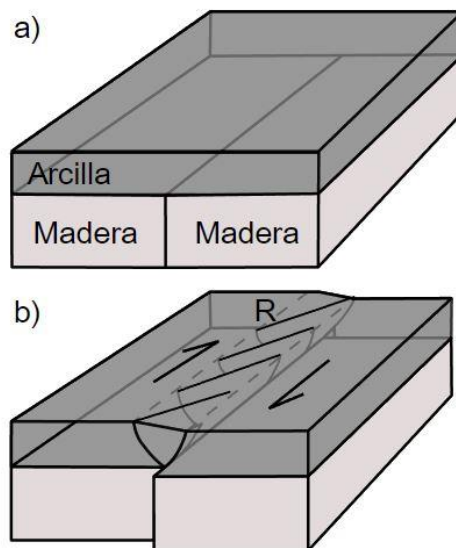
### **2.2.4 Desarrollo y anatomía de las fallas de desplazamiento lateral**

Existen dos principales mecanismos que ayudan a explicar la relación geométrica y dinámica de las fallas de desplazamiento lateral y de las estructuras asociadas a ellas, las cuales son: la cizalla pura o también llamado modelo de Coulomb-Anderson y la cizalla simple o directa (Sylvester, 1998). La deformación por cizalla simple y cizalla pura representan solo las dos situaciones extremas de una gama de deformaciones, generadas por acortamiento y extensión paralelos a dos ejes de referencia (cizalla pura) y cizalla paralela a uno de los ejes (cizalla simple) (Carreras y Ortuño, 1990).

### a. Fallas simples (cizalla simple)

La cizalla simple tiene una simetría monoclínica y una componente rotacional de deformación volumétrica y explica la cinemática de las fallas de desplazamiento lateral en todas las dimensiones (Sylvester, 1998). Las fallas de deslizamiento lateral se forman cuando partes individuales de la corteza se mueven a diferentes velocidades a lo largo de la superficie terrestre, por tal motivo estas fallas se asocian con muchas estructuras secundarias (Fossen, 2010).

En 1900, Riedel realizó un experimento para entender cómo se forma la zona de falla lateral y las estructuras secundarias asociadas con esta falla, este experimento consistió en utilizar dos bloques rectangulares de madera sobre los cuales se colocó una capa de arcilla. Los bloques se deslizan unos sobre otros, y el esfuerzo es transferido a la capa de arcilla (ver Figura 2.6 b)). Riedel observó que no solo se desarrollaba el plano de falla, sino que también se desarrollaban una serie de fracturas, las cuales se clasificaron en función de su orientación y sentido de desplazamiento.



*Figura 2.6. Modelo físico con dos bloques de madera debajo de una capa de arcilla utilizado por Riedel para entender la zona de falla lateral y sus estructuras secundarias. (Modificado de Fossen, 2010)*

El primer conjunto de fracturas que se forman llevan por nombre fracturas de cizalla de Riedel o mejor conocidas como fracturas R, las cuales tiene un bajo ángulo respecto a la orientación de la falla y muestran una cinemática igual al de la falla principal. Seguidas de estas fracturas se desarrollan las fracturas P, posteriormente aparecen las fracturas

antitéticas o fracturas R', las cuales forman un alto ángulo con la zona de falla, sin embargo, están menos desarrolladas que las fracturas R y tiene una cinemática opuesta respecto a la falla principal.

Adicional a las fracturas R, R' y P, también se desarrollan fracturas de extensión o fracturas T de manera perpendicular al eje de máximo acortamiento instantáneo. Para grandes fallas laterales, se forman fallas normales que muestran el mismo rumbo que las fracturas T así como pliegues, los cuales a su vez pueden desarrollar estilolitas y fallas inversas.

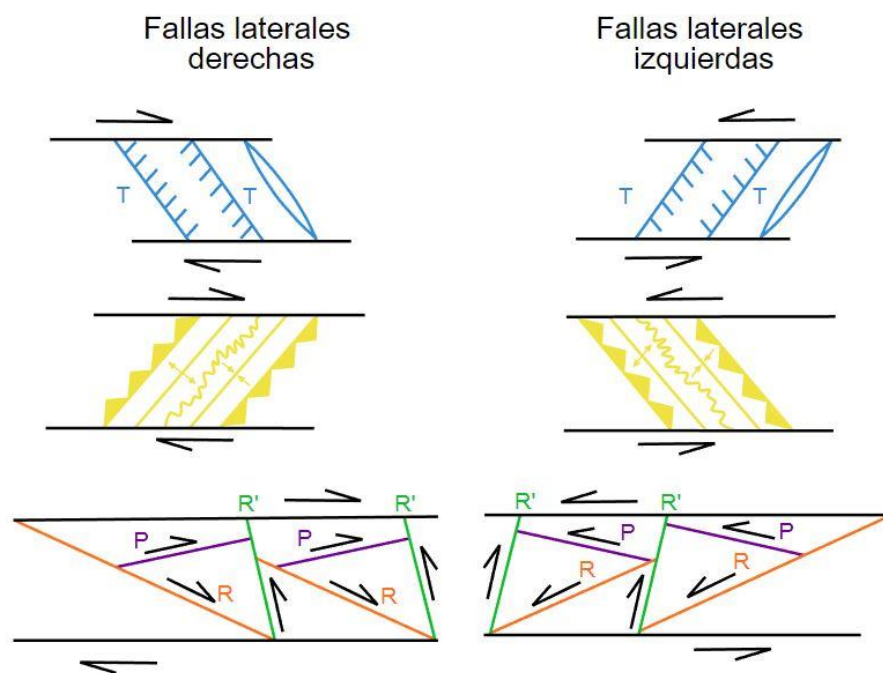


Figura 2.7. Esquema comparativo de la orientación de las diferentes estructuras que se forman en una zona de falla lateral derecha e izquierda con base en el modelo de Riedel. (Modificado de Serrano-López, 2020)

### b. Fallas de deslizamiento lateral conjugadas (cizalla pura)

La cizalla pura produce conjuntos cortos y conjugados de fallas de deslizamiento lateral que ayudan a acomodar la componente frágil de deformación en los regímenes tectónicos de acortamiento de la corteza, como los cinturones de cabalgamiento (Sylvester, 1998). La cizalla pura no implica rotación y la deformación incrementa. Las fallas de deslizamiento lateral pueden ocurrir como estructuras simples o como una zona de varias

fallas paralelas. Aunque también, las fallas de deslizamiento lateral pueden formar pares conjugados, las cuales se formaron al mismo tiempo y bajo el mismo campo de esfuerzos.

Las fallas de deslizamiento lateral conjugadas encajan tanto en el modelo de Anderson y como en el criterio de fractura de Coulomb. En el cual el ángulo agudo entre las dos fracturas es bisecado por  $\sigma_1$ , y el ángulo está determinado por la fricción interna de la roca. Cinemáticamente, estas fallas son el resultado de la cizalla pura en el plano horizontal, donde el acortamiento en una dirección es compensado por la extensión ortogonal en la otra. En este modelo no se produce extensión ni acortamiento en la dirección vertical (Fossen, 2010).

### **2.2.5 Curvaturas de falla y cruces**

En principio, las fallas de deslizamiento lateral ideales vistas en mapas son perfectamente rectas, sin embargo, hasta en los modelos experimentales más simples se producen fallas secundarias o transversales a la falla principal. Cuando los segmentos de las fallas individuales se superponen en la vista en mapa, se pueden observar como una falla escalonada o una curvatura de falla. En tales curvaturas, se pueden formar estructuras de acortamiento o de extensión, dependiendo del sentido de deslizamiento de la falla en relación con el sentido de los escalones (Fossen, 2010).

Dentro de las estructuras de acortamiento se encuentran estilolitas, clivaje o foliación, pliegues y fallas inversas, y estas se pueden formar en curvas de restricción. Por su parte, las estructuras de extensión como lo son las fallas normales y fracturas extensionales se forman a partir de las curvaturas de liberación que se forman cuando una falla de desplazamiento sinistral avanza hacia la izquierda o una falla dextral avanza hacia la derecha. La serie de fallas paralelas que se forman y que están limitadas por ambos lados por fallas de rumbo reciben el nombre de deslizamiento de rumbo dúplex extensionales (Fossen, 2010). Las fallas normales generan estructuras negativas, es decir, cuencas que pueden rellenarse con diferentes sedimentos. Las cuencas de curvatura de liberación a lo largo de las fallas de rumbo se denominan cuencas *pull-apart*.

### **2.2.6 Transpresión y transtensión**

El tipo de deformación que ocurre en las curvaturas en las fallas de desplazamiento se denomina transpresión y transtensión. La transpresión y la transtensión es la

combinación simultánea de un deslizamiento de rumbo o de un movimiento de cizalla simple a lo largo de una estructura, en donde la transpresión está relacionada con el acortamiento perpendicular, mientras que la transtensión se relaciona con la extensión (Fossen, 2010).

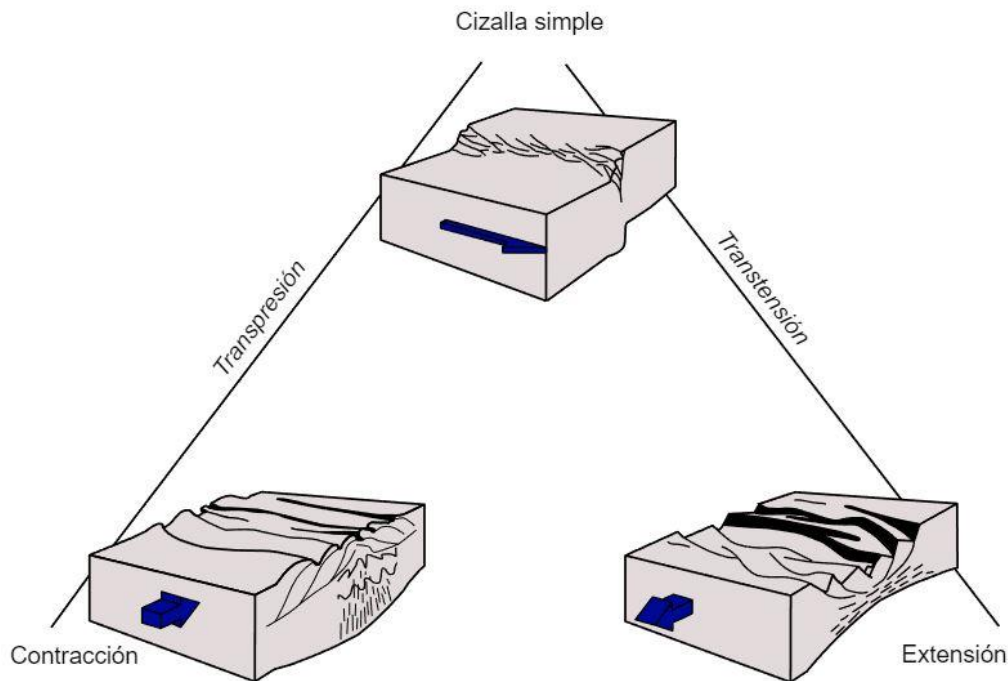


Figura 2.8. Deformación que ocurre en una cizalla simple. (Modificado de Fossen, 2010)

En una zona de cizalla vertical la transpresión y transtensión se pueden modelar de una forma muy sencilla, la componente de desplazamiento de rumbo es un desplazamiento de cizalla simple horizontal a lo largo de una zona vertical, mientras que el acortamiento se puede modelar por medio de una deformación de componente coaxial con acortamiento horizontal y extensión vertical y/o lateral, asociando esta componente a una cizalla pura con extensión vertical (Fossen, 2010). Fossen (2010) menciona que en una zona de transpresión dominada por cizalla pura se observan lineamientos verticales, mientras que una componente de cizalla simple favorece la aparición de lineamientos horizontales.

### 2.3 Cinemática de las fallas

La cinemática es el estudio del movimiento en condiciones de espacio y tiempo, sin importar las causas que lo producen, por lo que aplicado a las fallas, su análisis nos permite conocer el movimiento de estas con ayuda de ciertos indicadores. Es de suma

importancia el determinar el sentido de movimiento de una zona de cizalla, debido a que uno de los principales objetivos del análisis estructural es reconstruir la cinemática de las rocas deformadas (Tolson, 1996).

Cuando se observa una falla en campo se puede ver como una estructura lineal en la superficie, y esta se usa para estimar la orientación y la longitud del desplazamiento. Por lo general, el lineamiento en la superficie de la falla representa la dirección del desplazamiento. Sin embargo, una estructura lineal en una superficie de deslizamiento (plano de falla) puede representar solo el último de varios de eventos de deslizamiento y no necesariamente tiene que ser paralelo al desplazamiento total.

Para poder describir el sentido de desplazamiento de los bloques, es necesario contar con ciertas herramientas de observación, las cuales permitan identificar el sentido del movimiento relativo de los bloques (Tolson, 1996), siendo estas herramientas conocidas como indicadores cinemáticos. Para determinar la dirección del deslizamiento se debe de hacer uso de tantos indicadores cinemáticos como sea posible para el análisis de la cinemática de las fallas.

### **2.3.1 Indicadores cinemáticos**

Los indicadores cinemáticos de una falla son aquellas evidencias físicas presentes en las rocas que convencionalmente permiten conocer el movimiento de las fallas (cinemática) y su relación geométrica con los pliegues y fracturas. El análisis de los indicadores cinemáticos proporciona datos de gran calidad y fiabilidad que sirven como buenas herramientas para reducir la incertidumbre en la exploración a macro y microescala (Ayala, 2017).

#### **a. Crecimiento mineral**

Se produce en las estructuras irregulares que se forman en el plano de falla, el crecimiento mineral se puede dar en lugares como en los escalones que se forman en el plano de falla y en las estilolitas o en planos de foliación. El estudio de la geometría de la falla y la ocurrencia de estas estructuras pueden proporcionar información acerca de la dirección de deslizamiento con un alto grado de confianza (Fossen, 2010).

## b. Fracturas secundarias

Las fallas desarrollan fracturas secundarias que se forman a lo largo de esta o de la zona de falla y pueden dar información sobre el sentido de desplazamiento de la falla principal. Las fracturas que se pueden formar de manera perpendicular a la superficie de deslizamiento principal (M) y paralela a la dirección de deslizamiento pueden ser de cizalla (R y R' así como P) o extensionales (T) (Tolson, 1996). Su nombre depende principalmente de su orientación y cinemática.

Las fracturas T o fracturas extensionales, son fracturas de pequeña extensión, que pueden estar abiertas o mineralizadas y no muestran estrías, tienen una inclinación de alrededor 45° en la dirección de deslizamiento con respecto a una superficie horizontal. Mientras que las fracturas P son fracturas de corte, las cuales tienen una dirección opuesta a las demás fracturas, además, presentan ángulos bajos de inclinación y generalmente corresponden cinemáticamente a fallas inversas. Por otro lado, las fracturas Riedel o fracturas R representan fallas normales de bajo ángulo, mientras que las fracturas R' corresponden a fallas inversas antitéticas que forman un ángulo alto respecto a M (plano de falla principal). Las fracturas R son más comunes que las R' o P, sin embargo, todas estas se pueden presentar, por lo que su cinemática y orientación respecto a M pueden revelar la cinemática de la estructura principal.

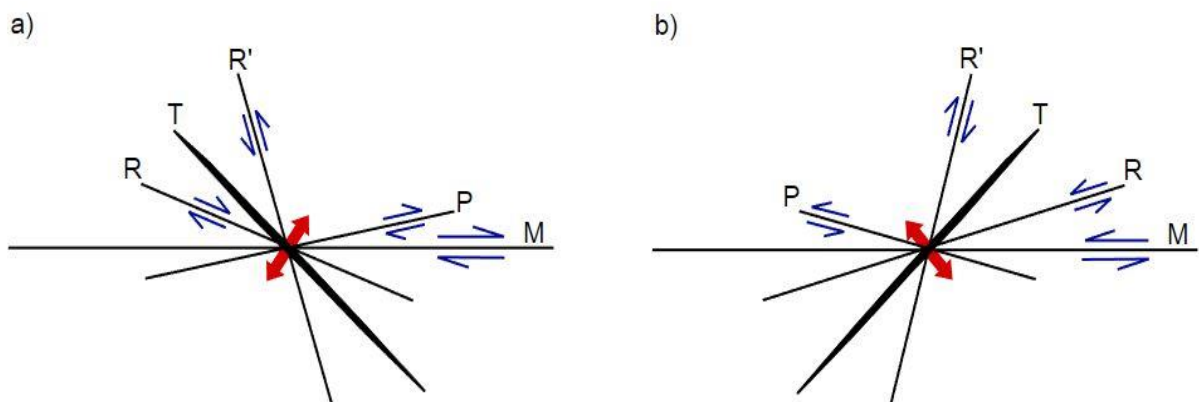


Figura 2.9. Fracturas secundarias asociadas a fallas según su cinemática. a) Falla lateral derecha. b) Falla lateral izquierda. La nomenclatura utilizada es la siguiente: M; plano de falla principal, R; fracturas Riedel, R'; fracturas antitéticas, T; fracturas extensionales y P; fracturas de cizalla. (Elaborado con base en Tolson, 1996)

### **c. Lineaciones**

Las rocas fuertemente falladas tienden a desarrollar una lineación por extensión con orientación subparalelas a la dirección de falla, esta estructura permite determinar su dirección (Tolson, 1996). Una lineación en una superficie de deslizamiento puede representar solo el último de varios eventos de deslizamiento y no tiene que ser paralela al desplazamiento total (Fossen, 2010).

### **d. Estrías**

Son líneas que se forman por el choque de los bloques y que se ubican en dirección paralela al movimiento de la falla, y según el ángulo que forman con la horizontal (*pitch*). Permiten identificar el movimiento de una falla, tanto la orientación del desplazamiento como la dirección del movimiento.

### **e. Pliegues**

Son formados por capas inicialmente paralelas al plano de cizalla que indican el sentido correcto de la cizalla. Los pliegues son de los indicadores cinemáticos más ambiguos, debido a que su uso requiere de extrema precaución, debido a que pueden mostrar el sentido correcto como el incorrecto del desplazamiento, sobre todo cuando no se pueden observar otras microestructuras que apoyen la teoría inferida con los pliegues (Tolson, 1996). Los pliegues de arrastre se forman en estados previos a la deformación de la falla, como resultados del movimiento incipiente de los bloques, son indicadores cinemáticos porque la curvatura del pliegue de un bloque indica el sentido del movimiento del bloque opuesto.

### **f. Escalones**

Son estructuras en forma de escalón que se forman perpendicularmente a las estrías de falla y definen el sentido del movimiento de la falla (Abad, 2020).

### **g. Vetillas escalonadas**

Son vetillas extensionales que típicamente se encuentran rellenas de cuarzo y calcita, se forman aproximadamente a  $45^\circ$  en la dirección de la cizalla. Cuando se cristalizan, estas pueden plegarse y rotarse, por lo que adquieren una geometría sigmoidal (Tolson, 1996).

Se debe tomar en cuenta que para una correcta interpretación cinemática no solo debe basarse en un solo indicador, sino que es importante recopilar datos de varios indicadores para tener una interpretación más confiable y real posible.

### 2.3.2 Enfoque cinemático de los datos de desplazamiento de fallas

El método cinemático consiste en trazar los planos de las fallas y sus correspondientes estrías relacionadas con el desplazamiento en un estereograma, como se observa en la Figura 2.10. Con base en la orientación y el sentido de desplazamiento de la falla se trazan los ejes P y T para cada plano de falla, los cuales son ejes de simetría de los cuadrantes de acortamiento y extensión, estos se encuentran contenidos en el plano que es perpendicular al plano de falla y su posición del sentido del movimiento de la falla (normal, inverso, lateral derecha o izquierda).

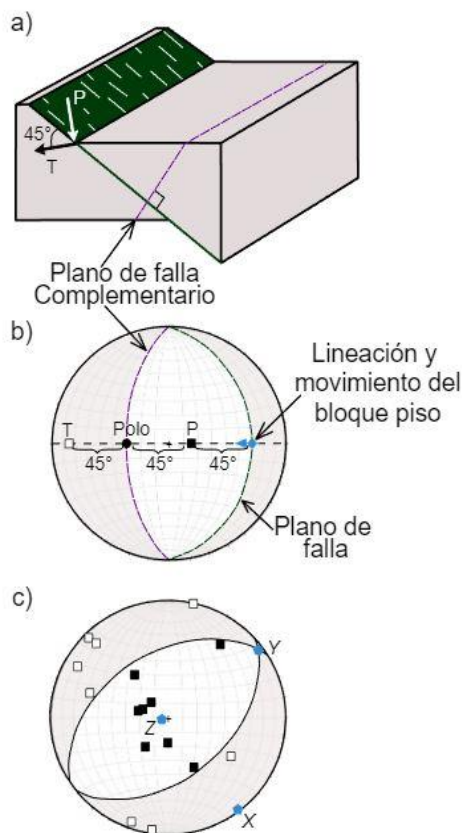


Figura 2.10. Análisis cinemático de datos de fallas. a) Falla normal. b) Proyección estereográfica de los componentes de la falla normal. c) Mecanismo focal obtenido a partir de datos de fallas. (Modificado de Fossen, 2010)

En la Figura 2.10 se observan tres paramentos X, Y y Z, los cuales proporcionan la orientación de los ejes de los paleoesfuerzos, en donde la magnitud de estos parámetros solo se podrá obtener cuando se proporcione información sobre el desplazamiento y el área de cada falla incluida en el análisis. Para llevar a cabo de una forma rápida y sencilla el método cinemático se hace uso de algún software especializado, donde los resultados obtenidos de los ejes de deformación por este método son muy similares a los ejes de esfuerzo obtenidos por la inversión de datos de desplazamiento. Se debe tomar en cuenta que el método cinemático también se basa en un campo de deformación uniforme y lo más importante de todo, en la correcta agrupación de la información de los desplazamientos generados en diferentes fases de deformación.

### ➤ **Paleoesfuerzos por fallas**

El análisis de paleoesfuerzos realizados en las fallas incluye el análisis de la dirección e inclinación de la superficie de la falla, la orientación de las estrías, generalmente dada por el *pitch* o *rake* y la dirección del movimiento. Estos datos son útiles no solo para obtener información de la deformación, sino también de la orientación de los esfuerzos principales y sus magnitudes (Fossen, 2010). Por lo que se pueden analizar grupos pequeños de fallas de un área en específico para reconstruir el campo de paleoesfuerzo.

Un sistema conjugado tiene dos conjuntos de fallas con buzamiento opuestos donde las estrías son perpendiculares a la línea de intersección de la falla, el desplazamiento es complementario en los dos conjuntos y el ángulo resultante de los dos conjuntos de fallas debe de ser constante y consistente con las propiedades mecánicas de las rocas en el momento de la deformación (Fossen, 2010). Los conjuntos conjugados deben de desarrollarse simétricamente alrededor de los esfuerzos principales para las fallas normales, inversas y de desplazamiento.

La teoría del análisis cinemático de las fallas de Anderson (1951) menciona que la dirección de desplazamiento o de las estrías es en la dirección del buzamiento (fallas normales e inversas) o en la dirección del desplazamiento (fallas de desplazamiento). Por lo tanto, las fallas conjugadas y sus estrías revelan la orientación de los esfuerzos principales. Dos conjuntos de fallas conjugados indican deformación plana y los ejes de deformación se encuentran trazando los conjuntos de fallas en un estereograma. En el

caso de los sistemas de fallas que contienen más de dos conjuntos conjugados, los ejes de deformación se encuentran también a partir de los diagramas esferográficos y así se infieren los ejes de los esfuerzos (Fossen, 2010).

Para calcular la orientación y el tamaño de los ejes de esfuerzos se necesita medir una población de fallas para conocer la orientación de la falla, la orientación de las estrías y el estado del desplazamiento. Las técnicas utilizadas se conocen como técnicas de inversión de esfuerzos o inversión de desplazamiento de fallas.

Los resultados son presentados mediante un estereograma el cual muestra las orientaciones de los ejes de los esfuerzos principales. Por otra parte, existe una forma geométrica para extraer el esfuerzo de los datos mediante la construcción de diagramas de lineaciones tangenciales (método gráfico), donde se traza cada plano de falla y las estrías con su respectivo *pitch*, así como el polo correspondiente y finalmente dibujando una flecha tangente al plano del polo, donde la dirección de la flecha describe el movimiento de los bloques (Fossen, 2010).

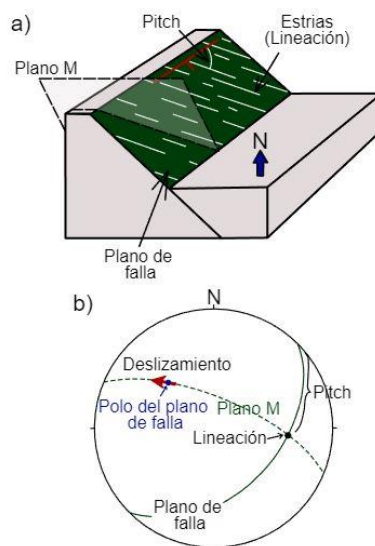


Figura 2.11. a) Esquema de los componentes de una falla normal. b) Proyección de los componentes de la falla normal en un estereograma. (Modificado de Fossen, 2010)

Cuando se tienen superficies de deslizamiento orientadas de manera diferente, el diagrama resultante puede proporcionar información acerca de las orientaciones, así como, de las magnitudes relativas de los ejes de los esfuerzos principales. Por lo tanto,

se requiere de muchos datos de fallas con una gran variedad de orientaciones para obtener un buen resultado (Fossen, 2010).

### 2.3.3 Mecanismos focales o pelotas de playa

Los mecanismos focales, también llamados pelotas de playa, son una representación bidimensional de la geometría de una falla. El plano de falla y su complementario (juntos llamados planos nodales), se trazan como proyecciones estereográficas en función del sentido de desplazamiento de la falla (normal, inversa, lateral derecha o izquierda) (ver Figura 2.10 y 2.11) y el resultado obtenido es conocido coloquialmente como “pelota de playa” (Fossen, 2010).

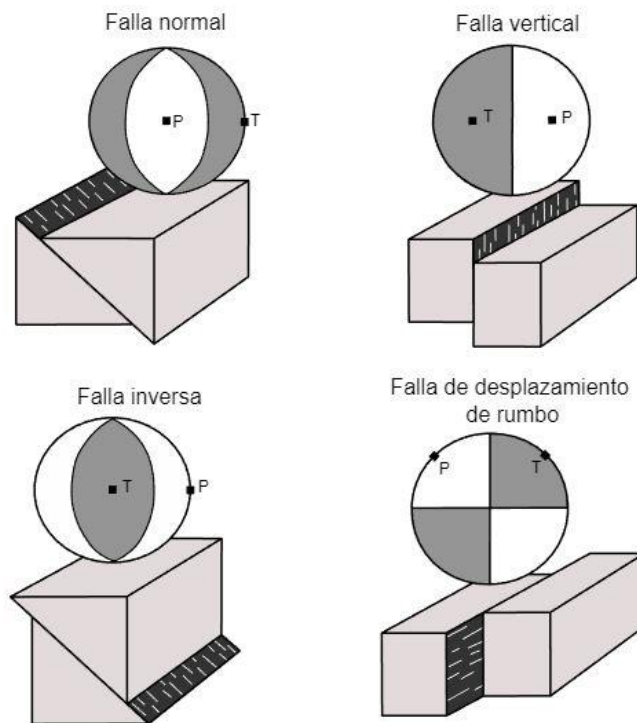


Figura 2.12. Mecanismos focales asociadas a diferentes cinemáticas de fallas. P; compresión y T; extensión. (Modificado de Fossen, 2010)

Los datos de compresión (P) o extensión (T) se utilizan para restringir las orientaciones de los planos nodales y sus sentidos de movimiento, lo que se conoce como mecanismo focal. Los cuadrantes de las pelotas de playa están separados por el plano de falla y el plano complementario, los ejes P y T se trazan en el centro de los cuadrantes como se muestra en la Figura 2.13. Existen diferentes pelotas de playa, las cuales indican los diferentes sentidos de movimientos de las fallas.

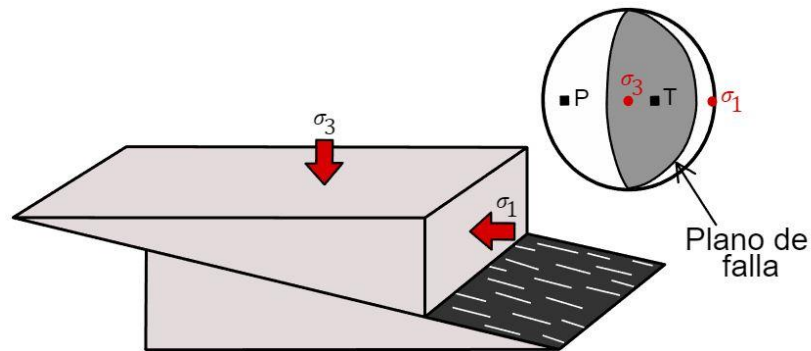


Figura 2.13. Ejemplo de los componentes de una pelota de playa asociada a una falla inversa. (Modificado de Fossen, 2010)

## 2.4 Yacimientos de petróleo naturalmente fracturados

Un yacimiento naturalmente fracturado (YNF) es definido como aquel que contiene fracturas creadas por la naturaleza, las cuales tienen un efecto positivo o negativo en el flujo de fluidos (Gómez-Amaya y Lozano-Gómez, 2019). Los Yacimientos Naturalmente Fracturados son considerados complejos y se pueden encontrar en cualquier tipo de litologías, como calizas, dolomías, carbonatos, areniscas, limolitas, anhidritas, rocas ígneas, rocas metamórficas, pedernal, rocas cementadas con sílice y lutitas (Aguilera y Aguilera, 2001; López-Rodríguez, 2013).

La diagénesis y el tectonismo son la principal causa de fracturas en los yacimientos naturalmente fracturados, y su orientación está principalmente en función de los esfuerzos regionales. Comprender la distribución de los sistemas de fracturas es de suma importancia para la identificación de las áreas con mayor potencial de producción de hidrocarburos (Alcántara-Viruet, Santiago-García, Fuentes-Cruz, García-Torres, Ángulo y Martínez, 2020).

La presencia de fracturas naturales en un yacimiento como se mencionó anteriormente puede tener efectos positivos, como por ejemplo, el maximizar la capacidad de flujo de petróleo, como en los yacimientos carbonatados, donde las fracturas naturales ayudan a generar porosidad secundaria y estimulan la comunicación entre los compartimientos del yacimiento. Los efectos también pueden ser negativos, por ejemplo, cuando se presenta canalización de agua o gas hacia los pozos, limitando así las opciones de desarrollo de los campos petroleros (Bratton *et al.*, 2006; López-Rodríguez, 2013). Bratton *et al.* (2006)

propone que el estudio de las fracturas naturales se debe de realizar durante la etapa de exploración, donde los afloramientos en superficie son análogos de yacimientos y se pueden considerar como un cimientito litológico, estructural y estratigráfico sobre el que los geólogos podrán construir modelos conceptuales.

### 2.4.1 Fracturas

Las fracturas se definen como una discontinuidad que resulta de esfuerzos que exceden la resistencia a la ruptura de una roca, generando así pérdida de cohesión. Estas pueden producirse por deformación de la roca o por algún proceso físico-químico y se pueden presentar en un gran rango de escalas (Aguilera y Aguilera, 2001).

Para caracterizar de forma adecuada los yacimientos con fracturas naturales, se hace necesario estudiar los parámetros que constituyen las fracturas, desde características locales, hasta la forma en la que se interrelacionan con otras fracturas. Dentro de los parámetros que se pueden encontrar en las fracturas están la apertura, longitud, buzamiento y orientación (Gómez-Amaya y Lozano-Gómez, 2019).



*Figura 2.14. Fracturas presentes en una formación de caliza.*

Las fracturas pueden ser generadas por concentración de esfuerzos en zonas de contraste composicional (contactos de capas, cambio de facies), por pérdida de volumen (compactación), por enfriamiento, por deformación estructural asociada con fallas y pliegues, por liberación de presiones anormales de fluidos (zonas geopresurizadas), entre otras causas (Aguilera y Aguilera, 2001; Gómez-Amaya y Lozano-Gómez, 2019). Las fracturas en los yacimientos son importantes, por tal motivo es esencial comprender

y conocer las características de los sistemas de fracturas y fallas, debido a la complejidad que pueden presentar los sistemas de fracturas es indispensable contar con métodos descriptivos, genéticos y geométricos para que los geocientíficos puedan clasificar las fracturas naturales. Las fracturas se pueden dividir en fracturas de cizalla (superficies de desplazamiento), de extensión o apertura (Fossen, 2010).

#### **a. Fracturas de cizalla**

Son fracturas a lo largo de las cuales se genera un desplazamiento paralelo al rumbo del plano de la fractura, el término fractura por cizalla se utiliza para fracturas con desplazamientos pequeños (milímetros), mientras el término falla se restringe a discontinuidades con un desplazamiento mayor (Fossen, 2010).

#### **b. Fracturas de extensión**

Son fracturas en las cuales las dos paredes de la roca fracturada se mueven a cierta distancia perpendicularmente a la superficie en sentidos opuestos, alejándose del plano de fractura (Ruiz-Cantú, 2017). Las fracturas extensionales pueden estar rellenas de gas, fluidos, magma o minerales, o pueden estar vacías, y suelen formarse conjuntamente con las fracturas de cizalla.

### **2.4.2 Clasificación geológica de las fracturas**

Las fracturas se pueden clasificar según su origen en cuatro grupos, estos son: fracturas tectónicas, regionales, diagenéticas y asociadas con la superficie. Pueden existir dos o más tipos de fracturas superpuestas en las rocas. Las mayores producciones de hidrocarburo en yacimientos naturalmente fracturados en el mundo provienen de fracturas tectónicas, y seguido de estas se encuentran las fracturas regionales (Aguilera y Aguilera, 2001).

#### **I. Fracturas tectónicas**

Están asociadas con un evento tectónico local, son ocasionadas principalmente por fallamiento o plegamiento de la roca. Las fracturas tectónicas son altamente repetitivas y se pueden encontrar a cualquier escala. Estas fracturas mejoran la permeabilidad y la

capacidad de almacenamiento de hidrocarburos dentro de las rocas López-Rodríguez, 2013).

## **II. Fracturas regionales**

Las fracturas regionales se generan al igual que las fracturas tectónicas por eventos tectónicos, desarrollándose a través de áreas muy grandes de la corteza con cambios relativamente pequeños de orientación, además, de que son ortogonales y perpendiculares a la capa donde se desarrollan (López-Rodríguez, 2013; Aguilera y Aguilera, 2001).

## **III. Fracturas diagenéticas**

Son fracturas que se originan cuando una roca experimenta una reducción en su volumen, ya sea por secamiento de la roca, contracción térmica o dolomitización (Aguilera y Aguilera, 2001).

## **IV. Fracturas asociadas con la superficie**

Estas fracturas se originan cuando una roca que se encuentra en la corteza terrestre está sometida a una carga litostática, la cual equilibra los esfuerzos que actúan sobre la roca. Cuando se cambia la carga litostática, por ejemplo, al llevar la roca a la superficie, el equilibrio inicial se verá afectado, con lo cual, la roca se terminará por fracturar, originando así las fracturas asociadas con la superficie (López-Rodríguez, 2013).

### **2.4.3 Morfología de las fracturas**

Las fracturas también se pueden clasificar según la morfología que presentan, así como, de la mineralización secundaria que puede ocurrir o no en las fracturas después de la formación de estas. A continuación se describen las categorías en las cuales se pueden agrupar las fracturas (Aguilera y Aguilera, 2001; López-Rodríguez, 2013).

#### **a. Fracturas abiertas**

Son fracturas en las cuales su superficie no ha sido alterada por mineralización secundaria y se encuentran abiertas en el momento en el que el yacimiento es descubierto (Aguilera y Aguilera, 2001).

### **b. Fracturas deformadas**

Son fracturas que han sido modificadas después de su formación, debido a esfuerzos que han producido deslizamiento entre las superficies de la fractura (López-Rodríguez, 2013).

### **c. Fracturas parcialmente mineralizadas**

Son fracturas que cuentan con una mineralización secundaria parcial, por ejemplo, de cuarzo o calcita, esta mineralización parcial actúa con un agente natural que no permite que las fracturas se cierren por completo. En el caso de la producción de hidrocarburos, estas fracturas son las que dan las producciones más consistentes a lo largo de la vida de los yacimientos (López-Rodríguez, 2013; Aguilera y Aguilera, 2001).

### **d. Fracturas completamente mineralizadas**

En este caso la mineralización es de tal magnitud que las fracturas se cierran completamente. En estas fracturas la recuperación de hidrocarburos es muy baja, aunque los hidrocarburos *in-situ* sean grandes (López-Rodríguez, 2013; Aguilera y Aguilera, 2001).

### **e. Fracturas vugulares**

Son conocidas también como vúgulos, son cavidades producidas en la roca por disolución de materiales calcáreos durante la intrusión de fluidos. Se caracterizan porque el espacio vacío que hay en ellas puede generar porosidades muy grandes y permeabilidades altas (Aguilera y Aguilera, 2001; López-Rodríguez, 2013). Aguilera y Aguilera (2001) mencionan que estas fracturas no se cierran a medida que se producen los yacimientos, esto debido a la morfología de lo vúgulos.

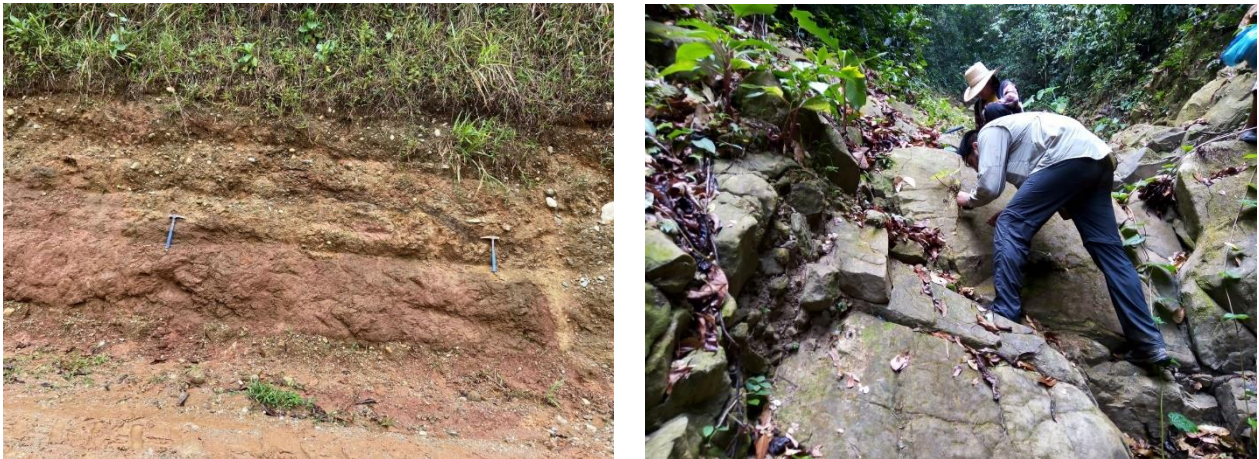
## Capítulo 3. Marco Geológico

### 3.1 Estratigrafía de la zona de Felipe Ángeles, Veracruz

#### 3.1.1 Jurásico

##### ➤ Jurásico inferior (Formación Salina)

Benavides (1950) describe que esta formación está compuesta por arenisca micácea de grano fino a grueso, estratificada en capas delgadas y conglomerado constituido por pedernal, arenisca, cuarcita en guijarros redondeados y roca granítica alterada. También se reporta pizarra calcárea con esquistosidad. Benavides (1950) y Acevedo (1962), con base en la medición de secciones estructurales, estiman que el espesor de esta formación es de aproximadamente 800 metros. Sin embargo, De la Rosa–Mora (2021) reporta que se estima para la Formación Salina un espesor de aproximadamente 2000 metros. El contacto estratigráfico inferior de la formación es desconocido, ya que no es visible en el área de estudio, sin embargo, se infiere que sobreyace al complejo del Macizo de Chiapas (Galicia–Flores y Lazcano–Camacho, 2018). Cabe mencionar que gracias al estudio realizado por Galicia–Flores y Lazcano–Camacho (2018), se determinó que la Formación Salina no solo pertenece al Jurásico inferior, sino que también se asocia con el Jurásico medio.



*Figura 3.1. Afloramiento perteneciente a la Formación Salina, también denominada como capas rojas, ubicado dentro del núcleo del anticlinal Cerro Pelón (izquierda). Rocas de la Formación Salina ubicadas a 4 km al norte del poblado de San Miguel de Allende, Veracruz (derecha).*

### ➤ **Jurásico medio (Formación Todos Santos)**

La Formación Todos Santos fue descrita por primera vez por Sapper (1894) como depósitos siliciclásticos y carbonatados de origen continental aflorando en los altos Cuchumatanes, Guatemala (como se citó en Nieto-Jiménez, 2021). Galicia-Flores y Lazcano-Camacho (2018) mencionan que en el bloque norte del núcleo del anticlinal Cerro Pelón aflora una formación correlativa a la Formación Todos Santos.

La Formación Todos Santos se encuentra expuesta a lo largo del margen norte del Macizo de Chiapas, en los estados de Oaxaca, Chiapas y sur de Veracruz, está compuesta por conglomerados polimícticos, areniscas, conglomerados, lodolitas, rocas volcánicas y depósitos volcanoclásticos (Galicia-Flores y Lazcano-Camacho, 2018). Tiene un espesor aproximado de 1200 metros, aunque muestra variaciones. Esta formación se encuentra sobreyaciendo discordantemente a la Formación Salina descrita anteriormente. Godínez-Urban *et al.* (2011), dividió a la Formación Todos Santos en dos miembros, siendo estos el miembro Diamante, conformado, por una parte, volcanoclástica y el miembro Jericó, definido litológicamente por arcosas.

### ➤ **Jurásico superior-Cretácico inferior (Formación Chinameca)**

La Formación Chinameca también conocida como Caliza Chinameca, presenta la misma edad de las rocas que afloran en la localidad de este mismo nombre, en el estado de Veracruz. Esta unidad está conformada por caliza dura y con un olor característico cuando se golpea, finamente arenosa hacia la base y bituminosa en partes, con capas de pedernal lenticular y cavidades de disolución, sobreyaciendo discordantemente a la Formación Salina en ambos flancos del Anticlinal Cerro Pelón (Benavides, 1950). Benavides (1950) estima que todas las calizas en conjunto representan un espesor medio de 300 metros.

La Formación Chinameca tiene características de roca generadora, un ejemplo se da en la porción superior de la serie de caliza del afloramiento de Río Playas, donde se presenta bien estratificada en capas delgadas y laminadas, bituminosa en partes con presencia de hidrocarburos (Benavides, 1950). Toda la serie tiene porosidad secundaria bien desarrollada, esto se puede observar debido a las numerosas cavidades de disolución que presentan las rocas.



Figura 3.2. Afloramiento de caliza de la Formación Chinameca ubicado dentro del anticlinal Cerro Pelón. En este afloramiento se observó presencia de petróleo y olor a gas en las rocas, además de materia orgánica.

Nieto–Jiménez (2021) menciona que recientemente Centeno–García *et al.* (en preparación), identificaron calizas tipo *mudstone–wackestone* y brecha dolomitizada en afloramientos denominados Las Isabeles, Miguel Hidalgo y Las Cavernas. En el flanco este del Anticlinal Cerro Pelón, al sur del ejido de Ignacio López Rayón, los autores identificaron calizas tipo *mudstone* arcilloso con materia orgánica, *mudstone* arcilloso y lutitas calcáreas, *wackestone* laminado, *wackestone–packstone* y *mudstone–wackestone*.

### 3.1.2 Cretácico

#### ➤ Cretácico superior (Formación Méndez)

La Formación Méndez está conformada por una intercalación de lutitas y margas, bien estratificadas, con presencia de arenisca arcillosa de grano fino. Esta formación alcanza un espesor de entre 650 y 690 metros. Se encuentra descansando sobre la caliza Chinameca y se puede observar en ambos flancos de la estructura del anticlinal de Cerro Pelón con características similares (Benavides, 1950).

En las cercanías del Anticlinal Cerro Pelón, entre el río Playas y el arroyo Amate, Benavides (1950) observó que cerca de la afluencia de estos se encuentra una manifestación de aceite viscoso, que escurre entre lutitas pertenecientes al Cretácico superior correspondiente a la Formación Méndez. Nieto–Jiménez (2021), infiere que esta

sucesión se encuentra yuxtapuesta con la Formación Salina y con rocas de edad Eoceno mediante una soldadura salina.



*Figura 3.3. Afloramiento de margas de la Formación Méndez, ubicado sobre el camino hacia las Isabeles, al sur de Río Playas.*

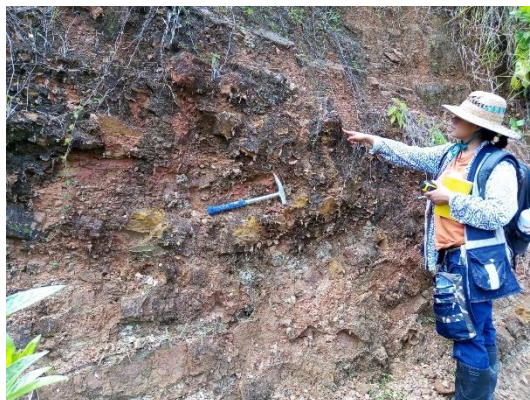
### 3.1.3 Paleógeno

#### ➤ Eoceno

Benavides (1950) reporta la presencia de lutita compacta y dura, finamente arenosa y bien estratificada en capas delgadas o lenticulares de arenisca dura y de grano fino. También observó horizontes de arenisca de grano fino a medio, arenisca conglomerática y conglomerado con guijarros de pedernal, roca ígnea, arenisca y cuarcita con un espesor de 480 a 520 m. En la base de esta unidad se presenta una zona de areniscas con intercalaciones de conglomerado y arenisca arcillosa, reportando un espesor medio de 80 metros (Benavides, 1950).

Nieto–Jiménez (2021) menciona en su trabajo que Centeno–García *et al.* (2019) describen que el registro litoestratigráfico del flanco occidental del anticlinal de Cerro Pelón está representada de base a cima por una sucesión de arenisca fina a media con abundantes rizaduras y estratificación cruzada, así como areniscas conglomeráticas. Esta unidad está sobreyacida por un conglomerado soportado por matriz y por clastos, con fragmentos de areniscas, además de una sucesión de lutitas y limolitas con escasas magras (Nieto–Jiménez, 2021). Los contactos de esta unidad no fueron observados, pero se infiere que se encuentran en yuxtaposición con las rocas jurásicas de la Formación

Salina y las rocas cretácicas de la Formación Méndez por medio de la Falla Olmeca (De la Rosa–Mora, 2021).



*Figura 3.4. Depósitos de arenisca con conglomerado del Eoceno, ubicados cerca del poblado de las Isabeles.*

### ➤ **Oligoceno**

Esta unidad presenta una zona de lutitas compactas en capas delgadas, interestratificadas con horizontes de ceniza volcánica, además de presencia de arena consolidada de grano fino, con intercalaciones de lutita arenosa con restos vegetales carbonizados (Benavides, 1950). Además, hay presencia de arenisca calcárea, que pasa a arenisca conglomerática y conglomerado constituido por roca ígnea alterada, arenisca y cuarzo.

La unidad del Oligoceno se caracteriza principalmente por la acumulación de facies finas, como lo son las intercalaciones de lutitas y limolitas con escasas areniscas en casi toda esta unidad, la única diferencia se refiere a un aspecto calcáreo que se registra en algunas lutitas y limolitas, las cuales gradúan a margas, también presenta lentes de caliza limosa (De la Rosa–Mora, 2021). Nieto–Jiménez (2021), menciona que esta formación se encuentra infrayacente con naturaleza concordante a las rocas del Mioceno y suprayaciendo en concordancia a las rocas de edad eoceno.

### **3.1.4 Neógeno**

#### ➤ **Mioceno**

Está representado por una sucesión de turbiditas de grano fino, caracterizado por areniscas finas con pliegues sinsedimentarios y escasos conglomerados. También está conformado por una alternancia de limolitas calcáreas en estratos delgados de tobas

silíceas (De la Rosa–Mora, 2021). En el flanco occidental del anticlinal de Cerro Pelón se encuentran expuestos paquetes de areniscas con clastos erráticos de tamaño de guijarros a cantos e intraclastos con plegamiento sinsedimentarios (Centeno–García *et al.*, 2019). Además esta sucesión presenta tobas alteradas con lutitas calcáreas. Nieto–Jiménez (2021), observó en las inmediaciones de San Miguel de Allende una sucesión de lutitas intercaladas con lutitas calcáreas, areniscas y tobas de composición mineral predominada por cuarzo, feldespato y micas.



*Figura 3.5. Depósitos de limolita del Mioceno, encontrados en el poblado de San Miguel de Allende, Veracruz.*

### **3.1.5 Cuaternario**

Benavides (1950) menciona en su estudio que identificó gravas y arena arcillosa. Por otra parte, en registros estratigráficos más recientes, De la Rosa–Mora (2021) observó la presencia de depósitos de arenas, gravas y arcillas arenosas. Con un espesor de 10 m metros.

## **3.2 Estratigrafía de la zona de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

### **3.2.1 Jurásico**

Durante el Jurásico se registra la fase principal de la apertura del Golfo de México, donde se depositaron capas rojas, principalmente compuestas de arenas, lutitas y depósitos de sal. Los depósitos de sal están distribuidos debajo de la Sierra Madre de Chiapas, y llegan al sur hasta la cuenca *pull-apart* de Ixtapa y la Depresión Central de Chiapas (Meneses–Rocha, 2001).

### ➤ **Jurásico medio (Formación Todos Santos)**

La Formación Todos Santos en Chiapas está compuesta por estratos medianos a gruesos compuestos por conglomerados polimícticos, arenisca, limolitas, rocas volcánicas y depósitos volcanoclásticos (Serrano-López, 2021). A esta formación también se le da el nombre de capas rojas y se encuentra asociada con los primeros eventos de apertura del Golfo de México.

### ➤ **Jurásico superior–Cretácico inferior (Formación San Ricardo)**

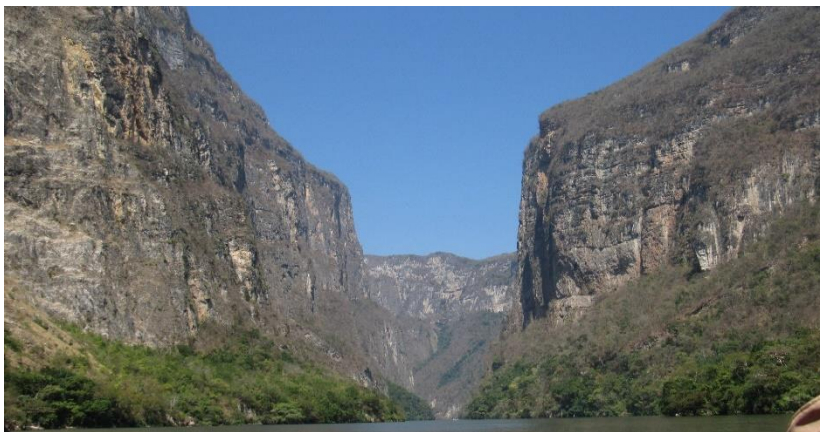
La Formación San Ricardo se encuentra sobreyaciendo a la Formación Todos Santos, y está conformada principalmente por capas de arenisca, caliza y evaporitas (Serrano-López, 2021).

## **3.2.2 Cretácico**

Los depósitos del Cretácico están compuestos principalmente por calizas y dolomías depositadas en un ambiente de plataforma marina carbonatada (Witt *et al.*, 2012).

### ➤ **Cretácico superior (Grupo Sierra Madre)**

Este grupo consiste principalmente de caliza y dolomía, con brechas intercaladas. La secuencia de este grupo en la zona de la provincia de fallas laterales está representada por cuatro formaciones depositadas en un ambiente profundo y marino somero respectivamente: Fm. Méndez, Fm. Xochitlán, Fm. Angostura y Fm. Ocozocuatla (Serrano-López, 2020).



*Figura 3.6. Afloramiento de caliza del Grupo Sierra Madre situado dentro del Cañón del Sumidero, Chiapas.*

## I. Formación Angostura

Esta formación se puede encontrar principalmente en la porción central y oriental de la Sierra de Chiapas, y se encuentra conformada por estratos de dolomía, caliza y brecha calcárea, con un espesor promedio de 1100 metros. Meneses-Rocha (2001) menciona que esta formación se encuentra sobreyaciendo al Grupo Sierra Madre e infrayacente a las formaciones Soyaló, Lacandón y Lutita Nanchital mediante contactos concordantes.



*Figura 3.7. Afloramiento de caliza de la Formación Angostura, ubicado en las inmediaciones de la Carretera Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas.*

## II. Formación Xochitlán

La Formación Xochitlán está conformada por brechas calcáreas dolomitizadas con estratos de caliza *packstone*, intercaladas con capas de margas limosas, lutita calcárea, limolita calcárea, brecha calcárea y caliza *wackestone* de bioclastos (Sánchez-Montes de Oca, 1967).

## III. Formación Méndez

Serrano-López (2020) cita en su trabajo que esta formación está conformada por estratos de espesor pequeño de 5 a 20 centímetros de margas color gris claro a amarillento, con laminaciones. Se tiene registro que esta formación tiene un espesor promedio de 100 a 600 metros y se encuentra distribuida en el frente norte del Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras de Chiapas.

### 3.2.3 Paleógeno

#### ➤ Paleoceno (Formación Soyaló)

El Paleoceno marca el inicio de la deposición siliciclástica terrígena, donde se tienen unidades de plataforma de agua poco profunda, turbidita de pendiente y depósitos profundos de cuenca (Witt *et al.*, 2012). Meneses–Rocha (2001) menciona que esta formación, en el área de Ixtapa, se encuentra dividida en dos miembros, el inferior consiste en estratos de 30 a 150 centímetros de brecha calcárea y caliza *wackestone* con foraminíferos planctónicos. Por otro lado, el miembro superior está conformado por estratos delgados de lutita y limolita con algunos exoclastos de caliza. Esta formación se encuentra por debajo de la Formación El Bosque, sin embargo, en el área de Ixtapa, el contacto con la Formación Lomut del Eoceno es parcialmente erosivo y al poniente cambia a la Lutita Nanchital, conformada por capas de lutita depositadas en un ambiente de cuenca (Serrano-López, 2021).



Figura 3.8. Afloramiento de estratos de arenisca y lutita de la Formación Soyaló. (Foto obtenida de Serrano-López, 2020).

#### ➤ Eoceno inferior–medio (Formación El Bosque)

Serrano-López (2021) hace referencia que esta formación está conformada principalmente por capas delgadas de limolita rojiza intercalada con estratos de arenisca con mica de grano fino a grueso con una matriz arcillosa, además, también se encuentran conglomerados con gravas y guijas. El espesor de esta formación varía entre 400 a 900 metros. La Formación El Bosque se encuentra en la parte central y oriental de la Sierra de Chiapas, teniendo contacto inferior con la Formación Soyaló y Lacandón. Su contacto superior varía en diferentes partes de la Sierra de Chiapas, en algunas partes el contacto

es una discordancia angular con los depósitos de Mioceno inferior (Quezada–Muñetón, 1987).

➤ **Eoceno medio (Formación San Juan)**

Consiste principalmente de una secuencia de lutita con gran contenido fósil, limolita, arenisca y arenisca con grava, en el área de Ixtapa se ha calculado un espesor de 1950 metros para esta formación, y solo aflora en el área de Ixtapa y al sur de Tuxtla Gutiérrez (Meneses-Rocha, 2021). El contacto inferior con la Formación El Bosque es transicional cerca de Tuxtla Gutiérrez, mientras que en el área de Ixtapa es una discordancia angular con la Formación Soyaló (Serrano-López, 2021).

➤ **Eoceno (Formación Lomut)**

Dentro de las unidades del Eoceno predominan depósitos clásticos continentales y depósitos menores de aguas poco profundas y carbonatadas. La Formación Lomut está conformada por depósitos carbonatados que afloran en la sierra con espesores de 1540 a 1950 metros (Meneses–Rocha, 2001; Quezada-Muñetón, 1987). Esta formación fue dividida en dos unidades, donde la inferior consiste en capas delgadas de arenisca con mica, con un paquete de estratos de conglomerado de cuarzo y pedernal, y caliza arcillosa de aspecto conglomerático. Mientras que la unidad superior contiene capas de arenisca con mica de grano fino a medio con intercalaciones de lutita (Meneses–Rocha, 2001; Quezada-Muñetón, 1987). Serrano-López (2021) menciona que aunque se le ha asignado una edad general del Eoceno, en el área de Ixtapa su edad va del Eoceno medio al superior.



*Figura 3.9. Afloramiento de arenisca intercalada con caliza de la Formación Lomut. (Foto obtenida de Serrano-López, 2020).*

### ➤ **Oligoceno (Formación Mompuyil)**

La Formación Mompuyil fue dividida en dos unidades, la unidad inferior está conformada por rocas carbonatadas como caliza conglomerática, arcillosa y con niveles de coquina y biocalcarenita, además, se encuentra intercalada con lutita y arenisca calcárea. La unidad superior contiene evaporitas, conformadas por depósitos de yeso y anhidrita. Esta formación se encuentra en la parte central de la Sierra de Chiapas, en los alrededores de Ixtapa y Bochil Chiapas, su contacto superior es discordante con la Formación Ixtapa y concordante con los depósitos del Mioceno inferior en la cuenca de Ixtapa (Meneses–Rocha, 2001).

### **3.2.4 Neógeno**

Durante el Neógeno hubo un incremento de material terrígeno continental en la Sierra de Chiapas (Witt *et al.*, 2012). La distribución de las rocas magmáticas documenta una migración del vulcanismo del Macizo de Chiapas hacia el este de la Sierra de Chiapas durante el Mioceno medio-superior.

### ➤ **Mioceno Inferior (Grupo Modelo)**

Este grupo está dividido en tres formaciones: marga Na Bolom, Caliza Río Lajas y Formación Santa. Marga Na Bolom consiste en margas intercaladas con areniscas, lutitas y limolita calcárea. La Caliza Río Lajas, como su nombre lo dice, está conformada por caliza masiva, caliza arenosa y arenisca calcárea y la Formación Santa, está constituida por caliza con niveles de corales con cambios en la cima de arenisca y lutita calcárea. Esta formación solo aflora de manera local y solo se encuentra al sureste de la cuenca de Ixtapa (Meneses–Rocha, 1985).



Figura 3.10. Afloramiento del Grupo Modelo. Izquierda: limolitas; Derecha: caliza. (Fotos obtenidas de Serrano-López, 2020).

➤ **Mioceno medio (Grupo Río Hondo)**

Este grupo fue dividido en dos miembros, el inferior Conglomerado Zapotalillo conformado por intercalaciones de conglomerado masivo, arenisca, limolita y algunas capas de caliza, mientras que el miembro superior, la Lutita Zapotal Viejo tiene estratos de limolita con laminación plano–paralela que grada a lutita fosilífera con restos de hojas y algunas grietas de desecación (Meneses–Rocha, 2001).

➤ **Mioceno superior-Plioceno inferior (Formación Ixtapa)**

Meneses–Rocha (2001) describe a la Formación Ixtapa como una intercalación de conglomerado, arenisca y limolita, esta unidad fue dividida en tres grupos, el conglomerado inferior formado por capas de conglomerado con clastos subredondeados compuestos por caliza del Cretácico y el Paleógeno. El segundo consiste en arenisca tobácea y conglomerado con granito y caliza, mientras que el tercero consiste en conglomerado con clastos redondeados cristalinos y algunos clastos de caliza cretácica. En el centro de la cuenca, el contacto inferior con el Grupo Río Hondo es una discordancia angular erosiva, al igual que su contacto superior con los depósitos volcánicos (Meneses–Rocha, 2001).



*Figura 3.11. Afloramiento de la Formación Ixtapa. (Foto obtenida de Serrano-López, 2020).*

➤ **Plioceno (Depósitos Volcánicos)**

Los depósitos consisten en cenizas y brechas soportadas por cenizas y clastos de andesita de hornblenda y caliza, tiene un espesor máximo de 1200 metros y se distribuyen por todo el sureste de la cuenca de Ixtapa (Quezada–Muñetón, 1987). Esta unidad se depositó de manera discordante sobre la Formación Ixtapa.



*Figura 3.12. Fotografía de depósitos de ceniza y lahar. (Foto obtenida de Serrano-López, 2020).*

### **3.2.5 Cuaternario**

Los depósitos del Cuaternario consisten principalmente de piroclastos y andesitas producto del vulcanismo en la zona ubicada entre la Depresión Central, la Sierra Alta y el Frente Norte, donde se encuentra el volcán activo El Chichón (Meneses–Rocha, 2001; Witt *et al.*, 2012).

## Capítulo 4. Marco Tectónico

### 4.1 Sierra Madre de Chiapas

En el sur de México se encuentra la Sierra Madre de Chiapas, en las inmediaciones del punto triple formado por las placas tectónicas de Cocos, Caribe y Norteamericana (Figura 4.1). La Sierra de Chiapas, además del estado de Chiapas, también comprende una parte de los estados de Veracruz y Oaxaca (Witt, Rangin, Andreani, Olaez y Martínez, 2012; Sánchez–Montes de Oca, 1979). A través de los años, se ha estudiado la evolución tectónica de esta zona y hasta la actualidad sigue siendo un tema de debate entre los geocientíficos.

Existen un gran número de modelos propuestos para describir la evolución tectónica, como lo es el de Guzmán–Speziale y Meneses–Rocha (2000), que hace un gran énfasis en la importancia de la tectónica debido a deslizamientos de rumbo. Sugieren que el levantamiento de la Sierra Madre de Chiapas puede ser producto de una componente transpresiva de deformación resultado de los cambios en las tendencias de las principales fallas de la corteza. Dentro de las estructuras que son responsables de los desplazamientos en esta región se encuentra el sistema de fallas E–W Polochic–Motagua y una serie de fallas NW–SE ubicadas en la Sierra Madre de Chiapas (Witt *et al.*, 2012).

Por otra parte, el levantamiento de la Sierra Madre de Chiapas se deduce que se debe a la orogenia del Mioceno medio–superior, producto de algunos eventos tectónicos ocurridos en la zona. La mayoría de las fases tectónicas que han sido relacionadas con los cambios abruptos de estratigrafía, principalmente la transición de marino a continental, se asume que es consecuencia del levantamiento y la erosión del Macizo de Chiapas (Witt *et al.*, 2012). Las diferentes estructuras que se observan y las edades de las rocas involucradas en esta deformación, permiten distinguir cuatro provincias tectónicas: provincia de fallas de desplazamiento, provincia de fallas inversas, monoclinas de la sierra y el anticlinorio de Chicomuselo (Sánchez–Montes de Oca, 1979).

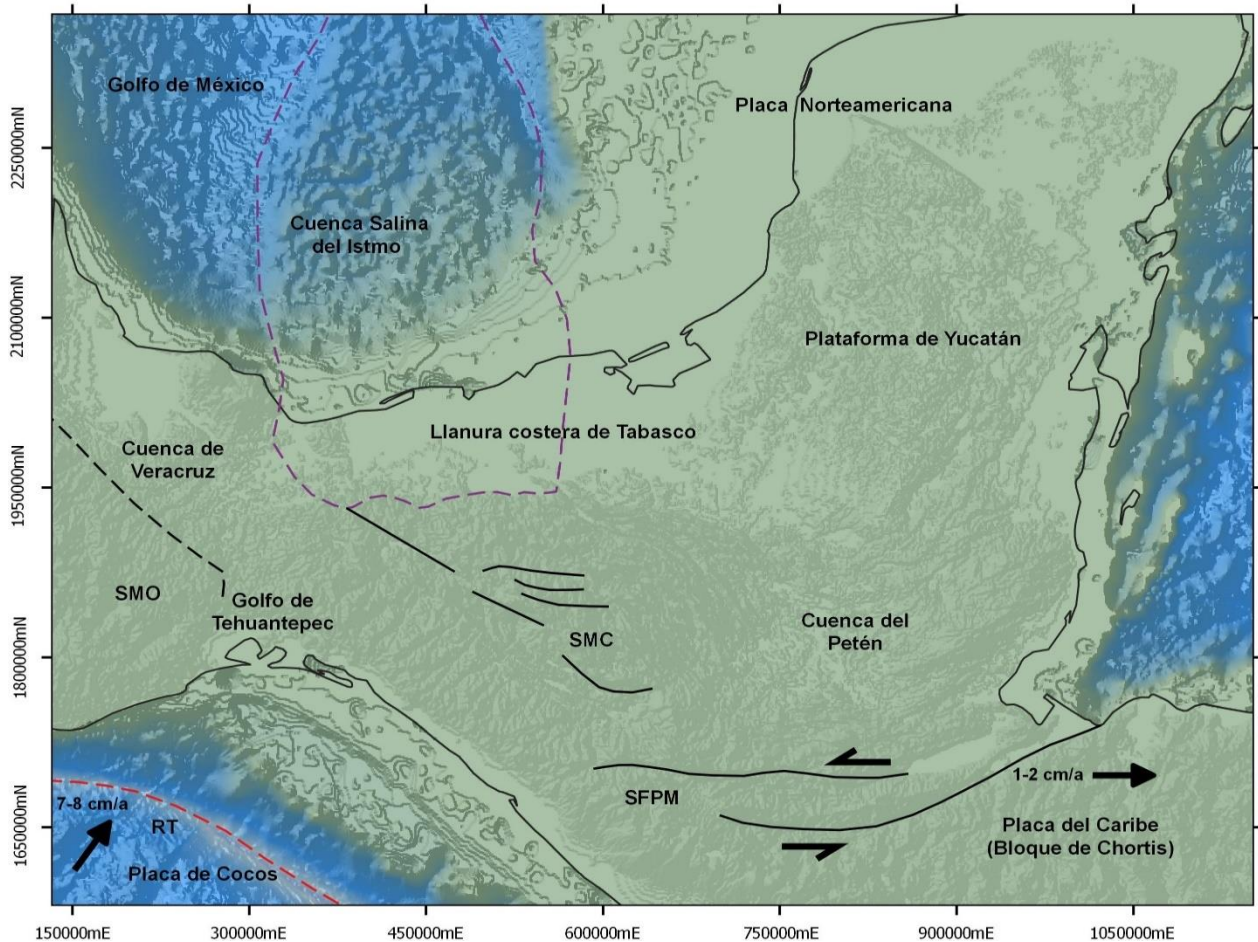


Figura 4.1. Representación del punto triple formado por las placas tectónicas de Cocos, Caribe y Norteamericana. La línea roja discontinua corresponde a la trinchera Mesoamericana. La línea violeta discontinua delimita el área de la Cuenca Salina del Istmo. La línea negra discontinua representa a la Sierra Madre Oriental. Las líneas negras continuas representan fallas. RT; Ridge de Tehuantepec, SMC; Sierra Madre de Chiapas, SFPM; Sistema de Fallas Polochic-Motagua, SMO; Sierra Madre Oriental. (Mapa realizado con base en Witt et al., 2012)

## 4.2 Provincia de Fallas Laterales de Chiapas

Se trata de una provincia tectónica que rodea una gran parte de la Sierra de Chiapas y el extremo suroriental de Veracruz y Oaxaca, y está formada por un conjunto de bloques ascendentes y descendentes delimitados por fallas de rumbo laterales izquierdas (Figura 4.2) (Sánchez–Montes de Oca, 1979; Guzmán–Speziale y Meneses–Rocha, 2000; Meneses–Rocha, 2001). Las fallas de desplazamiento de rumbo tienen una orientación NW–SE y son responsables del levantamiento topográfico de la Sierra Madre de Chiapas. Se conoce que el movimiento a lo largo de estas fallas fue predominantemente vertical, desde finales del Eoceno hasta principios del Mioceno (Meneses–Rocha, 2001).

Esta provincia está caracterizada estratigráficamente por discordancias y cambios de espesor o variaciones litológicas a lo largo de las estructuras, lo que indica un tectonismo sindeposicional (Meneses–Rocha, 2001). La estratigrafía actual sugiere que esta provincia ha estado involucrada en una larga y compleja historia tectónica, en la cual se han producido diferentes eventos. No obstante, los movimientos en las fallas se convirtieron definitivamente en deslizamiento durante el Mioceno medio y, hasta la fecha, se han desarrollado tanto eventos transtensionales como transpresionales, los cuales son responsables de las características estructurales actuales (Guzmán–Speziale y Meneses–Rocha, 2000).

Se estima que la provincia de fallas laterales tiene un desplazamiento de alrededor de 70 kilómetros desde el Mioceno tardío (Guzmán–Speziale y Meneses–Rocha, 2000), por otro lado, Witt *et al.* (2012) estima que el desplazamiento horizontal a lo largo de las principales fallas de rumbo en la Sierra de Chiapas es de entre 30 y 40 kilómetros durante los últimos 6–5 millones de años. Esto implica un desplazamiento lateral de 0.8 centímetros cada año, dejando ver que no existe hasta la fecha un consenso final por parte de los autores sobre la cantidad de desplazamiento lateral a lo largo de las fallas.

Guzmán–Speziale y Meneses–Rocha (2000) plantearon que el movimiento de rumbo se propaga desde el sistema de fallas Polochic–Motagua hasta la Sierra Madre de Chiapas, dentro de un sistema de fallas de transferencia, que incluye movimiento de rumbo a lo largo de al menos seis fallas principales. Las fallas de rumbo de la Sierra Madre de Chiapas se encuentran dentro del límite relacionado con la apertura del Golfo de México. La mayoría de estas fallas ocurren principalmente en el oriente de la Depresión Central y en la Sierra Alta, por lo que se dividieron las fallas de rumbo en dos sistemas principales, el Sistema de Fallas Tuxtla–Malpaso y el sistema de Fallas de la Sierra Alta (Witt *et al.*, 2012).

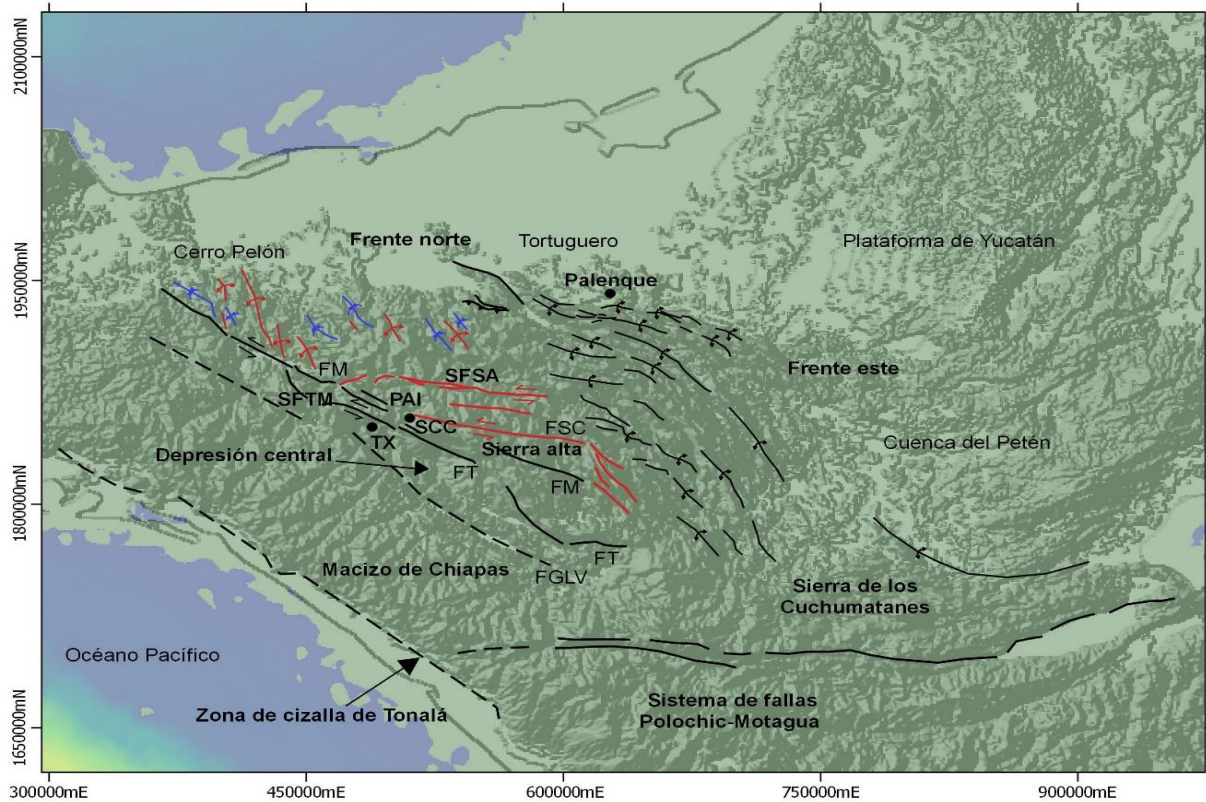


Figura 4.2. Principales unidades fisiográficas de la Sierra Madre de Chiapas. Las líneas negras continuas representan las fallas del Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso (SFTM). Las líneas rojas representan las fallas del Sistema de Fallas de la Sierra Alta (SFSA). FGLV; Falla Grijalva-Las Ventas, SFSA; Sistema de Fallas de la Sierra Alta, PAI; Cuenca pull-apart de Ixtapa, FM; Falla Malpaso, SCC; San Cristóbal de las Casas, FSC; Falla San Cristóbal; TX; Tuxtla Gutiérrez, FT; Falla Tuxtla, SFTM; Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso. (Mapa realizado con base en Witt et al., 2012)

### 4.3 Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso

El Sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso es un sistema de deslizamiento de rumbo lateral izquierdo que limita al oeste con la Sierra de Chiapas. Este sistema es la característica más notable de toda la Sierra Madre de Chiapas (Witt et al., 2012). El sistema de fallas tiene una dirección NW-SE y se extiende por más de 200 kilómetros de longitud desde el sur de Veracruz, pasando por la presa Malpaso hasta la Sierra de los Cuchumatanes. Este sistema está compuesto por dos principales fallas laterales, la Tuxtla y la Malpaso (ver Figura 4.2). Sánchez-Montes de Oca (1979) señala que el principal desplazamiento a través de las fallas de desplazamiento lateral izquierdo tuvo lugar durante el Mioceno medio-superior.

Se considera que este sistema de fallas es activo principalmente en la zona sur, debido a que se han registrado algunos eventos sísmicos largos a lo largo de todo el Sistema de

Fallas Tuxtla– Malpaso desde 1990 hasta el reciente. Meneses–Rocha (2001) indica que la actividad de la falla Malpaso ocurre desde hace 6–5 millones de años, es decir, a finales del Mioceno superior, lo que concuerda con lo propuesto por Sánchez-Montes de Oca (1979). Las características morfológicas más importantes de la Falla Malpaso se observan en las cercanías de la presa Chicoasén así como en el Cañón del Sumidero, Chiapas.

La zona de deformación se extiende hasta 300–400 metros dentro de los carbonatos del Cretácico e incluye pliegues, planos de fallas estriados, y fallas normales e inversas; todas estas son evidencias de una deformación horizontal (Witt *et al.*, 2012). Además de lo anterior, en el norte del Sistema de Fallas Tuxtla–Malpaso, las expresiones topográficas coinciden con algunos pliegues dispuestos de manera escalonada, como es el Anticlinal Cerro Pelón. Este anticlinal es un pliegue recumbente con estratos volcados en contacto discordante, con los sedimentos del Mioceno menos deformados. Esta zona alberga la mayor deformación de toda la Sierra de Chiapas, así como una sedimentación sintectónica desde el Mioceno medio–superior. Existen algunos estudios y datos termocronológicos en los que se sugiere que la evolución del Sistema de Fallas Tuxtla–Malpaso tuvo lugar en dos principales periodos de tiempo, el primero correspondiente al Mioceno medio (16–10 millones de años) y se puede relacionar con el levantamiento regional, y el segundo periodo corresponde al Mioceno superior–Plioceno (6–5 millones de años), el cual está representado por el inicio de una importante deformación transpresiva resultado de la actividad de los desplazamientos de rumbo (Brichau *et al.*, 2009; Witt *et al.*, 2012).

#### **4.4 Sismicidad en la Provincia de Fallas laterales de Chiapas**

La provincia de fallas de desplazamiento lateral es una región que es considerada activa debido a la actividad sísmica que se desarrolla en esta zona. Estos eventos sísmicos se pueden observar en los catálogos sísmicos (Servicio Sismológico Nacional, 2022) de magnitud moderada y poco profundos. Guzmán–Speziale, Pennington y Matumoto (1989) señalan en su trabajo que los mecanismos focales de los sismos obtenidos pertenecen a planos de falla de desplazamiento lateral izquierdo, los cuales coinciden con la dirección de las fallas principales.

## Capítulo 5. Metodología

Para la realización de este trabajo se hizo uso de diferentes técnicas con la finalidad de cumplir cada uno de los objetivos planteados. La metodología utilizada se llevó a cabo en dos partes, la primera mediante trabajo de campo y la segunda en trabajo de gabinete. El trabajo de campo consistió en una salida a campo para identificar y reconocer la estratigrafía de la zona de interés, así como las estructuras presentes, y la medición de datos estructurales. Por su parte, el trabajo de gabinete consistió en la documentación bibliográfica, análisis de la estratigrafía, identificación de lineamientos en mapas topográficos, generación de una base de datos recabados en campo, así como el procesado de estos para obtener diagramas como: roseta de fracturas, mecanismos focales, secciones estratigráficas y el análisis de los resultados obtenidos. A continuación, se describe a detalle cada una de las etapas de la metodología.

### 5.1 Trabajo de campo

Consistió en una salida de campo correspondiente al periodo del 03 al 13 de febrero del 2022, con una primera parada en la localidad de Río Playas, Veracruz, donde se trabajó en las cercanías del Anticlinal Cerro Pelón y una segunda parada en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, trabajando en los alrededores de esta ciudad. Dentro de las actividades realizadas en las cercanías del poblado de Río Playas están la identificación de las diferentes formaciones geológicas que afloran en esta zona y la descripción de sus respectivas características litológicas y estratigráficas. Así mismo, se realizó la identificación de estructuras como planos de falla, indicadores cinemáticos y fracturas, para su posterior medición e interpretación (Figura 5.1).



*Figura 5.1. Trabajo de campo realizado en las cercanías del poblado de Río Playas, Veracruz. a) Identificación de la estratigrafía y litología de la zona de estudio. b) Medición de datos estructurales.*

Por su parte, el trabajo de campo realizado en las cercanías de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, se dividió en cuatro principales zonas de trabajo (Figura 5.2). La primera zona se encuentra en las inmediaciones de la autopista Tuxtla Gutiérrez–San Cristóbal de las Casas, en donde se tomaron datos estructurales en once estaciones de trabajo. La segunda zona se ubica en la carretera Tuxtla Gutiérrez–Chicoasén donde se obtuvieron datos de cinco estaciones, la tercera zona se ubica en la Cascada “El Chorreadero” perteneciente a la ciudad de Chiapa de Corzo, en donde solo se tomaron datos estructurales en una estación. Finalmente, la cuarta zona corresponde al Cañón del Sumidero. En estos cuatro transectos se realizó la identificación y descripción de la estratigrafía de la zona, así como de las estructuras geológicas presentes para entender su comportamiento a lo largo de la falla Tuxtla-Malpasos, así también se realizó la identificación y medición de los planos de falla y de los indicadores cinemáticos para su análisis, además se realizó la medición de los planos de las fracturas presentes en las rocas. Dentro de los instrumentos utilizados para la realización del trabajo de campo están una brújula tipo Brunton, transportador, teléfono celular con la aplicación *FieldMove*, *Climo*, marcador, GPS, flexómetro, lupa, mapas topográficos y geológicos del área de estudio.

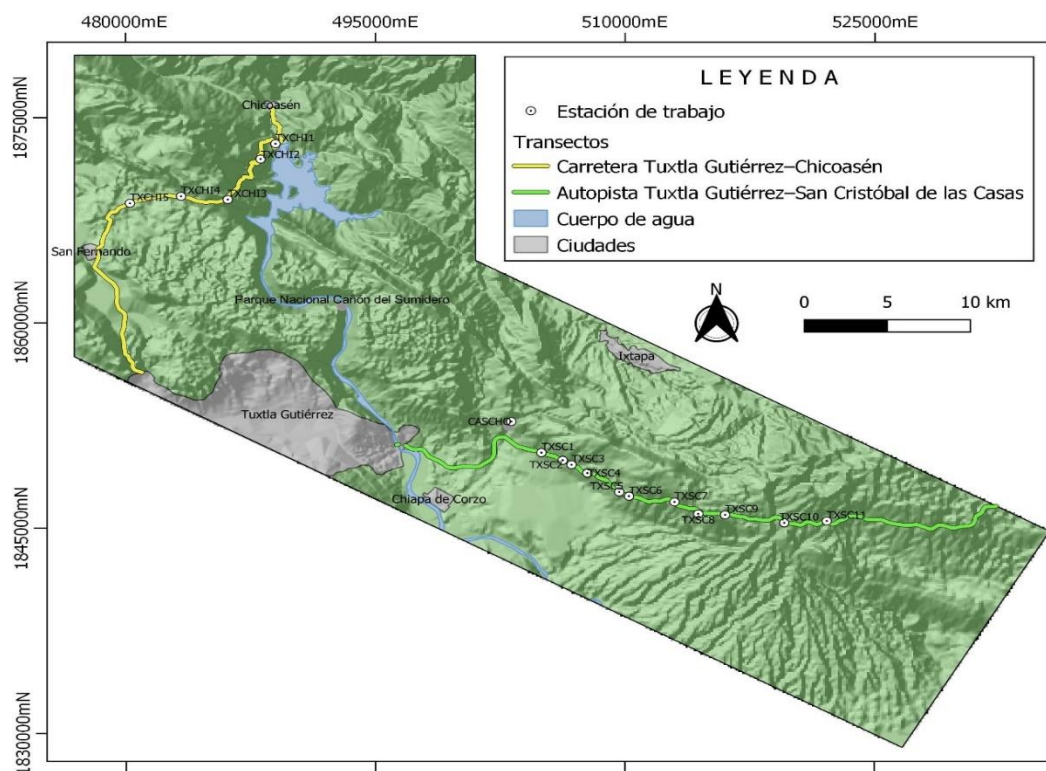


Figura 5.2. Ubicación de la zona de trabajo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y de las estaciones de trabajo. Estaciones de trabajo: TXSC; Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas, TXCHI; Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén, CASCHO; Cascada El Chorreadero.

### 5.1.1 Identificación de la estratigrafía y estructuras

Para la identificación de la estratigrafía se procedió a realizar caminatas para identificar y describir las formaciones que se encuentran en los alrededores y en el núcleo del Anticlinal Cerro Pelón, para esto se hizo uso de lupa, pica y ácido clorhídrico (HCl) para observar las muestras extraídas de los afloramientos. Se describió la litología de la Formación Salina (Jurásico inferior–medio) en el núcleo del anticlinal, la Formación Chinameca (Jurásico superior–Cretácico inferior) en la sección llamada Las Isabeles y se reconoció la Formación Méndez (Cretácico superior) en las cercanías de la localidad de Vista Hermosa. Los afloramientos del Eoceno y Mioceno se observaron en la localidad de Graciano Sánchez. Para entender cómo se encuentra la estratificación (S0) en estas formaciones, se midieron los planos de estratificación de estas con ayuda de una brújula tipo Brunton.

Por su parte, en los alrededores de Tuxtla Gutiérrez también se identificó la estratigrafía y litología del Grupo Sierra Madre (Cretácico superior) el cual es equivalente a la Formación Chinameca. También se observó la Formación Angostura (Cretácico superior) equivalente a la Formación Méndez en el área de Cerro Pelón y la Formación Soyaló (Paleoceno). Se identificaron las estructuras presentes en las zonas visitadas, como lo son pliegues, fracturas, fallas, indicadores cinemáticos y discordancias, estas estructuras ayudaron a entender cómo se encuentran dispuestas las diferentes formaciones en la zona de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y la posible relación con la falla Tuxtla-Malpasso.



*Figura 5.3. Medición de planos de falla y de fracturas realizados en la carretera Tuxtla Gutiérrez–San Cristóbal de las Casas.*

### 5.1.2 Mediciones estructurales

Para el análisis estructural de las zonas de interés se midieron datos estructurales de fallas, fracturas y estratificación, además, también se midieron algunos indicadores cinemáticos como lo son estrías y fracturas tipo Riedel. Se midieron alrededor de 1800 datos en campo, distribuidos en 17 estaciones de trabajo.

Los datos obtenidos de las mediciones realizadas fueron la dirección de inclinación (*Dip Direction*) y la inclinación de los planos (*Dip*), obteniendo datos con una notación de la siguiente manera (dirección de inclinación / inclinación), por otra parte, el dato medido en las estrías fue el *pitch* (ángulo formado entre la dirección de las estrías, respecto a una línea horizontal, medido sobre el plano de falla). Para la medición de los datos estructurales se hizo uso de dos técnicas diferentes, la primera mediante la técnica convencional haciendo uso de una brújula tipo Brunton y la segunda utilizando un teléfono celular inteligente que contuviera la aplicación *FieldMove Clino* (*Petroleum Experts*, 2013).

#### a. Medición de planos mediante la aplicación *FieldMove Clino*

Esta técnica es más sencilla y rápida de hacer, debido a que se hace uso de la aplicación *FieldMove Clino* (*Petroleum Experts*, 2013), la cual permite recopilar datos geológicos en el teléfono, debido a que utiliza el teléfono como una brújula de mano tradicional, así como una brújula-clinómetro digital para medir y registrar la orientación de planos y líneas en el campo (*Petroleum Experts*, 2021). Esta aplicación permite distinguir entre unidades y tipo de datos tomados (estratificación, plano de fracturas, plano de fallas, clivaje, ejes de pliegues, entre muchos otros datos), georreferenciar los datos para visualizarlos en un mapa, así como, agregar notas y fotos de lo visto en campo. También permite crear un estereograma de los datos tomados, además de permitir el exportar los datos para visualizarlos en otras plataformas como *Google Earth*.

En este trabajo se utilizó la función de la brújula-clinómetro para medir los planos de interés, solamente se colocó el teléfono sobre el plano y automáticamente se proporcionan los datos de dirección de inclinación e inclinación. El segundo paso consiste en guardar los datos en la unidad litológica correspondiente, si es necesario se agregaba alguna nota o foto.

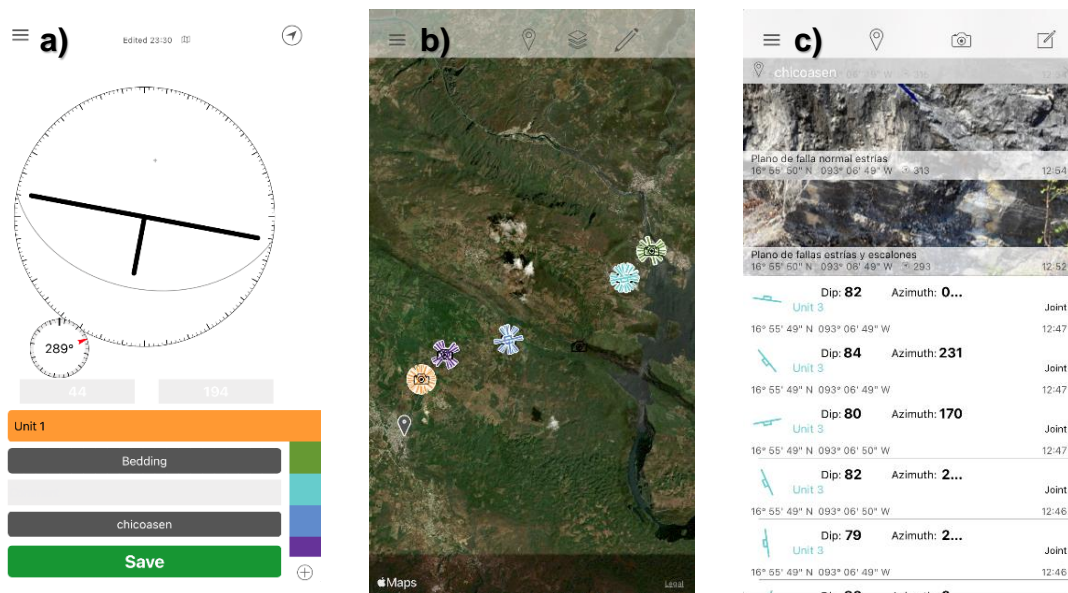


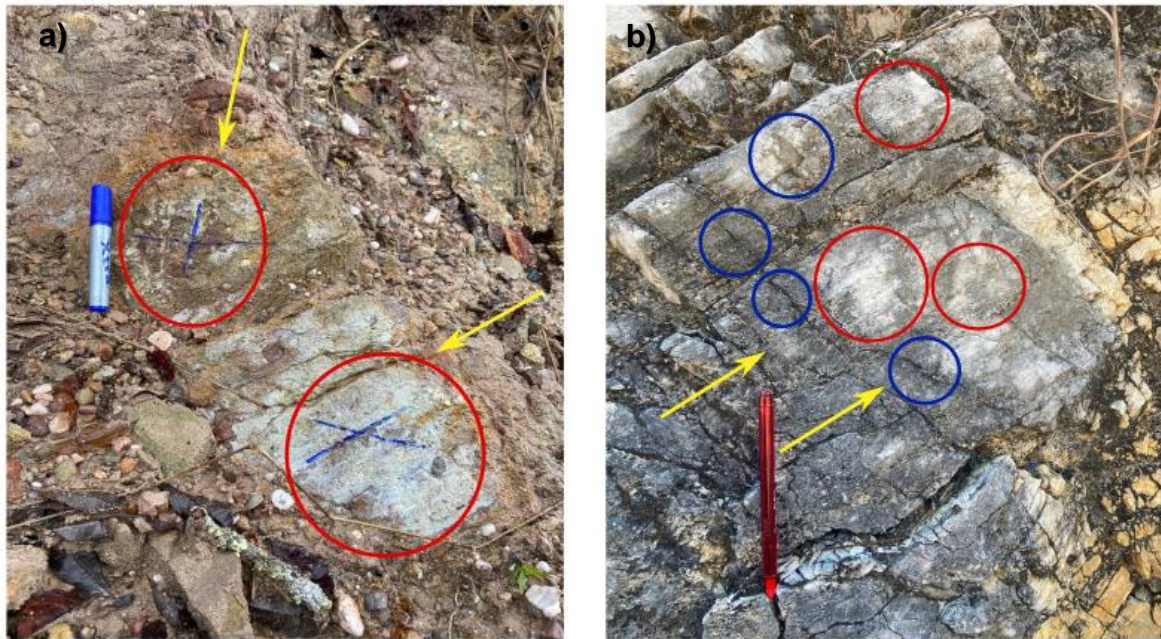
Figura 5.4. Vista de las diferentes funciones de la aplicación FieldMove Clino. a) Uso de la brújula-clinómetro para la toma de un dato de estratificación. b) Proyección de los datos tomados en un mapa georreferenciado. c) Base de datos estructurales y notas adicionales.

## b. Medición del *pitch* en las estrías

Para obtener el *pitch* primero se identificaron en los planos de las fallas, si estos contenían estrías, después con ayuda de un transportador y un marcador se procedió a medir el ángulo que se formaba entre las estrías y una línea horizontal. Este procedimiento se aplicó para cada plano de falla medido, obteniendo así tres datos (dirección de inclinación / inclinación y *pitch*).

### 5.1.3 Identificación de indicadores cinemáticos

Una vez identificados los planos de fallas se procedió a identificar los diferentes indicadores cinemáticos que contenían como lo fueron las estrías, escalones, y fracturas tipo Riedel. Posteriormente, con ayuda de la teoría y lo visto en campo, se pudo inferir la cinemática de las fallas observadas, siendo estas en su mayoría del tipo normal, lateral derecha y lateral izquierda.



*Figura 5.5. Indicadores cinemáticos identificados en planos de falla. En color rojo se señala las estrías, en color azul los escalones y las flechas amarillas indican el sentido del movimiento del bloque faltante. a) En la parte superior se tiene un plano de falla con cinemática normal, mientras que en la parte inferior se tiene un plano con cinemática lateral derecha. b) Plano de falla con cinemática lateral izquierda.*

## 5.2 Trabajo de gabinete

Se realizó la revisión bibliográfica sobre la estratigrafía, estructuras y tectónica del sureste de México, con especial interés en las áreas de Felipe Ángeles, Veracruz y Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Así mismo, se realizaron lecturas para comprender los conceptos fundamentales asociados a este trabajo y las técnicas utilizadas para obtener los datos de interés en campo. A la par de la realización del trabajo de campo se realizaron mapas geológicos y de lineamientos de las zonas de estudio, se identificaron lineamientos estructurales a partir de mapas topográficos, se hicieron secciones geológicas con lo observado en campo y se procesaron los datos para crear rosetas de fracturas y mecanismos focales (pelotas de playas).

### 5.2.1 Identificación de lineamientos estructurales

En esta etapa se utilizaron los mapas topográficos escala 1:50 000 pertenecientes al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con clave E15C37 (2017), E15D61 (2017), E15D51 (2017), E15C59 (2016) y E15C69 (2017). Se identificaron mediante los mapas topográficos fallas laterales, fallas normales, ejes de pliegues y fracturas. Para la

obtención de la cinemática y los tipos de fracturas se hizo uso de un esquema Riedel donde se proyectaron diferentes lineamientos asociados con la falla principal (cinemática lateral izquierda). Los datos obtenidos a partir del análisis de lineamientos se utilizaron para crear mecanismos focales de las fallas observadas a escala kilométrica.

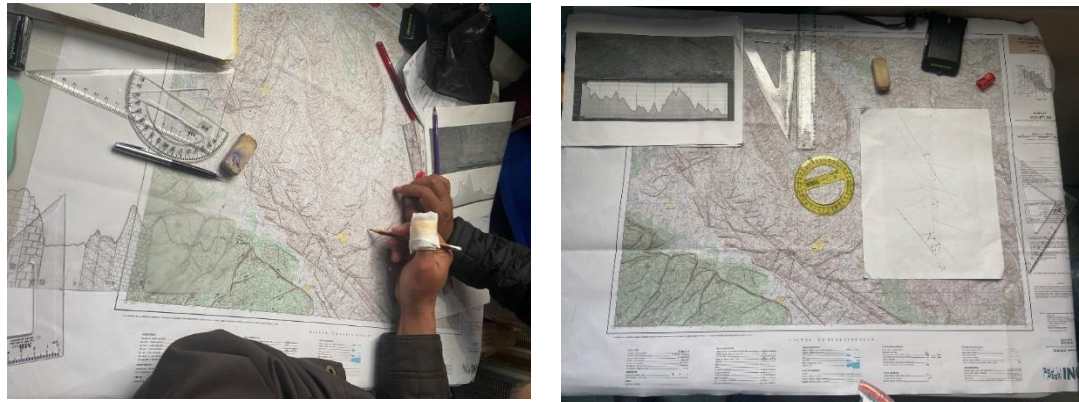


Figura 5.6. Trazado de lineamientos estructurales en mapa topográfico escala 1:50 000.

### 5.2.2 Creación de mapas geológicos-estructurales

Se realizaron dos mapas mediante la digitalización de una porción de las cartas Geológico-Minera Villahermosa E15-8 (2005) y Tuxtla Gutiérrez E15-11 (2005) pertenecientes al Servicio Geológico Mexicano (SGM). La digitalización de los mapas se realizó mediante el Sistema de Información Geográfica de software libre y de código abierto Qgis 3.10.5 (2020), donde se digitalizaron aspectos como la geología, ciudades, localidades y cuerpos de agua principalmente. Además de estos aspectos, también se plasmaron en los mapas los lineamientos estructurales marcados en las cartas topográficas (ver Anexos IV y V). Así mismo, se realizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) para cada mapa creado a partir de curvas de nivel, esto con la finalidad de obtener un mapa de sombras (*hillshade*).

### 5.2.3 Creación de secciones geológicas

Se elaboraron cuatro secciones geológico-estructurales, dos pertenecientes al sector norte de la falla Tuxtla-Malpasó (Secciones AA' y DD') y dos al sector central de la falla (Secciones BB' y CC'). Para la creación de las secciones geológicas fue indispensable conocer la estratigrafía y las estructuras que se encuentran en la zona de estudio, tomando en cuenta las observaciones realizadas en campo. La realización de las

secciones inicia con la obtención de un perfil de elevación mediante *Google Earth* (Google, 2001) donde se plasman las estructuras y estratigrafía correspondiente, tanto las observadas en los mapas topográficos como en las cartas geológicas e incluye lo visto en campo. La digitalización de estas secciones se hizo en el software *Inkscape* (Harrington *et al.*, 2021). A través de estas secciones se pudo interpretar la geometría y la disposición de las formaciones, así como, las estructuras tanto en la zona de falla como en sus cercanías.

#### **5.2.4 Procesado de datos estructurales**

Los mecanismos focales se obtuvieron mediante el *software Faultkin* (Marrett y Allmendinger, 1990; y Allmendinger *et al.*, 2012) en donde se ingresaron uno por uno los datos de planos de falla y la cinemática correspondiente. Posteriormente, se proyectan los datos en una red estereográfica y se invierten en el software para obtener el mecanismo focal. Finalmente, estos mecanismos fueron interpretados según su cinemática.

Con el fin de determinar la dirección predominante de las fracturas se realizaron rosetas de fracturas por cada estación medida. La roseta de fracturas es un diagrama en el que se puede representar la orientación preferencial de los rumbos de las estructuras, como lo son las fallas y las fracturas. Las rosetas se realizaron con ayuda del programa *GEOrient* (Holcombe, 2015), para lo cual se organizaron los datos de dirección de inclinación e inclinación medidos en los planos de fracturas en una tabla (hoja de cálculo en Excel) con dos columnas para cada estación. Posteriormente, se cargaron los datos en el programa y se generaron las rosetas para cada estación. Se realizaron diecisiete rosetas de fracturas, de las cuales once corresponden al transecto de la carretera Tuxtla Gutiérrez–San Cristóbal de las Casas, y cinco al transecto de la autopista de Tuxtla Gutiérrez–Chicoasén, finalmente en la cascada “El Chorreadero” solo se realizó una roseta. Subsecuente a esto, se analizaron las rosetas y se elaboraron diagramas en los que se identificaron los tipos de fracturas presentes en el área de estudio, teniendo en cuenta cada uno de los aspectos vistos en el campo como las fracturas medidas, la cinemática de las fallas presentes, la presencia de brechas y las relaciones de corte, así como del modelo de Riedel, con el objetivo de obtener más información sobre la falla principal.

Adicionalmente se obtuvo, un diagrama de polos para los datos de estratificación. El diagrama de polos se obtuvo a través del *software Stereonet 11* (Allmendinger, 2020), donde se ingresó la base de datos de los planos de estratificación.

Para el análisis de la longitud de las fallas, se elaboró un gráfico de longitud de fallas vs frecuencia acumulada, haciendo uso de los dos mapas de lineamientos realizados, donde se midió la longitud de las fallas trazadas y se obtuvo la frecuencia acumulada de la longitud. Una vez graficados los datos se obtuvo un ajuste de potencia y el valor de la pendiente de estos datos. Este gráfico fue de gran ayuda para comprender la relación entre la falla principal y la longitud de las fallas secundarias. Finalmente, se analizaron todos los resultados obtenidos y se compararon para comprender la cinemática de la falla principal y la relación que tienen las estructuras que se encuentran en la zona de falla y en sus alrededores, y de esta forma proponer una historia de deformación de la falla Tuxtla-Malpaso.

## Capítulo 6. Resultados

### 6.1 Estructuras a escala kilométrica

#### 6.1.1 Zona norte de la falla Tuxtla-Malpaso (Área de Felipe Ángeles)

##### ➤ Mapa de lineamientos geomorfológicos

La Figura 6.1 muestra la distribución de los lineamientos trazados en la zona norte de la falla Tuxtla-Malpaso, en la que se aprecia una mayor cantidad de lineamientos en la región sur del mapa en comparación con lo que se observa en la región norte, teniendo alrededor de 34 lineamientos en la región norte, mientras que en el sur se tienen 57 lineamientos. En la región sur de la falla Tuxtla-Malpaso se identificaron lineamientos que pertenecen a fallas con cinemática lateral izquierda y derecha, fallas normales y fracturas. Mientras que en la región norte se observa el trazo del eje de un pliegue, fallas con cinemática derecha e izquierda, así como fracturas. En la parte central del mapa, los lineamientos se encuentran en grupos, especialmente en la región suroeste del mapa, donde se observan varios lineamientos con una dirección NE-SW, mientras que en la región norte los lineamientos se ven un tanto más aislados.

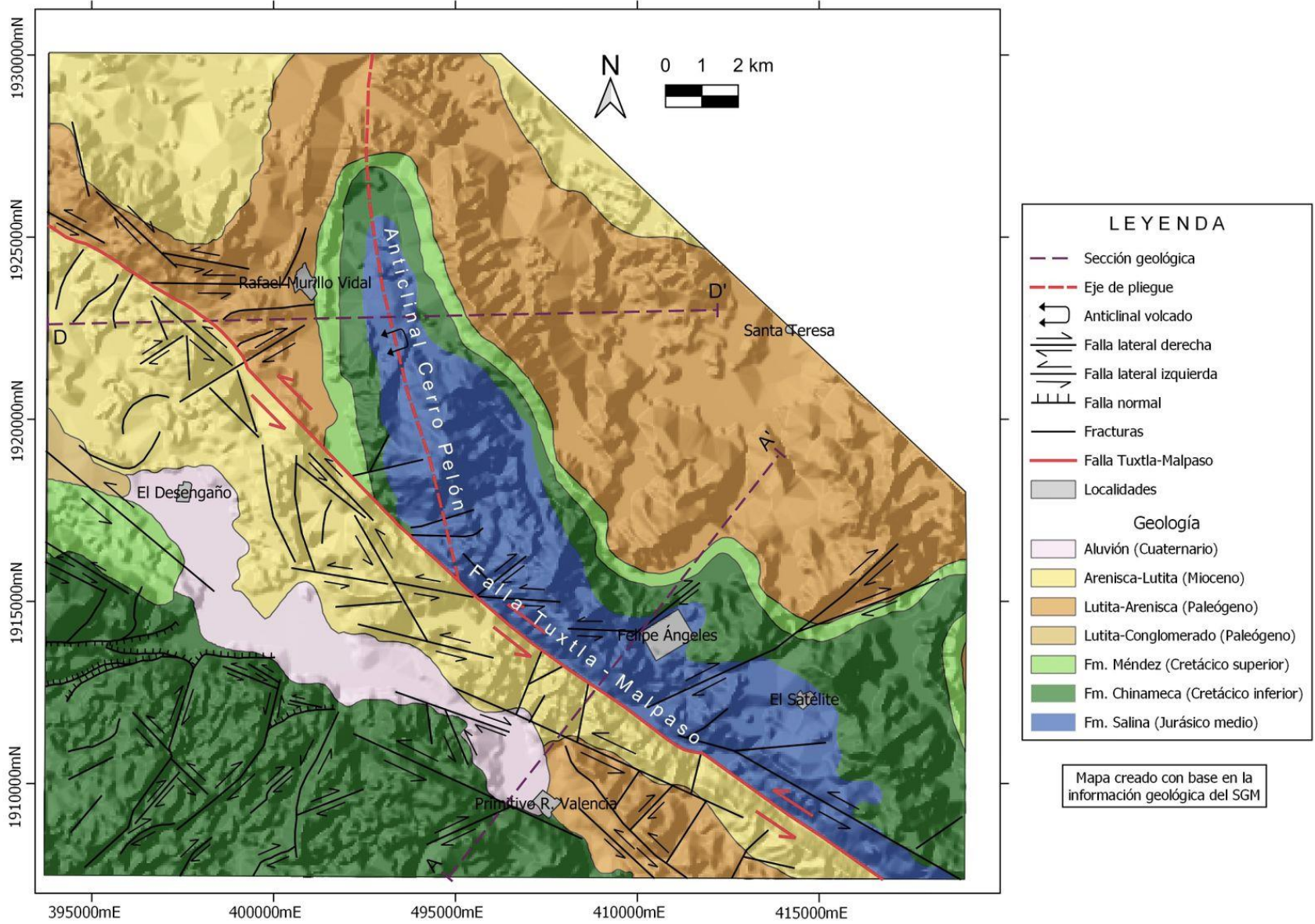


Figura 6.1. Mapa de lineamientos geomorfológicos de la zona norte de la falla Tuxtla-Malpaso, perteneciente al área de Felipe Ángeles, Veracruz.

### ➤ Estructuras mayores (fallas)

Se realizó una sección geológica denominada sección AA' (Figura 6.2) que se encuentra perpendicular al rumbo de la falla principal (Tuxtla-Malpaso) en las inmediaciones de Felipe Ángeles, donde se distinguen las estructuras mayores que se encuentran en el área, así como, las formaciones que están cortadas por estas. La estructura principal es la falla Tuxtla-Malpaso con cinemática lateral izquierda y rumbo N55°W, que corta a las formaciones Salina y Chinameca. Las estructuras asociadas a esta falla presentan una cinemática lateral izquierda y lateral derecha. Las fallas con cinemática lateral izquierda tienen una dirección NW-SE y se encuentran cortando a la formación Salina y a calizas de plataforma. Mientras que las fallas con cinemática lateral derecha presentan una dirección NE-SW y están cortando a la caliza de la plataforma y a las formaciones Salina, Chinameca y Méndez, cerca del poblado de Felipe Ángeles.

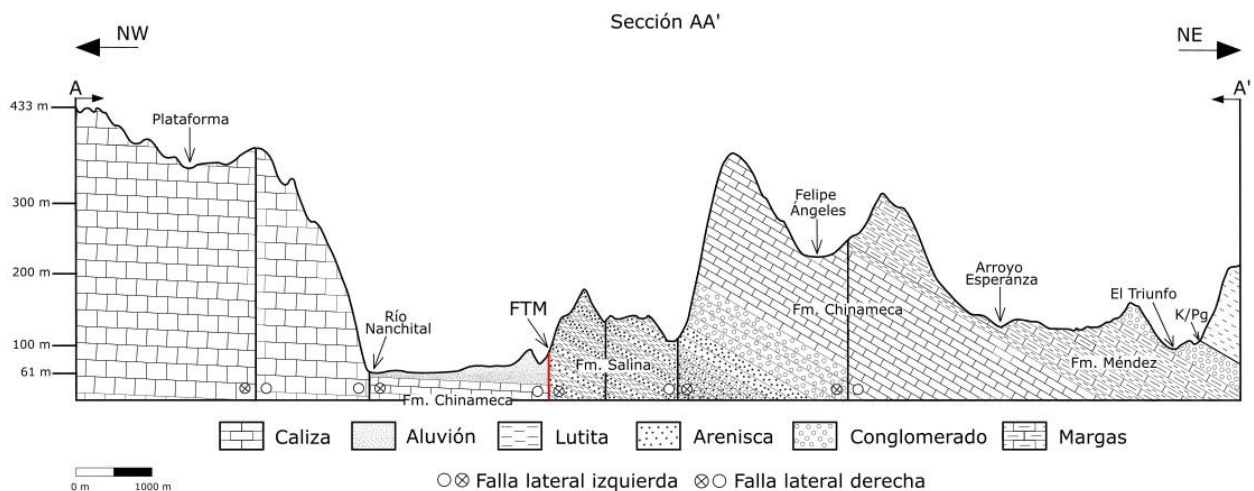


Figura 6.2. Sección geológica AA' ubicada en las cercanías de Felipe Ángeles, Veracruz. FTM; Falla Tuxtla-Malpaso, K/Pg; contacto Cretácico-Paleógeno. Exageración vertical: 7x.

### ➤ Cinemática de las fallas

En la Figura 6.3 se muestra el mecanismo focal de un conjunto de datos de fallas que se obtuvieron a partir de los lineamientos marcados en el mapa geomorfológico. El mecanismo focal obtenido en primera instancia se asocia a una falla vertical que experimenta un movimiento horizontal. Se ha establecido como el plano de falla al correspondiente a la dirección NW-SE, mientras que el plano auxiliar tiene una tendencia NE-SW. La dirección del plano de falla corresponde al rumbo N45°W el cual es muy

similar al rumbo de la falla Tuxtla-Malpaso. El mecanismo focal obtenido está asociado a una cinemática lateral izquierda, al igual que la falla principal (Tuxtla-Malpaso).

De igual manera, la Figura 6.3 muestra el diagrama de roseta con las direcciones principales de las fracturas del área de estudio correspondiente a Felipe Ángeles, cuyo rumbo preferente es perpendicular al rumbo de la falla principal. Es decir, tiene una tendencia NE-SW y un rumbo N45-55°E, en una proporción menor se observan direcciones hacia el N-S, E-W, NNE-SSW y NW-SE, esta última concordante con la dirección de la falla principal (Tuxtla-Malpaso). Los conjuntos de datos secundarios presentan rumbos N25-35°E, NE80-90°SW y N45-55°W.

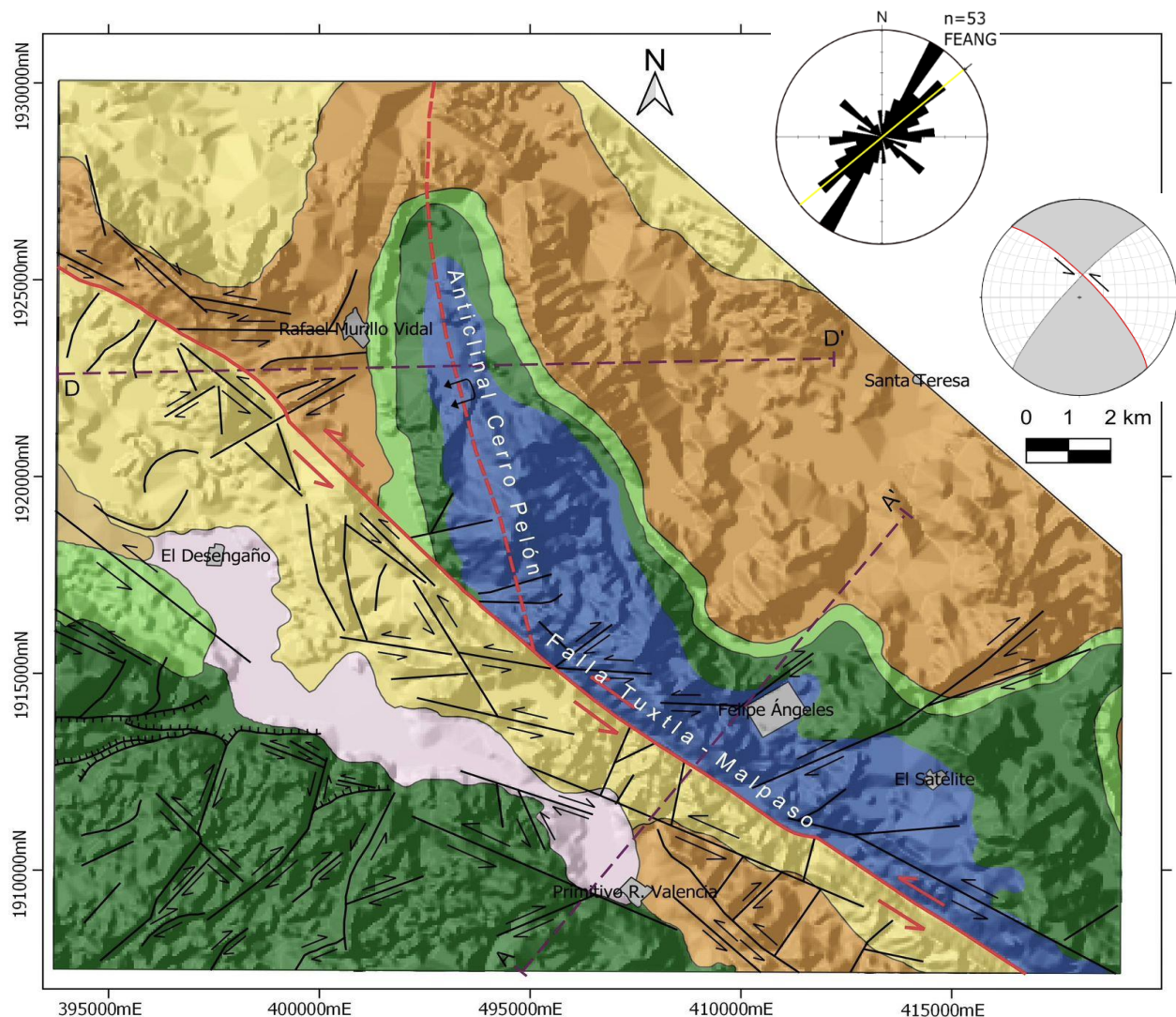


Figura 6.3. Roseta de fracturas y mecanismo focal obtenidos a partir de los lineamientos geomorfológicos de la zona norte de la falla Tuxtla-Malpaso. En el mecanismo focal el plano de falla está resaltado con color rojo. La línea amarilla en la roseta de fracturas indica la orientación preferencial de las fracturas. FEANG; Felipe Ángeles, n; número de muestras.

### **6.1.2 Zona centro de la falla Tuxtla-Malpasó (Área de Tuxtla Gutiérrez)**

Los resultados para la zona de estudio situada en el centro de la falla Tuxtla Malpasó se dividieron en dos regiones. La primera región corresponde a la zona ubicada en el norte de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, abarcando el Cañón del Sumidero y con dirección al municipio de Chicoasén. La segunda región se ubica en la parte sureste con dirección al municipio de San Cristóbal de las Casas. Se obtuvieron tanto secciones geológicas como rosetas de fracturas y mecanismos focales para cada región.

#### **➤ Mapa de lineamientos geomorfológicos**

##### **Región norte**

La cantidad de lineamientos que se pueden apreciar en la Figura 6.4 en el sector norte del mapa se puede dividir en los que se encuentran en la parte norte de la falla principal y los que se encuentran en la zona sur. La parte norte presenta una mayor cantidad de lineamientos correspondientes a fallas laterales derechas e izquierdas, normales, inversas, fracturas y el eje de un pliegue. Las tendencias que se registran para estos datos son NW-SE y NE-SW. Por otro lado, en la zona sur se aprecia una cantidad mucho menor de lineamientos, aunque la orientación de estos es similar a la que se encuentra en la zona norte. Se puede apreciar en la parte norte que los lineamientos se encuentran en grupos formados por fallas normales y con cinemática lateral derecha e izquierda.

##### **Región sureste**

En la parte oriental del mapa (ver Figura 6.6) se observan lineamientos similares a los de la zona norte, con trazas pertenecientes a fallas normales, laterales izquierdas, laterales derechas y fracturas. Algunos de estos lineamientos presentan una tendencia NW-SE y son paralelos a la falla principal. Igualmente, se pueden encontrar lineamientos con dirección NE-SW. El número de lineamientos que se trazaron en la parte norte de la falla Tuxtla-Malpasó es mayor que la que se observa en la parte sur. En la parte norte se encuentran aproximadamente 90 lineamientos, mientras que en la parte sur se encuentran aproximadamente 50 lineamientos. En esta parte se podría decir que los lineamientos trazados se encuentran en grupos, especialmente los que se encuentran en las cercanías de la traza de la falla Tuxtla-Malpasó.

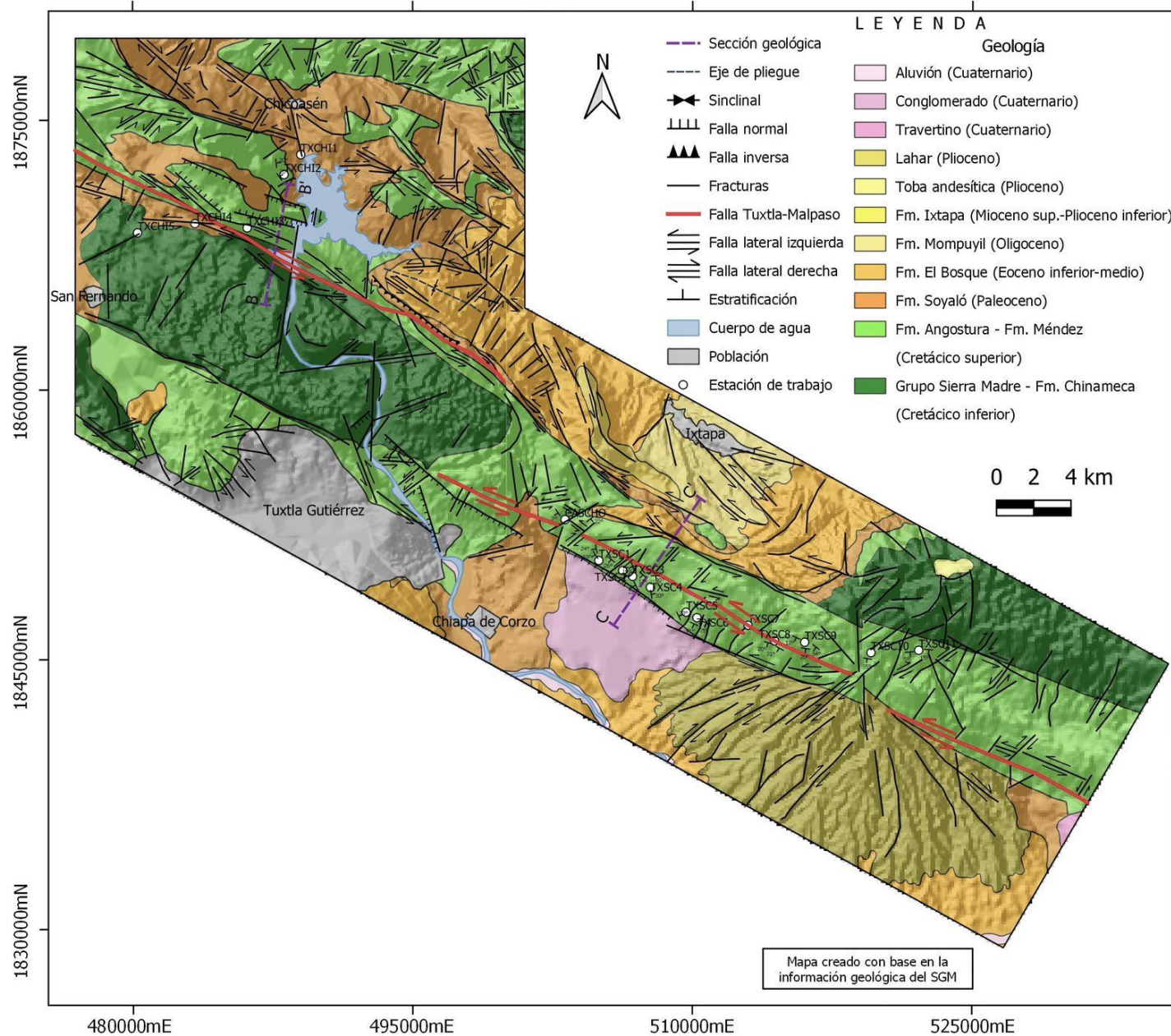


Figura 6.4. Mapa de lineamientos geomorfológicos de la zona centro de la falla Tuxtla-Malpaso en el área de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Estaciones de trabajo: TXSC; Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las casas, TXCHI; Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén, CASCHO; Cascada El Chorreadero.

## ➤ Estructuras mayores (fallas)

### Región norte

La sección obtenida en esta zona se denomina sección BB' (Figura 6.5) y se encuentra en las inmediaciones del Cañón del Sumidero. En esta sección se puede apreciar la traza de la falla Tuxtla-Malpaso, la cual es la estructura principal que acomoda la deformación en esta zona. La falla principal Tuxtla-Malpaso en esta región presenta una cinemática lateral izquierda y un rumbo  $N64^{\circ}W$ , además tiene una longitud de 22 kilómetros y está cortando al Grupo Sierra Madre y a la Formación Angostura, respectivamente. Además, se pueden apreciar estructuras secundarias como fallas con cinemática lateral izquierda y normal que, al igual que la falla principal, controlan la geometría del área circundante. En la sección BB' se aprecian dos fallas laterales izquierdas paralelas a la falla principal; la primera está situada al noroeste de la traza de la falla Tuxtla-Malpaso y tiene un rumbo  $N57^{\circ}W$ , mientras que la segunda está situada al noreste de la falla principal, y tiene una dirección NW-SE y un rumbo  $N65^{\circ}W$ . Por su parte, las fallas normales que se observan en el noreste de la sección generan una geometría correspondiente a un graben, debido a la dirección, rumbo y buzamiento que presentan. El rumbo de estas fallas es de  $N77^{\circ}W$  y  $N79^{\circ}W$ , las cuales están cortando las Formaciones Angostura y Soyalo.

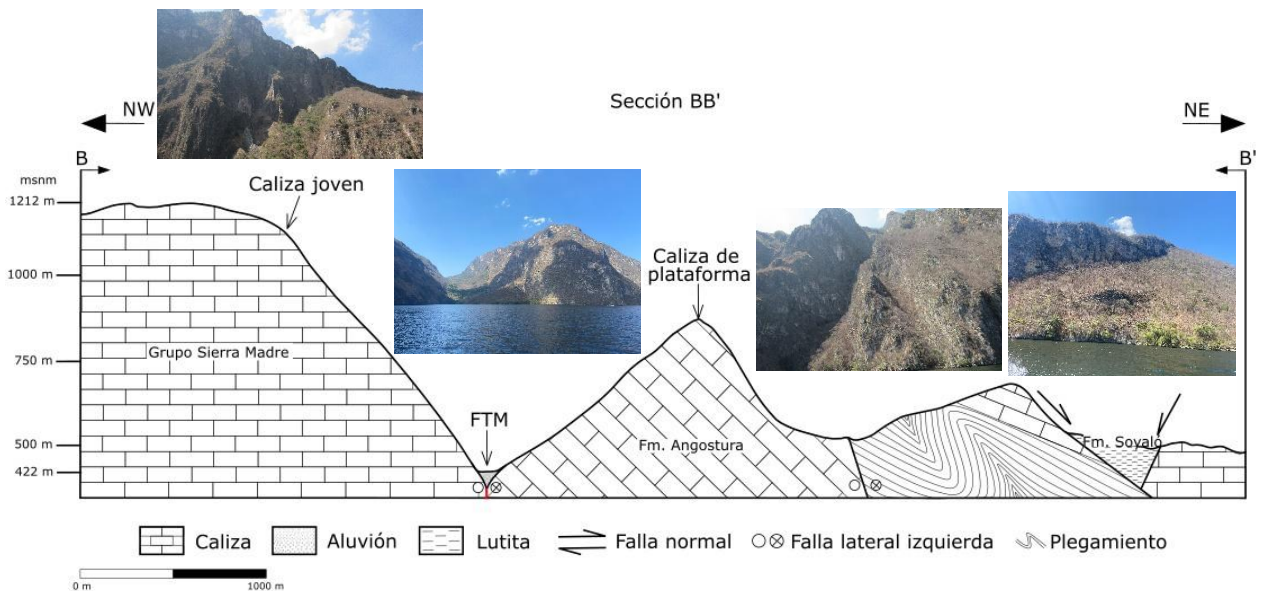


Figura 6.5. Secci3n geol3gica BB' ubicada en el Cañ3n del Sumidero, Tuxtla Guti3rrez, Chiapas. Esta secci3n se elabora mediante fotograf3as tomadas en el 3rea. FTM; Falla Tuxtla-Malpaso. Exageraci3n vertical: 3x.

## Región sureste

En esta región se elaboró la sección CC', la cual se encuentra situada de forma perpendicular a la dirección de la falla Tuxtla-Malpaso, que se encuentra en el tramo entre Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de las Casas. Al igual que en las otras secciones se tiene a la falla principal con una dirección NW-SE y con un rumbo  $N62^{\circ}W$ . En esta región la falla tiene una longitud aproximada de 39 kilómetros. Las estructuras secundarias que se encuentran en esta sección, corresponden a una falla normal y fallas con cinemática lateral izquierda; estas estructuras están dispuestas de forma paralela a la falla principal.

La falla normal que se muestra en la Figura 6.6 presenta un rumbo de  $N56^{\circ}W$ , mientras que las fallas que se ubican en el noreste de la sección corresponden a una cinemática lateral izquierda y tienen un rumbo de  $N54^{\circ}W$  y  $N63^{\circ}W$ . Estas estructuras secundarias tienen una dirección y rumbo similar al de la Falla Tuxtla-Malpaso. Las rocas que se encuentran cortadas por las diversas fallas en esta sección pertenecen a las formaciones Ixtapa, Soyaló, El Bosque, Angostura y sedimentos del Cuaternario. Cabe señalar, que el cambio en la orientación de las calizas en los bloques ubicados al noreste de la sección se debe a la presencia de un sinclinal.

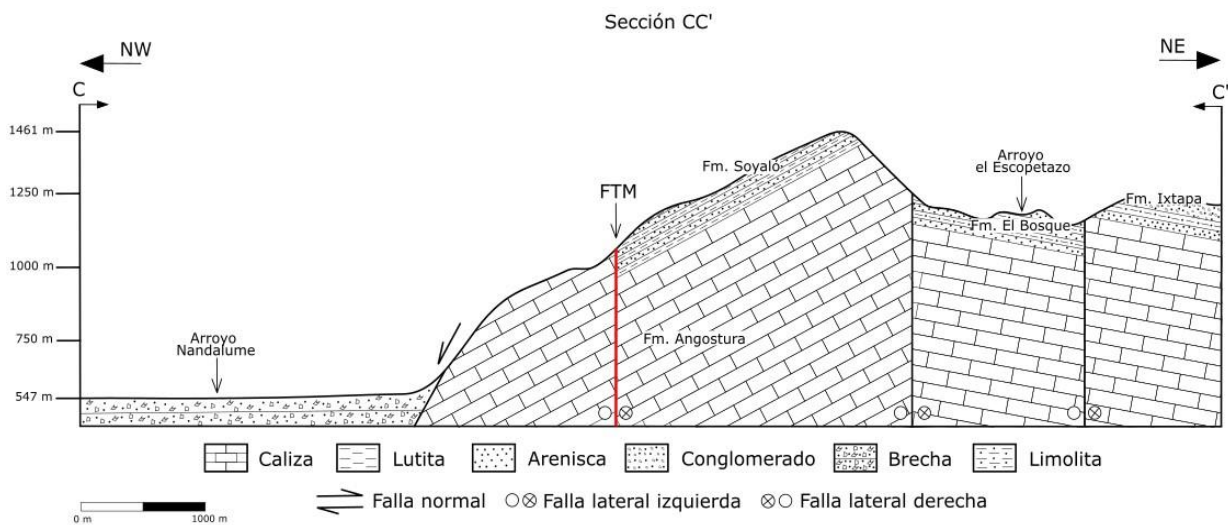


Figura 6.6. Sección geológica CC' ubicada en las inmediaciones de la carretera, Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas. FTM; Falla Tuxtla-Malpaso. Exageración vertical: 2x.

## ➤ **Cinemática de las fallas**

### **Región norte**

La Figura 6.7 muestra el mecanismo focal correspondiente a la región norte, que muestra la distribución preferencial de las principales fallas que se trazaron en el mapa en la zona norte de Tuxtla Gutiérrez. Este mecanismo focal indica que en la zona norte se produce un movimiento horizontal, donde la posición de los planos indica la dirección de deslizamiento para una falla con cinemática lateral izquierda. De acuerdo al dato geológico-estructural de rumbo  $N64^{\circ}W$  de la falla principal en esta zona, se asume que el plano de falla en el mecanismo focal es el plano que presenta una tendencia  $N58^{\circ}W$ , debido a la similitud con la falla principal (Tuxtla-Malpaso). Por lo tanto, el plano auxiliar es aquel que le corresponde un rumbo  $N32^{\circ}E$ .

Así también, la Figura 6.7 muestra la roseta de fracturas con las direcciones preferenciales de las fracturas que se encuentran en la zona norte del mapa. En primer lugar, la roseta de fracturas presenta una dirección principal NNE-SSW y un rumbo aproximado  $N17-35^{\circ}E$ . Este rumbo y dirección difieren de los pertenecientes a la falla principal, sin embargo, esta orientación concuerda con algunos trazos de fracturas extensionales y fallas con cinemática lateral derecha. Así mismo, se observan direcciones secundarias, las cuales tienen una tendencia N-S, NE-SW, E-W, NNW-SSE y NW-SE. Algunos de los rumbos preferenciales que presentan estos conjuntos de datos son  $N0-10^{\circ}E$ ,  $N45-55^{\circ}E$ ,  $N80-90^{\circ}E$ ,  $N10-25^{\circ}W$ ,  $N30-55^{\circ}W$ , este último es similar al rumbo que le corresponde a la falla Tuxtla-Malpaso.

### **Región sureste**

Se realizó también un mecanismo focal para el conjunto de datos del mapa de la zona Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas, en la cual también se identificó el plano de falla y el plano auxiliar (consultar la Figura 6.7). De acuerdo al rumbo  $N62^{\circ}W$  perteneciente a la falla principal en esta zona, al mecanismo focal se le asoció el plano de falla que tiene una tendencia  $N56^{\circ}W$ , mientras que el plano auxiliar es el plano cuyo rumbo es  $N34^{\circ}W$ . Al igual que en el caso anterior, se trata de una falla vertical con desplazamiento horizontal. La posición de los planos indica que el movimiento que gobierna a las estructuras en esta zona es una falla con cinemática lateral izquierda.

La roseta de fracturas de la Figura 6.7, obtenida a partir de los lineamientos marcados en la zona oriental de Tuxtla Gutiérrez, muestra una dirección principal NNE-SSW. El conjunto de datos presentan un rumbo N25-35°E, similar al de algunas fracturas extensionales que se observaron en la zona de estudio. Las direcciones secundarias que se observan en el diagrama presentan una tendencia preferencial N-S, NE-SW y NNW-SSE. Algunos de los rumbos que se pueden apreciar en el diagrama de roseta de fracturas son N0-15°E, N45-55°E y N10-20°W.

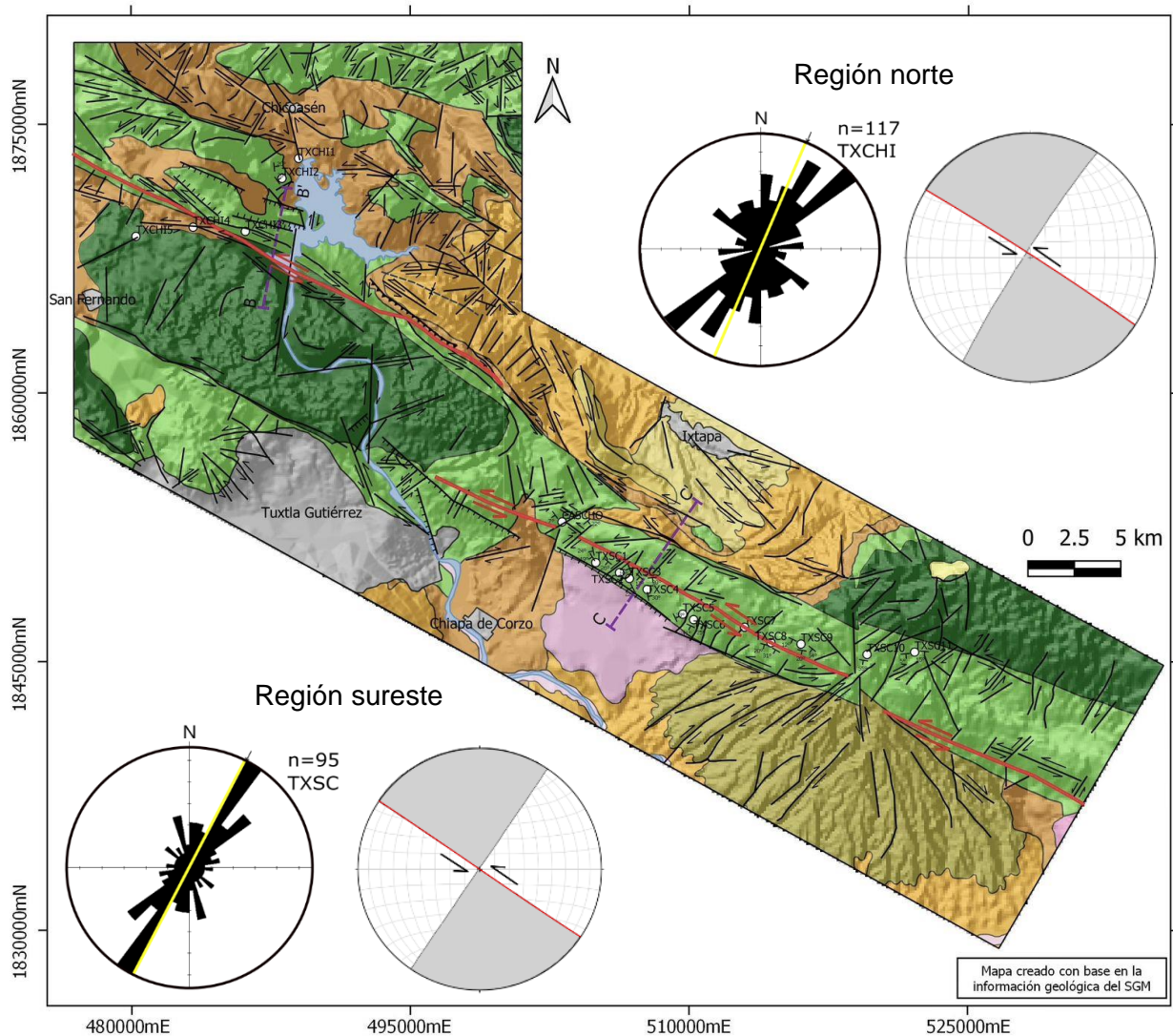


Figura 6.7. Rosetas de fracturas y mecanismos focales obtenidos a partir de los lineamientos geomorfológicos de la zona centro de la falla Tuxtla-Malpaso. En el mecanismo focal el plano de falla está resaltado con color rojo. La línea amarilla en la roseta de fracturas indica la orientación preferencial de las fracturas. TXCHI; Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén, TXSC; Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas, n; número de muestras.

## 6.2 Estructuras a escala mesoscópica

Este apartado presentará los resultados de campo en los dos transectos realizados en las inmediaciones de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. En los cuales se evaluaron datos estructurales, tales como planos de estratificación, fracturas y fallas.

### 6.2.1 Datos de estratificación

Los datos de estratificación se midieron en algunas de las estaciones de trabajo de los diferentes transectos realizados, en el transecto Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén solo se midieron datos en una de las cinco estaciones de trabajo debido a que la mayoría de las rocas estaban fracturadas o eran masivas, lo que dificultaba su medición. Las capas que se pudieron apreciar, tienen un espesor comprendido entre 20 y 70 centímetros. Por su parte, en el transecto de Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas se midieron los planos de estratificación en la mayoría de las estaciones de trabajo, así como, en la estación que se encuentra en la Cascada El Chorreadero. Los espesores de las capas que se hallaron en dichas estaciones varían desde los 10 centímetros hasta los 1.5 metros de espesor.

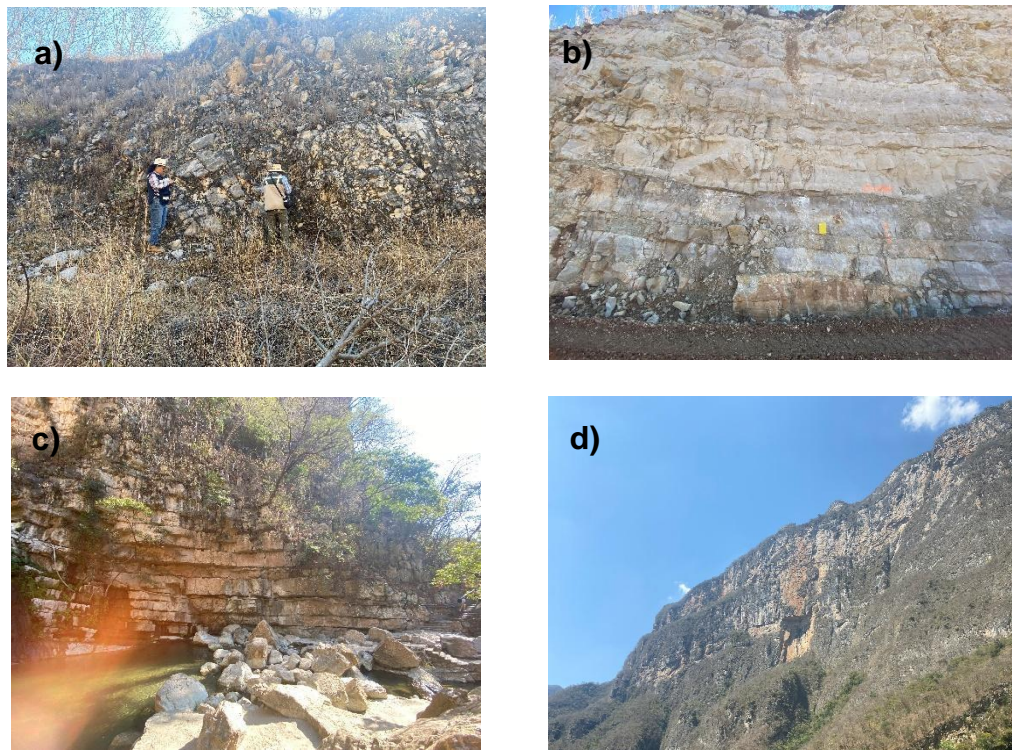
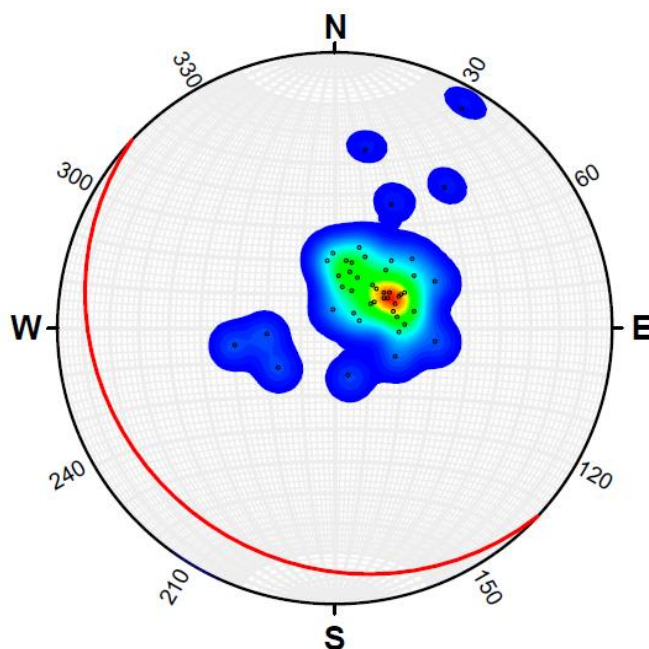


Figura 6.8. Estratificación de capas de caliza en la zona de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. a) Caliza masiva, no se distingue la estratificación, solo las fracturas. b) Estratificación mediana a gruesa de capas de caliza en la carretera Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas. c) Estratificación observada en la Cascada El Chorreadero. d) Estratificación observada en el Cañón del sumidero, se observan capas de gran espesor.

La Figura 6.9 presenta el resultado de la medición de todos los planos de estratificación. Como se aprecia en el diagrama de polos, la mayoría de los datos se sitúan en la parte central de la red estereográfica, lo que indica que la orientación de los datos es muy similar, es decir, no hay mucha variación en los datos de estratificación que se tomaron. Según la convención de la mano derecha, este conjunto de datos tiene una orientación promedio de  $134^{\circ}/17^{\circ}$ , aunque, también se tiene datos que presentan una tendencia E-W, pero son mínimos, ya que la mayoría de los datos presentan una dirección preferencial NW-SE.

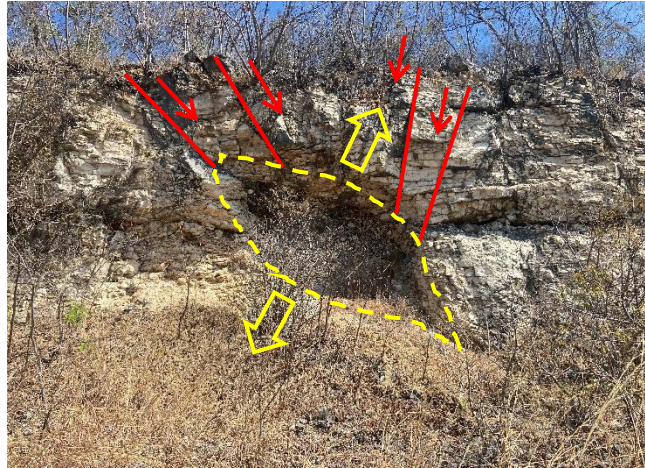


*Figura 6.9. Diagrama de polos de los planos de estratificación de la zona de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Se observa la tendencia de los datos de estratificación y la orientación promedio de los datos mediante el plano resaltado en color rojo.*

### **6.2.2 Fracturas geológicas en el área de estudio**

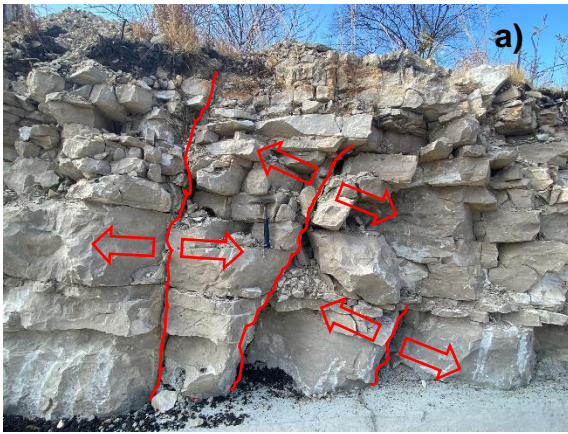
En las diferentes estaciones de trabajo del área circundante a Tuxtla Gutiérrez se observaron fracturas. Las fracturas más habituales en esta zona son del tipo extensionales (fracturas T) y de cizalla (fracturas R, R' y P). La cantidad de fracturas y fallas secundarias que se encuentran en la zona de estudio depende de que tan cerca se encuentre la estación de trabajo de la falla principal, es decir, cuanto más cerca se encuentre la estación del trazo de la falla principal se puede observar una mayor cantidad de fracturas o fallas en comparación de las estaciones más lejanas. Esto permite sugerir

la presencia de una zona de falla, que se encuentra gobernada por la geometría y disposición de las fracturas que se observan.



*Figura 6.10. Foto tomada en el transecto Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas, donde se observa una fractura extensional rellena por brecha de falla (amarillo) y planos de fallas normales (rojo). Las flechas rojas indican el sentido del movimiento del bloque.*

La mayor cantidad de fracturas encontradas a lo largo de los dos transectos recorridos son fracturas extensionales, las cuales se encuentran de forma cuasi-perpendicular a la falla principal y van desde un milímetro de apertura hasta decenas de centímetros. En general, estas fracturas se pueden encontrar abiertas o rellenas. En este caso, se encontraron principalmente rellenas de material arcilloso, así como también se observaron fracturas rellenas de calcita en una menor proporción y brecha de falla, especialmente en el transecto de Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas (ver Figura 6.11), donde también se hallaron estilolitas en una estación en particular. También se observaron fracturas que presentan algún grado de disolución debido a los diferentes procesos que han experimentado las rocas a lo largo del tiempo. Los datos de fracturas del transecto Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas presentan un rumbo preferencial NE-SW, aunque también se encontraron fracturas con rumbo NW-SE y E-W. Por su parte, las fracturas analizadas en el transecto Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén siguen dos tendencias preferenciales: NE-SW y NW-SE.



*Figura 6.11. Fracturas extensionales observadas en la zona de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, con dirección N. a) Fracturas abiertas. b) Fracturas rellenas de arcilla. c) Fracturas rellenas de brecha de falla. Las líneas rojas delimitan las paredes de las fracturas, las flechas rojas indican el sentido de apertura. d) Fracturas rellenas de calcita y presencia de fósiles, en amarillos se resaltan las vetillas de calcita y la materia orgánica.*

Además, las fracturas en sus planos presentan estrías, escalones y crecimiento mineral en dirección al movimiento de estas fracturas (consultar la Figura 6.12). Las fallas secundarias tienen una cinemática lateral izquierda, lateral derecha y normal (Figura 6.13). Estas fallas se pueden observar a lo largo de los dos transectos realizados. Las direcciones de las fallas presentan una tendencia N-S, NE-SW, E-W y NW-SE, esta última concordante con la de la falla principal. Es importante señalar que se hallaron casos en los que se interceptan dos planos de estrías sobre los mismos planos, lo que indica la presencia de reactivación de fallas y, en consecuencia, de dos eventos de deformación (ver Figura 6.14).

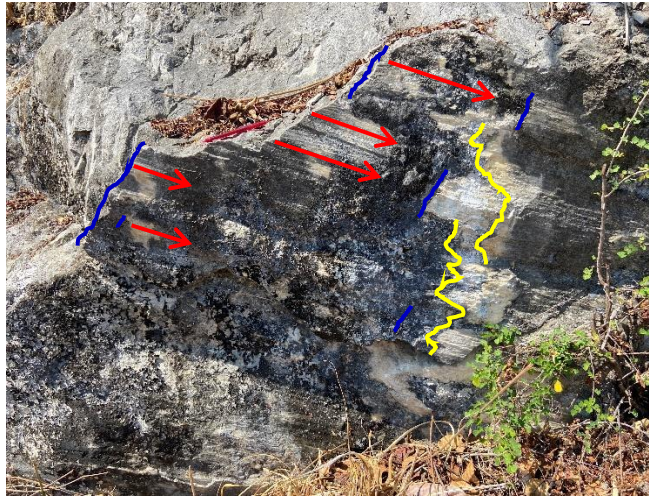


Figura 6.12. Plano de falla e indicadores cinemáticos observados en campo. Falla joven con cinemática lateral izquierda, con presencia de escalones (azul), estrías (rojo) donde las flechas rojas indican la dirección de estas y crecimiento mineral (amarillo).

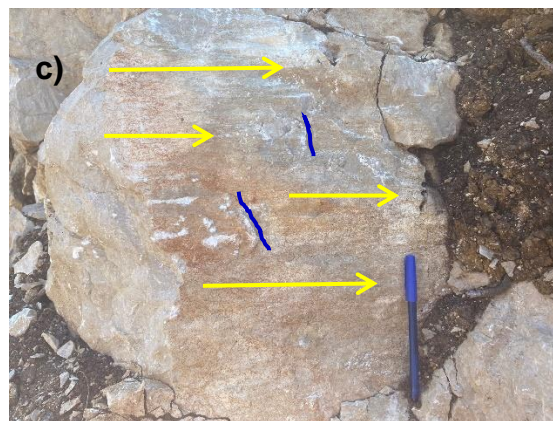
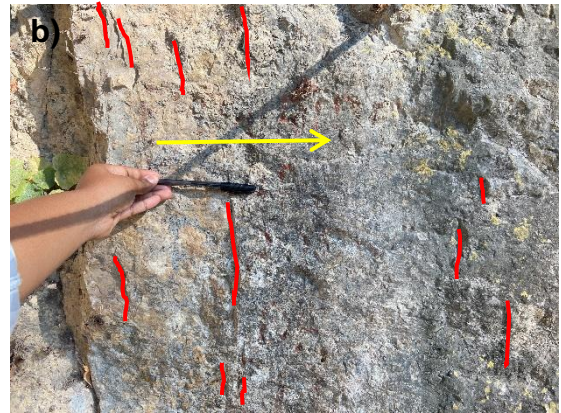
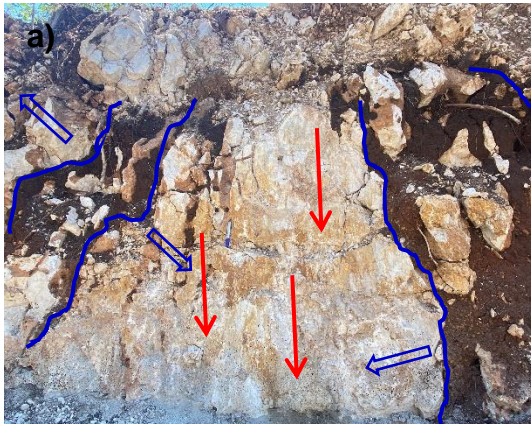


Figura 6.13. Planos de fallas observadas en campo. a) Plano de falla correspondiente a una falla normal, el bloque que falta es el que cae (en rojo se señala el sentido del movimiento), también se observan fracturas extensionales rellenas de arcillas (azul). b) Plano de falla con cinemática lateral izquierda ubicada en la Cascada El Chorreadero, como indicador cinemático se observan escalones los cuales están resaltados en rojo y en amarillo se señala el sentido de movimiento del bloque faltante. c) Plano de falla con cinemática lateral derecha, se pueden observar escalones (azul) y estrías, las flechas amarillas indican la dirección de las estrías.

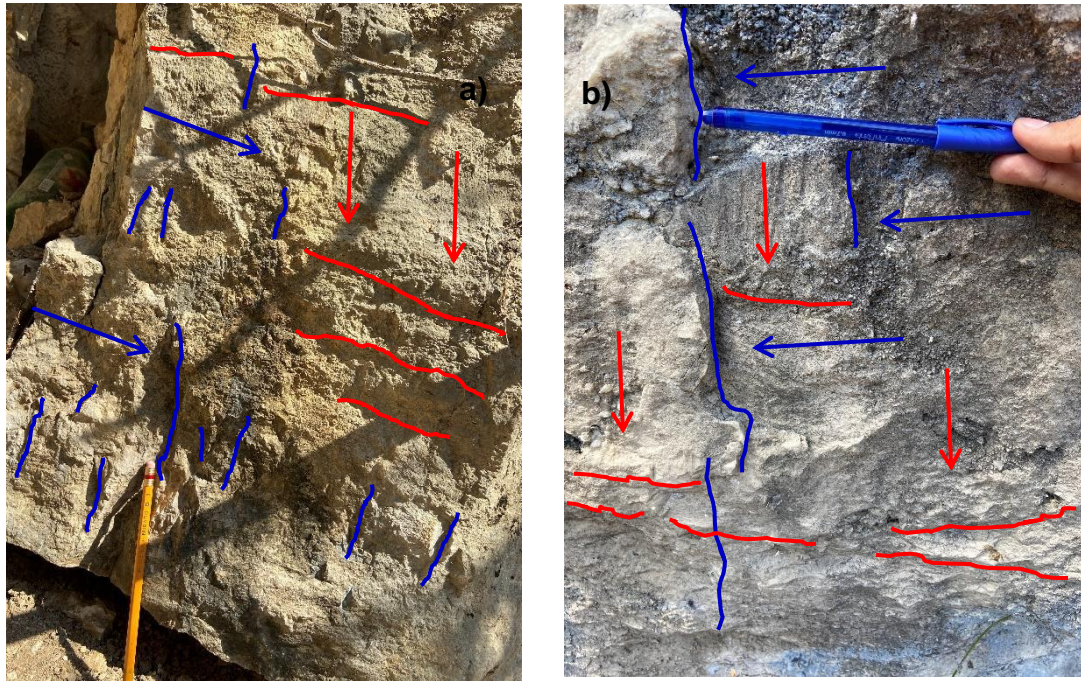


Figura 6.14. Planos de falla donde se observa la intersección de dos planos de estrias. a) Plano con escalones donde se interceptan los planos de una falla normal (escalones remarcados de color rojo) y una falla lateral izquierda (escalones marcados con color azul). b) Plano de falla con escalones como indicadores cinemáticos que indican la presencia de una falla normal (escalones rojos) y falla lateral derecha (escalones azules). Las flechas indican el sentido de movimiento de los bloques.

### 6.2.3 Orientación de las fracturas geológicas

Los resultados presentados a continuación son los obtenidos a partir del procesamiento de los datos de planos de fracturas y fallas medidos en las diferentes estaciones de trabajo. Por lo tanto, para el transecto Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén se presentan cinco diagramas de roseta de fracturas y dos mecanismos focales. Mientras que para el transecto Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas se obtuvieron once diagramas de rosetas para las estaciones ubicadas sobre la carretera Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas y un diagrama para la estación ubicada en la cascada El Chorreadero. Al igual que en el primer transecto, también se obtuvieron dos mecanismos focales para este.

## ➤ Roseta de fracturas

### **Transecto Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén**

Los diagramas de rosetas obtenidos en este transecto se pueden apreciar en la Figura 6.15, donde se muestran las direcciones preferenciales de las fracturas para cada estación medida en la zona de estudio. Las fracturas medidas en el transecto Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén presentan una orientación preferencial hacia el NW-SE y NE-SW. Las estaciones TXCHI3 y TXCHI5 tienen una orientación preferencial al NE-SW y tienen un rumbo N31°E y N56°E respectivamente, concordante con algunas fallas secundarias que se pueden apreciar. De igual manera, se aprecia un segundo conjunto de datos en la estación TXCHI5, el cual presenta un rumbo general NW-SE, mientras que en la estación TXCHI3 se encuentran datos con una tendencia N-S y E-W, similar a algunas fallas que se encontraron en la zona. Las fracturas de las estaciones TXCHI1 y TXCHI2 tienen una orientación NW-SE similar a la de la falla Tuxtla-Malpaso. La estación TXCHI1 presenta una tendencia preferencial N60-80°W y una secundaria con dirección N17-27°E. En la estación TXCHI2 se observan dos rumbos preferenciales, los cuales son N10-20°W y N80-90°W. Finalmente, la estación TXCHI4 presenta datos de fracturas, que tienen un rumbo N25-35°W y N0-10°W, este último con una inclinación casi vertical. Asimismo, se presentan fracturas con una tendencia E-W, pero en una proporción menor (Figura 6.15).

### **Transecto Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas**

Los datos estructurales de fracturas que se tomaron en el transecto Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas muestran una orientación preferencial NE-SW, que corresponden principalmente a fracturas extensionales. Por su parte, en los diagramas de rosetas muestran dos tendencias principales de orientación de las fracturas, una NW-SE y otra NE-SW. Las estaciones TXSC8 y CASCHO comparten una misma dirección NW-SE, con una orientación preferencial cercana a N45-55°W y N70-90°W respectivamente, muy similares a la orientación de la falla principal y a fallas con cinemática lateral izquierda que se encuentran en esta zona. En la estación TXSC8 se encuentran datos con direcciones NE-SW, mientras que en la estación CASCHO se encuentran dos conjuntos de fracturas secundarios con direcciones NE-SW y una dirección N-S con inclinación casi

vertical. La mayoría de las direcciones secundarias presentan la misma dirección que las fracturas extensionales NE-SW.

Por otro lado, las estaciones TXSC2, TXSC3, TXSC5, TXSC6, TXSC7, TXSC9 y TXSC10 comparten una dirección preferencial NE-SW, que se ajusta a la dirección de la mayoría de las estructuras que se encuentran en la zona de estudio. Las estaciones TXSC2 y TXSC3 tienen datos con rumbos muy similares de  $N44-67^{\circ}E$  y  $N40-80^{\circ}E$  respectivamente. La estación TXSC2 tiene un segundo conjunto de datos con una tendencia NW-SE y E-W. Por otro lado, la estación TXSC5 registra una orientación preferencial  $N45-55^{\circ}E$  y  $N70-90^{\circ}E$ , así como un conjunto secundario de datos con dirección NW-SE. Las estaciones TXSC6 y TXSC7, además de compartir una dirección preferencial similar, tienen rumbos cercanos de  $N0-35^{\circ}E$ ,  $N45-55^{\circ}E$  y  $N80-90^{\circ}E$  en cada una, así como un segundo conjunto de datos orientados a NW-SE. En la estación TXSC9, se tienen familias de fracturas cuyos rumbos principales son  $N17-35^{\circ}E$ ,  $N45-65^{\circ}E$ . Asimismo, se registraron algunas fracturas con una dirección casi N-S. Por otro lado, las fracturas de la estación TXSC10 presentan una orientación preferencial  $N15-40^{\circ}E$  y  $N70-90^{\circ}E$ . Además, esta estación tiene una dirección secundaria que se puede observar en la roseta de fracturas en la dirección NW-SE.

Las estaciones TXSC1 y TXSC4 tienen la particularidad de que presentan dos direcciones preferenciales NE-SW y NW-SE. En la estación TXSC1 se encuentran dos familias de fracturas, las cuales tienen un rumbo  $N30-45^{\circ}W$  y  $N70-90^{\circ}E$  respectivamente, además de presentar direcciones secundarias, correspondientes a un conjunto de datos con rumbo  $N25-45^{\circ}E$ . Para la estación TXSC4 también se tiene dos conjuntos de datos con un rumbo  $N35-70^{\circ}E$  y  $N60-90^{\circ}W$ . Por último, la estación TXSC11 presenta fracturas con una dirección preferencial N-S, así como subconjuntos de fracturas orientadas al NE-SW.

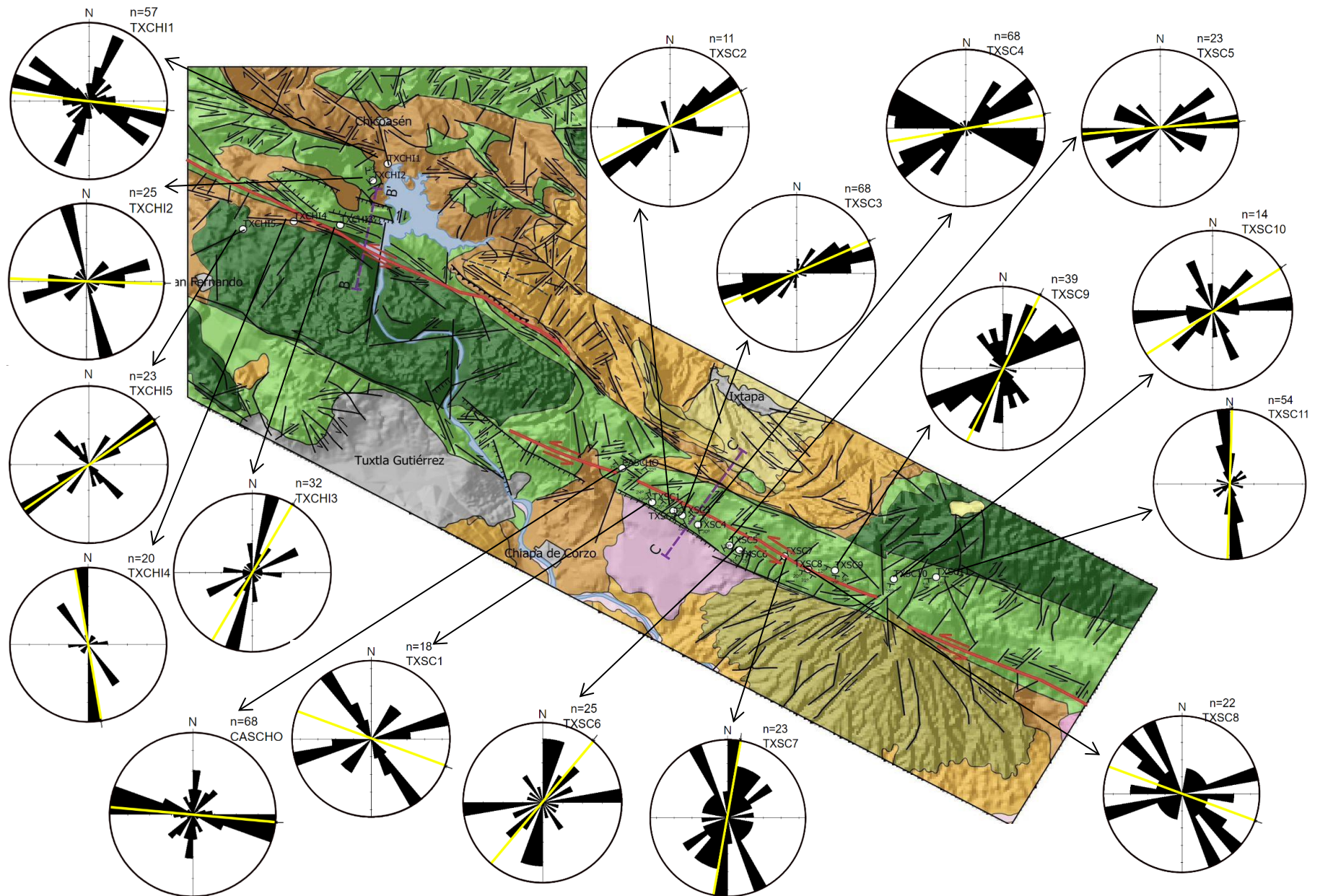


Figura 6.15. Rosetas de fracturas obtenidas mediante el software GEOrient, para las diferentes estaciones de los transectos Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas y Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén. En las rosetas se resalta en color amarillo la dirección predominante de las fracturas. Estaciones de trabajo: TXSC; Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas, TXCHI; Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén, CASCHO; Cascada El Chorreadero.

## ➤ Mecanismos focales

### **Transecto Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén**

En el trabajo de campo se observó que sobre los mismos planos se interceptaban dos conjuntos de estrías, con lo cual se obtuvieron dos mecanismos focales para esta zona, correspondientes a cada conjunto de estrías. En el primer conjunto se consideraron las fallas con cinemática lateral derecha y normal, mientras que en el segundo conjunto se consideraron solo las fallas con cinemática lateral izquierda. Esta consideración se realizó debido a que las estrías de las fallas con cinemática lateral izquierda cortan a las estrías de las fallas laterales derechas. Dicha división relativa de la cinemática es apoyada por las estrías horizontales (lateral izquierda) que cortan a estrías sub-verticales ligadas a fallas normales con rumbo ~N-S.

Como se muestra en la Figura 6.16, el mecanismo focal obtenido para el primer conjunto de estrías corresponde a una falla vertical que experimenta un movimiento horizontal. La posición de los planos indica que se trata de una falla con cinemática lateral derecha, asumiendo el plano de falla como el plano que tiene una orientación NE-SW, cuyo rumbo es N12°E y tiene una inclinación de 40°. Por lo tanto, el plano auxiliar se encuentra perpendicularmente al plano de falla, y tiene un rumbo aproximado de N80°E y una inclinación de 72°.

El mecanismo focal obtenido para el segundo conjunto de estrías (ver Figura 6.16) representa una falla con cinemática lateral izquierda, en la que las flechas indican el sentido de desplazamiento de los bloques. El plano de falla tiene un rumbo N18°W y una inclinación de 59°, mientras que el plano auxiliar tiene una tendencia N75°E.

### **Transecto Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas**

En el transecto Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas también se observaron dos conjuntos de estrías. El primer conjunto está asociado con un mecanismo focal a una falla con cinemática lateral derecha, cuyo plano de falla tiene un rumbo N8°W, mientras que su plano auxiliar es el que se encuentra en el rumbo N86°E. Para el segundo conjunto de estrías se obtuvo un mecanismo focal que se asocia con una falla cuyo movimiento es horizontal. En este caso, el plano de falla es el plano N19°W, mientras que el plano

auxiliar es el perpendicular a este, y cuyo rumbo es N79°W. La cinemática asociada a este mecanismo focal es la correspondiente a una falla lateral izquierda. En ambos transectos realizados se distinguen una serie de estructuras frágiles que se pueden agrupar en dos eventos de deformación o de actividad de la falta Tuxtla-Malpaso. El primer evento está asociado con el conjunto de estrías que están relacionadas con un mecanismo focal de falla lateral derecha, mientras que el segundo evento se representa por el mecanismo focal de una falla lateral izquierda (Figura 6.16).

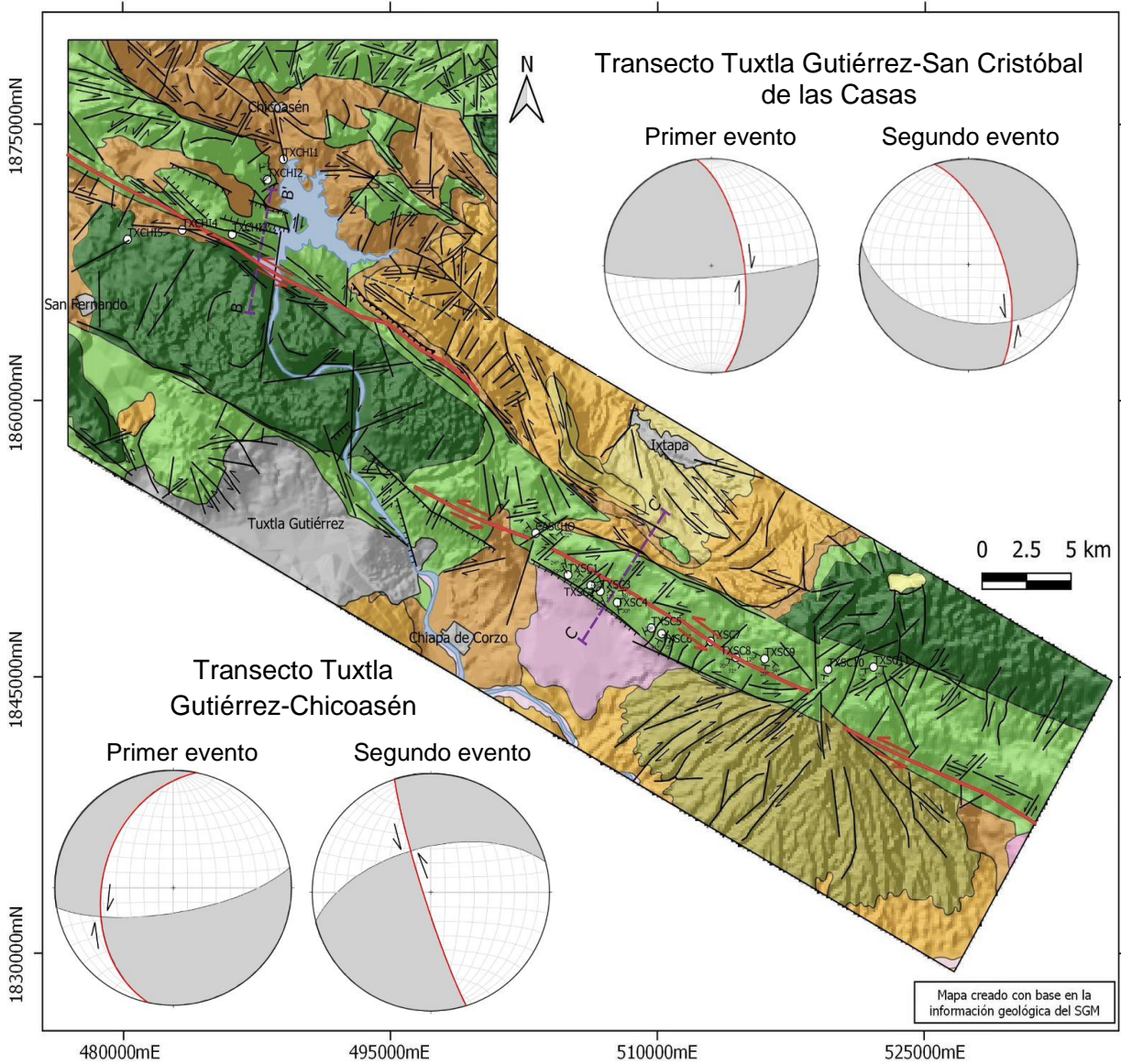


Figura 6.16. Mecanismos focales obtenidos para cada transecto (Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas y Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén). Se distingue entre dos eventos de deformación para cada transecto. En color rojo se resalta el plano de falla y las flechas indican la cinemática.

### **6.3 Relación frecuencia-tamaño de las estructuras en la zona de falla Tuxtla-Malpaso**

Los datos de longitud de falla se evalúan en un gráfico log-log como el de la Figura 6.17, donde se grafican los datos de longitud de falla vs frecuencia acumulada. Los datos presentados corresponden a datos de longitud de distintas fallas existentes en el mundo, en este gráfico se añadieron los dos datos de longitud obtenidos a partir de la medición de los lineamientos en las áreas de estudio, tanto los de la zona norte como los de la zona centro de la Falla Tuxtla-Malpaso.

Recientemente, muchos estudios han asociado que la distribución de la longitud de las fallas se rige por una ley de potencia (Cladouhos y Marrett, 1996). En la Figura 6.17 se puede observar la distribución de los datos obtenidos para cada caso, así como, el ajuste de potencia que se le corresponde a cada conjunto de datos, donde C corresponde a la pendiente de los datos (exponente de frecuencia acumulada).

Para el caso de la falla Tuxtla-Malpaso en la zona de Felipe Ángeles se tiene que  $C=2.58$ , mientras que para la zona de Tuxtla Gutiérrez  $C=3.14$ . Los valores de C para los datos de la falla Tuxtla-Malpaso son mayores a los que se observan en los otros casos, además los datos de longitud de las fallas registradas para los dos casos no superan los 10 kilómetros de largo. Se puede notar que existe un mayor número de fallas con longitudes pequeñas, esto se puede asociar con la edad de la falla y la cantidad de desplazamiento, debido a que se trata de una falla joven y las estructuras asociadas con una edad temprana de deformación tienden a ser pequeñas y aisladas con un desplazamiento pequeño (Cladouhos y Marrett, 1996).

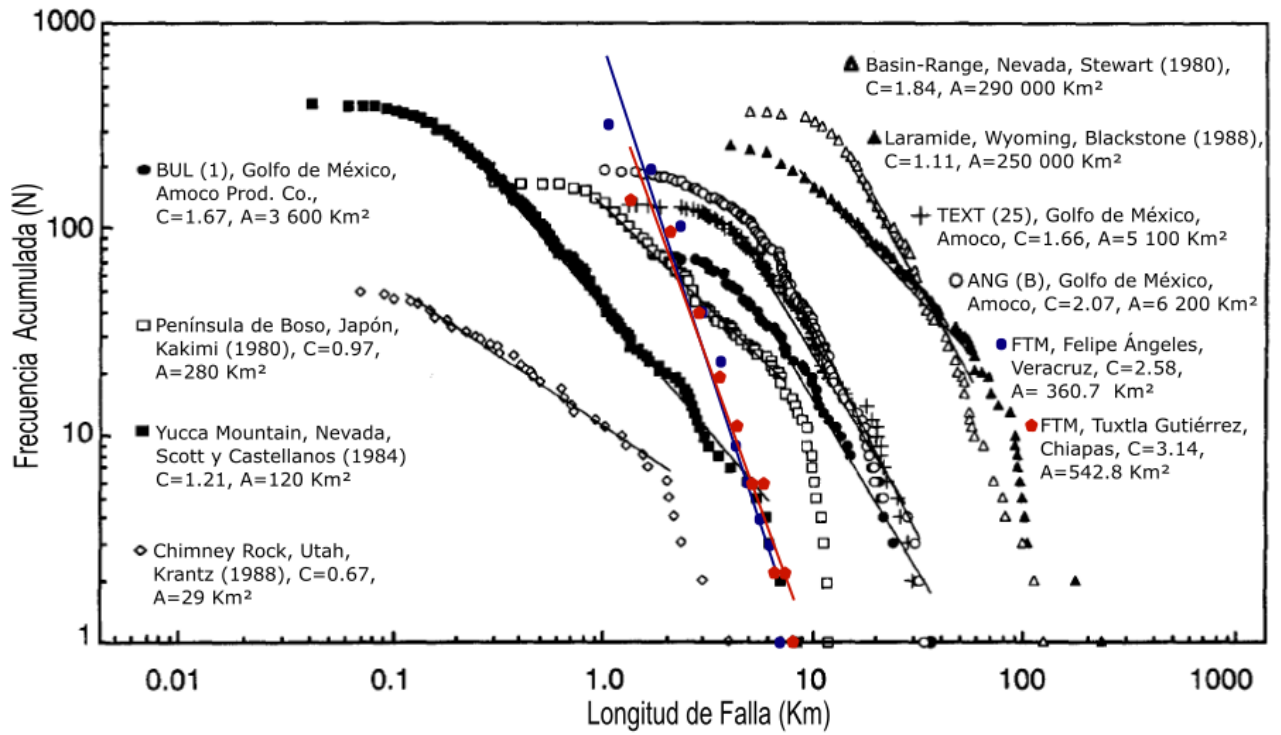


Figura 6.17. Gráfico log-log de longitud de falla vs frecuencia acumulada. Donde se presentan los datos de longitud de falla y su respectivo ajuste de potencia.  $C$ ; valor de la pendiente, FTM; Falla Tuxtla-Malpaso,  $A$ ; Área del mapa en kilómetros de donde se obtuvieron los datos. (Gráfico modificado de Cladouhos y Marrett, 1996)

## **Capítulo 7. Discusión**

En la actualidad, la falla Tuxtla-Malpaso es una falla transcurrente, activa y de cinemática lateral izquierda, con una longitud de aproximadamente de 200 kilómetros y un rumbo general de N55°W, que se encuentra en la Sierra de Chiapas y está relacionada con la provincia de fallas laterales (Sánchez-Montes de Oca, 1979; Witt *et al.*, 2012). Esta falla abarca desde la zona sureste del estado de Veracruz hasta las inmediaciones del poblado de Zaquentic, Chiapas. Su estudio es de gran interés debido a su gran longitud y a la zona en la que se encuentra, así como también a su compleja geometría.

### **7.1 Historia de deformación de la falla Tuxtla-Malpaso**

#### **7.1.1 Deformación de la falla Tuxtla-Malpaso**

De acuerdo con los resultados del presente trabajo y el análisis cinemático de las estructuras, así como de la evidencia encontrada en campo, como la presencia de dos conjuntos de estrías con diferentes orientaciones y la generación de dos familias de fracturas extensionales que se cortan unas a otras, permitió distinguir que la falla Tuxtla-Malpaso es producto de una reactivación, la cual tuvo lugar gracias a dos eventos de deformación uno con cinemática lateral derecha y otro con cinemática izquierda. Esta última cinemática se relaciona con el evento más reciente de acuerdo con las relaciones de corte de las estructuras.

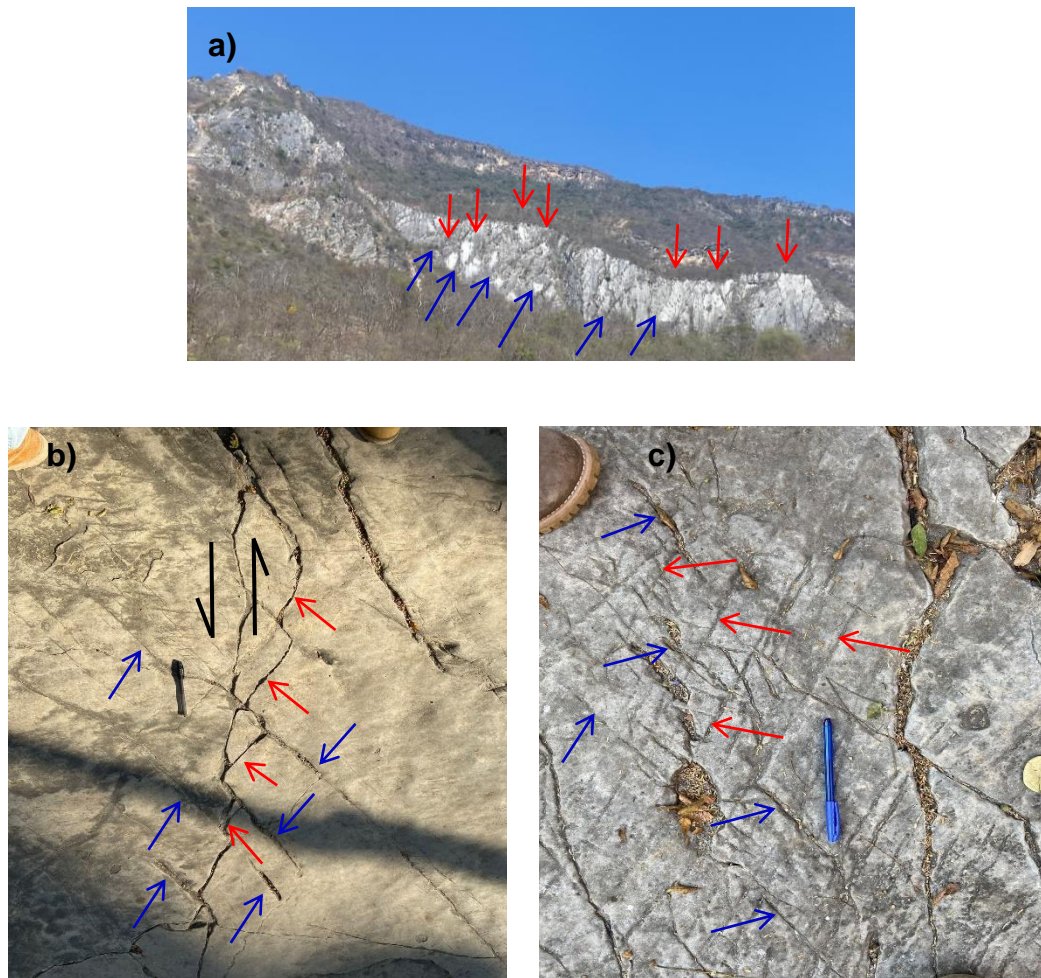


Figura 7.1. Evidencia encontrada en campo que indica la presencia de dos eventos de deformación, permitiendo así identificar la reactivación de la falla Tuxtla-Malpaso. a) Presencia de dos conjuntos de estrías superpuestas en el mismo plano de falla pero con diferente dirección. Las flechas azules indican las estrías con cinemática lateral izquierda, mientras que las flechas rojas indican las estrías con cinemática normal. Siendo la falla normal más antigua que la lateral izquierda. b) Representación a escala mesoscópica de los eventos de deformación que tuvieron lugar en la zona de estudio. Las flechas negras indican la cinemática de la falla principal, se aprecian fracturas extensionales, donde las pertenecientes a la cinemática izquierda (flechas rojas) se encuentran cortando a las de la cinemática derecha (flechas azules). c) Presencia de fracturas extensionales donde las fracturas más recientes son las generadas por cinemática izquierda (flechas rojas) y las más antiguas pertenecen a una cinemática derecha (flechas azules).

### ➤ **Primer evento de deformación**

Este primer evento generó principalmente fallas con cinemática lateral derecha, normales y fracturas extensionales de pequeña y gran escala, las cuales afectan regional y localmente a las unidades previas al Mioceno superior. Se calcula que este evento tuvo lugar a finales del Mioceno medio e inicios del Mioceno superior, el cual en la columna estratigráfica de la Figura 7.2 está marcado como una discordancia que separa el Mioceno medio del superior (Serrano-López, 2020). Este evento está conformado principalmente por fallas laterales derechas de orientación E-W, NE-SW, NW-SE y N-S y fallas normales de orientación NW-SE, N-S y NE-SW, así como de fracturas extensionales que tienen una orientación preferencial NE-SW y NW-SE, las cuales podrían corresponder a fallas normales. Mediante el análisis de estos datos a través del modelo de Riedel, se determinó que estas estructuras están relacionadas con una cinemática lateral derecha, lo cual es consistente con los resultados obtenidos mediante el mecanismo focal generado para el primer evento de deformación obtenido para el transecto Tuxtla Gutiérrez-Chicoasén, y para el obtenido para el transecto Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal de las Casas (consultar Figura 6.16). Según los resultados y análisis realizados, se determinó que el primer evento de deformación que causó la falla Tuxtla-Malpasso se debe a una cinemática lateral derecha, que tuvo lugar a principios del Mioceno superior, y que según el estudio realizado por Serrano-López (2020), este primer evento está relacionado con el desarrollo de la cuenca *pull-apart* de Ixtapa.

### ➤ **Segundo evento de deformación**

La reactivación de la falla Tuxtla-Malpasso produjo estructuras con cinemática lateral izquierda, cuya orientación preferencial es NW-SE, NE-SW y E-W, y fallas normales con tendencia E-W y NE-SW. Cabe señalar que la dirección de las fallas normales coincide con la dirección de fracturas T observadas en la zona de estudio a escala mesoscópica. Los indicadores cinemáticos, así como los planos de fallas, están cortando a las rocas del Mioceno superior, por lo que se estima que este evento ocurrió a finales del Mioceno superior y principios del Plioceno, el cual está marcado por una discordancia (Figura 7.2) (Serrano-López, 2020). Analizando los datos de planos de falla y fracturas mediante el modelo de Riedel, se determinó que la cinemática correspondiente a este evento es una cinemática lateral izquierda, la cual concuerda tanto con los mecanismos focales

obtenidos, así como con las aseveraciones realizadas por Sánchez-Montes de Oca (1997) y Meneses-Rocha (2001).

El evento de reactivación también se observa en la zona norte de la falla Tuxtla-Malpaso, donde el mecanismo focal muestra una cinemática lateral izquierda y un rumbo general NW-SE, además de que las fracturas y fallas encontradas según el modelo de Riedel coinciden con la cinemática lateral izquierda. En esta zona se encuentra el anticlinal Cerro Pelón (ver Figura 6.2), que es una estructura producto del acortamiento horizontal asociado con la actividad de la falla Tuxtla-Malpaso, y se encuentra cortando a las rocas del Mioceno superior.

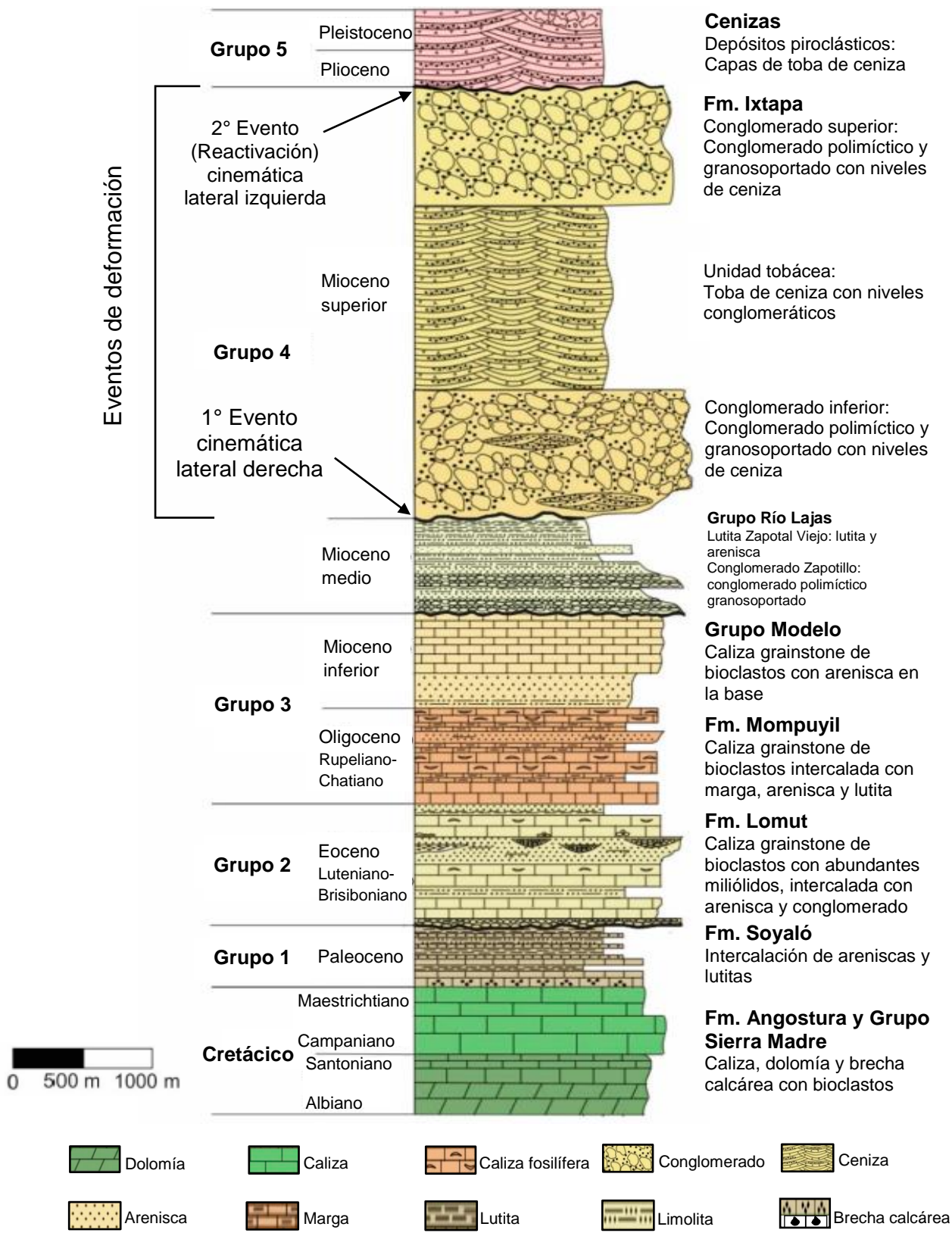


Figura 7.2. Columna estratigráfica de la cuenca de Ixtapa del Cretácico al Pleistoceno. A la derecha se indican las descripciones de la estratigrafía. En la izquierda se indican los eventos de deformación que dieron lugar a la falla Tuxtla-Malpasó. (Modificado de Serrano-López, 2020).

Se propone, en función de los resultados, que el segundo evento de deformación se debe a una falla con cinemática lateral izquierda, con dirección NW-SE, que se desarrolló a finales del Mioceno superior. La cual está relacionada en la zona norte con el desarrollo del anticlinal Cerro Pelón y en la zona centro con el cierre e inversión de la cuenca *pull-apart* de Ixtapa.

Debido a la evidencia encontrada en campo, se plantea que la falla Tuxtla-Malpaso es producto de una reactivación. Esta teoría también se puede fundamentar en el estudio realizado por Serrano-López (2020) en la cuenca *pull-apart* de Ixtapa, la cual es una estructura relacionada con las fallas Tuxtla-Malpaso y Chicoasén-San Cristóbal de las Casas. Serrano-López (2020) indica que la inversión de la cuenca tuvo lugar durante el Mioceno medio al superior, debido a la reactivación de las fallas anteriores, pero ahora con una cinemática lateral izquierda. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, en este trabajo se propone que toda la actividad de la falla Tuxtla-Malpaso se produce durante el Mioceno superior, donde el primer evento de deformación se produjo debido a una falla con cinemática lateral derecha con rumbo NE-SW y cuya actividad se produjo a comienzos del Mioceno superior. Posteriormente, debido a la reactivación de esta falla durante el Mioceno superior, se produjo un segundo evento correspondiente a una cinemática lateral izquierda, la cual es la causante de la actual geometría de la falla Tuxtla-Malpaso con dirección general NW-SE y rumbo N55°W, y cuya actividad continua hasta el presente.

Otro indicio que podría indicar que la falla Tuxtla-Malpaso es el resultado de una reactivación, está relacionado con el desplazamiento correspondiente a dicha falla. El desplazamiento de las fallas está en función de la longitud de estas, es decir, el desplazamiento debe ser proporcional a su longitud (Fossen, 2010). La falla Tuxtla-Malpaso tiene una longitud de aproximadamente 200 kilómetros, por lo cual se esperaría que el desplazamiento de esta en superficie fuera notable, pero no es así. Fossen (2010) señala que el desplazamiento máximo debe estar cercano a la mitad de la longitud de las fallas, siendo que para fallas con longitudes de 200 kilómetros el desplazamiento máximo esperado es de 10 kilómetros, sin embargo, para la falla Tuxtla-Malpaso no se aprecia dicho desplazamiento. La explicación de este suceso puede deberse a que, al ser una

reactivación, el desplazamiento que acomodo esta falla solo corresponde al segundo evento de deformación.

### 7.1.2 Desplazamiento de la falla Tuxtla-Malpaso

#### ➤ Cálculo del acortamiento en el anticlinal Cerro Pelón

Para determinar el desplazamiento que ha experimentado la falla Tuxtla-Malpaso en su evento más reciente (Mioceno superior), se utilizó el anticlinal Cerro Pelón, el cual se formó mediante un acortamiento horizontal debido a la reactivación de falla Tuxtla-Malpaso con cinemática lateral izquierda, por ende, al obtener la cantidad de deformación que se necesitó para acortar las rocas y formar el pliegue es posible calcular el desplazamiento mínimo horizontal de la falla. Se realizó una sección perpendicular al eje del anticlinal (figura 6.3) para determinar la deformación que causó la falla Tuxtla-Malpaso para generar el anticlinal Cerro Pelón.

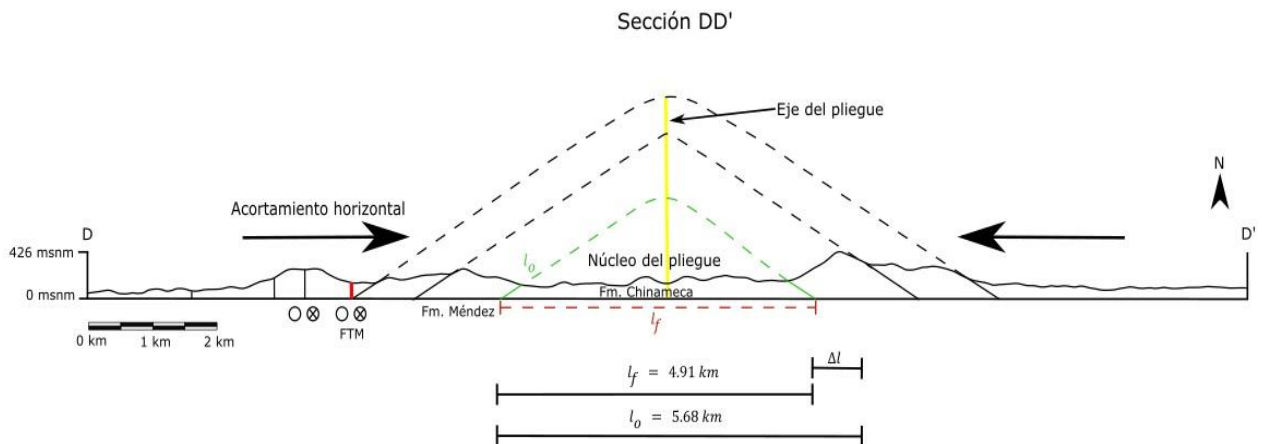


Figura 7.3. Sección DD', reconstrucción del anticlinal Cerro Pelón, ubicado en la zona norte de la falla Tuxtla-Malpaso para la determinación de la deformación y acortamiento. FTM; Falla Tuxtla-Malpaso,  $l_0$ ; elongación inicial de la capa,  $l_f$ ; elongación final de la capa,  $\Delta l$ ; desplazamiento, Fm. Méndez; Formación Méndez, Fm. Chinameca; Formación Chinameca.

La estimación de la deformación utiliza el concepto de elongación (ecuación 1), mientras que para la obtención del acortamiento se utiliza la diferencia que hay entre la longitud inicial y la longitud final de una capa plegada para determinar el acortamiento de las capas de roca a través de la ecuación 2.

Tabla 2. Cálculo de la deformación y acortamiento.

Deformación	Acortamiento
$e = \frac{l_f - l_o}{l_o} \quad (\text{ec. 1})$ $= \frac{4.91 \text{ km} - 5.68 \text{ km}}{5.68 \text{ km}}$ $= \frac{-0.77 \text{ km}}{5.68 \text{ km}}$ $e = -0.135$ $e = -0.135 * 100\%$ $\%e = -13.5\%$	$\Delta l = l_o - l_f \quad (\text{ec. 2})$ $\Delta l = 5.68 \text{ km} - 4.91 \text{ km}$ $= 5.68 \text{ km} - 4.91 \text{ km}$ $\Delta l = 0.77 \text{ km}$

Se estimó que el porcentaje de deformación requerido para la generación del pliegue fue del -13.5%. Se obtuvo un acortamiento de 0.77 kilómetros para las capas de rocas, lo cual es importante para el cálculo del desplazamiento mínimo que generó la falla Tuxtla-Malpaso en el momento en que ocurrió su reactivación.

➤ **Cálculo del desplazamiento de la falla Tuxtla-Malpaso**

Se utiliza el valor de acortamiento calculado en este mismo capítulo para obtener el desplazamiento de la Falla Tuxtla-Malpaso, así como una analogía mediante un triángulo rectángulo creado por el acortamiento horizontal, la traza de la falla y el eje del pliegue anticlinal. El acortamiento horizontal calculado se refiere al cateto opuesto del triángulo (c.o.), el ángulo theta que se forma entre el cateto adyacente (c.a.) y la hipotenusa (H) corresponde al ángulo que hay entre la traza de la falla y el eje del anticlinal, y la hipotenusa corresponde al desplazamiento de la falla (Figura 7.4). Es importante señalar que el desplazamiento calculado es el desplazamiento horizontal mínimo debido a que se trata de una falla lateral.

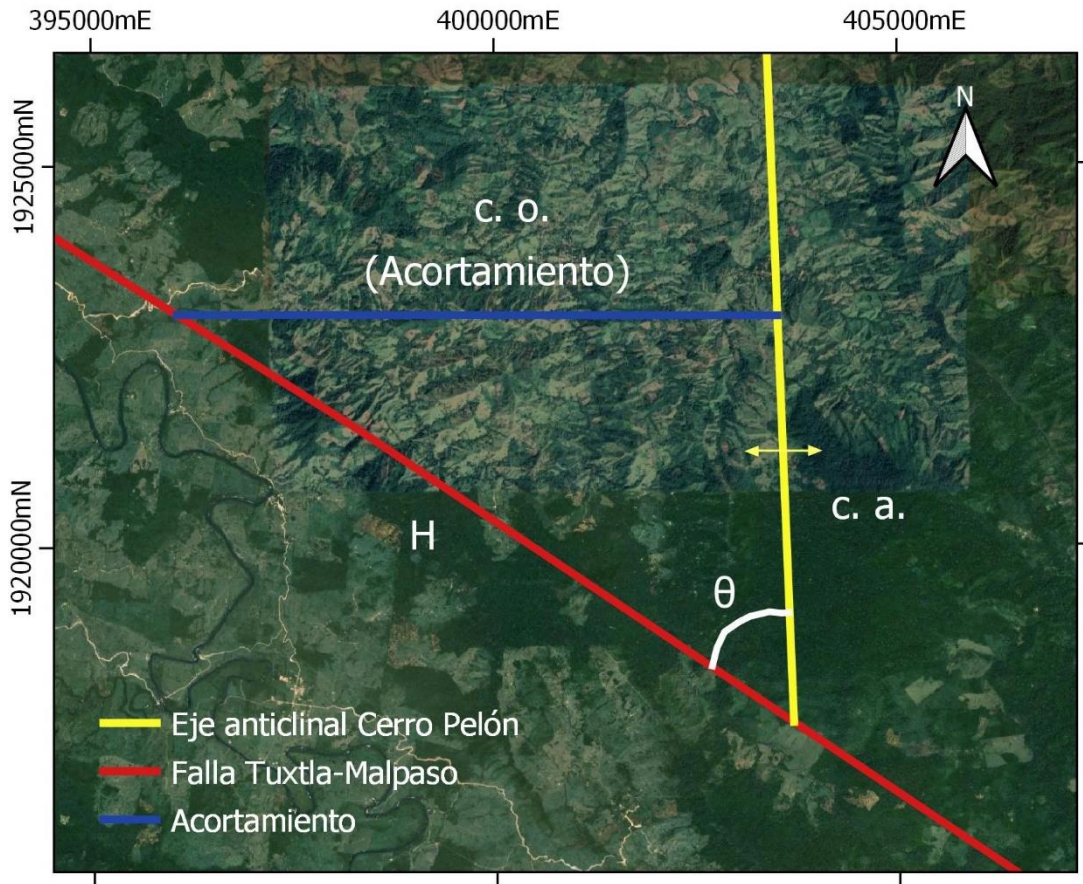


Figura 7.4. Vista en planta de la falla Tuxtla-Malpaso. Relación geométrica entre la falla Tuxtla-Malpaso, el análisis se realiza mediante un triángulo rectángulo usando la función trigonométrica  $\text{sen}\theta$ , haciendo uso del cateto opuesto (c.o.) y la hipotenusa (H), siendo esta última la distancia del desplazamiento mínimo de la falla Tuxtla-Malpaso.

Utilizando el acortamiento, un ángulo de  $36^\circ$  y la función trigonométrica  $\text{sen}\theta$ , se despeja la hipotenusa y se resuelve para obtener el desplazamiento mínimo horizontal (ecuación 3).

Tabla 3. Cálculo del desplazamiento mínimo horizontal.

<i>Desplazamiento mínimo horizontal</i>	
$\text{sen}\theta = \frac{\text{c. o.}}{H}$	(ec. 3)
$\therefore H = \frac{\text{c. o.}}{\text{sen}\theta}$	(ec. 4)

donde: c. o. (acortamiento) = 0.77 km

$$\theta = 36^\circ$$

$$H = \frac{0.77 \text{ km}}{\text{sen}36^\circ}$$

$$= \frac{0.77 \text{ km}}{0.588}$$

$$H \text{ (desplazamiento mínimo horizontal)} = 1.31 \text{ km}$$

De acuerdo con los cálculos anteriores, el anticlinal Cerro Pelón se encuentra plegado debido al desplazamiento de la falla Tuxtla-Malpaso. La dirección de acortamiento de este pliegue es W-E. Se estimó un desplazamiento mínimo de 1.31 kilómetros para la falla Tuxtla-Malpaso, teniendo en cuenta el acortamiento que experimentaron las rocas al momento de generar el anticlinal.

## 7.2 Evolución de la falla Tuxtla-Malpaso a través del tiempo

Toda la actividad de la falla Tuxtla-Malpaso tiene lugar durante el Mioceno superior y está estrechamente ligada a la formación de la cuenca *pull-apart* de Ixtapa en la zona centro de la falla y en la zona norte con el desarrollo del anticlinal Cerro Pelón.

El análisis estructural y estratigráfico desarrollado en el trabajo de Serrano-López (2020) ayudó a identificar que la apertura y desarrollo de la cuenca de Ixtapa se dio durante el Oligoceno y Mioceno inferior, y está asociada con la formación y desarrollo de la falla Tuxtla-Malpaso con cinemática lateral derecha y con algunas estructuras secundarias. Esta falla con cinemática derecha permitió la formación y evolución de la cuenca, y su actividad se extendió hasta el Mioceno medio-superior, donde la sedimentación predominante era la perteneciente a plataforma carbonatada. Este evento se ve marcado por una discordancia entre los depósitos del Mioceno medio y la Formación Ixtapa (consultar Figura 7.2).

Más tarde, en el Mioceno superior, la falla Tuxtla-Malpaso experimentó una reactivación, en la que su cinemática cambió, teniendo ahora una cinemática lateral izquierda. Serrano-López (2020) señala que la actividad de la falla durante este periodo impulsó el cierre e inversión de la cuenca de Ixtapa. En la estratigrafía, este periodo se caracteriza por una discordancia entre los depósitos de la Formación Ixtapa y los depósitos del Plioceno.

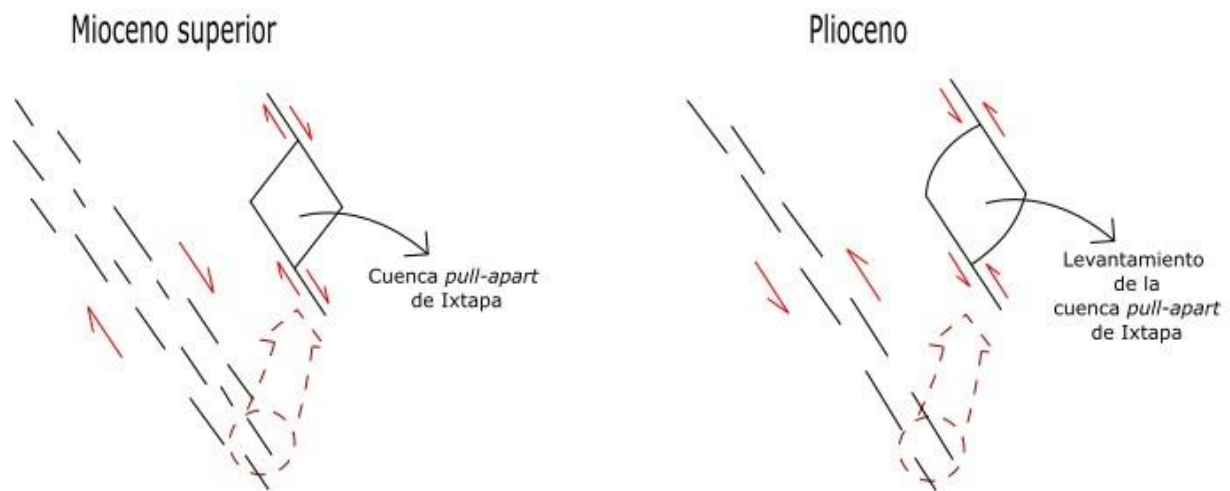


Figura 7.5. Evolución de la cinemática de la falla Tuxtla-Malpaso a través del tiempo y desarrollo de la cuenca pull-apart de Ixtapa.

Después de la inversión de la cuenca, las fallas que se encuentran delimitándola, especialmente la Falla Tuxtla-Malpaso, continuaron su actividad hasta la actualidad, formando grandes escarpes de falla, los cuales se pueden observar principalmente en la zona circundante al Cañón del Sumidero. Guzmán-Speziale (1989) reportó sismos someros (<50 km) que se desarrollaron sobre la traza de la falla en los últimos 28 años, lo cual indica que es una falla activa. Se tiene el registro de los mecanismos focales de dos sismos, los cuales indican fallas de cinemática lateral izquierda (Figura 7.6) que se ajustan a los resultados obtenidos mediante el análisis estructural de este trabajo. De igual manera, se consultó el catálogo de sismos del Servicio Sismológico Nacional (SSN), teniendo en cuenta solo los sismos ocurridos a partir de 1980 hasta la fecha y cuya profundidad sea inferior a 50 kilómetros, encontrándose alrededor de 40 sismos ocurridos a lo largo de la traza de la falla Tuxtla-Malpaso en este periodo. La actividad de la falla se mantiene desde el Mioceno superior hasta el presente.

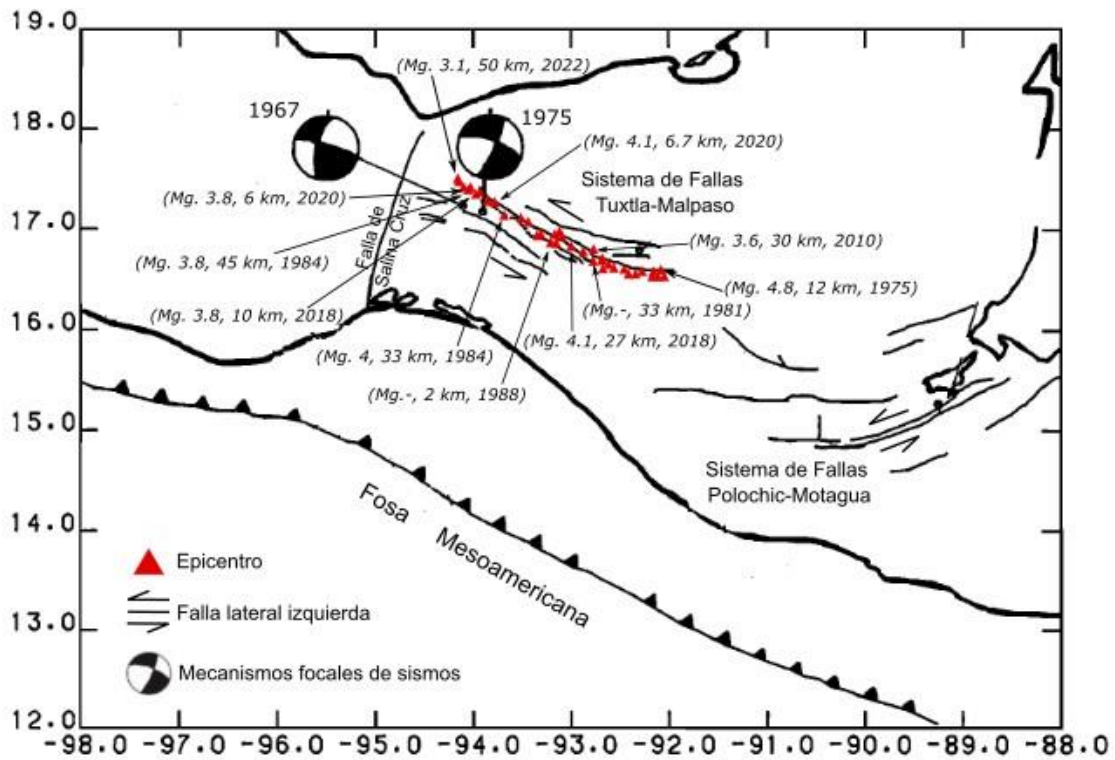


Figura 7.6. Sismos y mecanismos focales registrados en el sistema de Fallas Tuxtla-Malpaso. Información obtenida del catálogo de sismos del Servicio Sismológico Nacional. (Figura modificada de Guzmán-Speziale, 1989).

### 7.3 Implicaciones en los yacimientos de hidrocarburos del sureste de México

La evaluación geológica-estructural y los resultados alcanzados en la zona de estudio son de gran interés, ya que pueden ser una herramienta útil para la exploración de hidrocarburos. En la etapa preliminar de exploración, se hace uso de la geología superficial y de campo para analizar las rocas y estructuras que se pueden observar con facilidad en la superficie. Para obtener información sobre los tipos de roca, su composición, características, tipo de estructuras presentes, inclinación, dirección de los estratos y de los diferentes planos estructurales, muestras de fluidos, identificación de emanaciones de gas, etc. Toda esta información recopilada es valiosa debido a que permite elaborar mapas del subsuelo de la zona explorada, y así predecir el arreglo geológico de los cuerpos que se encuentran en el subsuelo, donde existe la posibilidad de encontrar hidrocarburo (PDVSA, 2010).

El sureste de México ha sido constantemente estudiado por geólogos, geofísicos y petroleros debido a la existencia de grandes yacimientos de petróleo. Desde el punto de

En vista geológica, es una de las áreas más complejas de Norteamérica, debido a la convergencia de las placas tectónicas Norteamericana, del Caribe y de Cocos en esta región. Las estructuras resultantes de esta actividad tectónica presentan diversas tendencias estructurales (Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), s.f.).

Una de las provincias petroleras que se encuentran en el sureste de México, es el Cinturón Plegado de Chiapas (CPCH), que abarca principalmente el estado de Chiapas, el sureste del estado de Veracruz y el noreste de Oaxaca (Figura 7.7). Los diferentes eventos tectónicos que afectaron al Cinturón Plegado de Chiapas dieron como resultado la sub-provincia de fallas de transurrencia, donde se encuentra la falla Tuxtla-Malpaso. En áreas cercanas a la traza de la falla se encuentran algunos pozos de exploración y desarrollo, en su mayoría ubicados en la zona norte de la falla. El estudio llevado a cabo en la falla Tuxtla-Malpaso y en las estructuras secundarias (fracturas y fallas menores) permitió obtener información que puede ser útil para los yacimientos de hidrocarburos que pudieran estar relacionados con la falla Tuxtla-Malpaso.

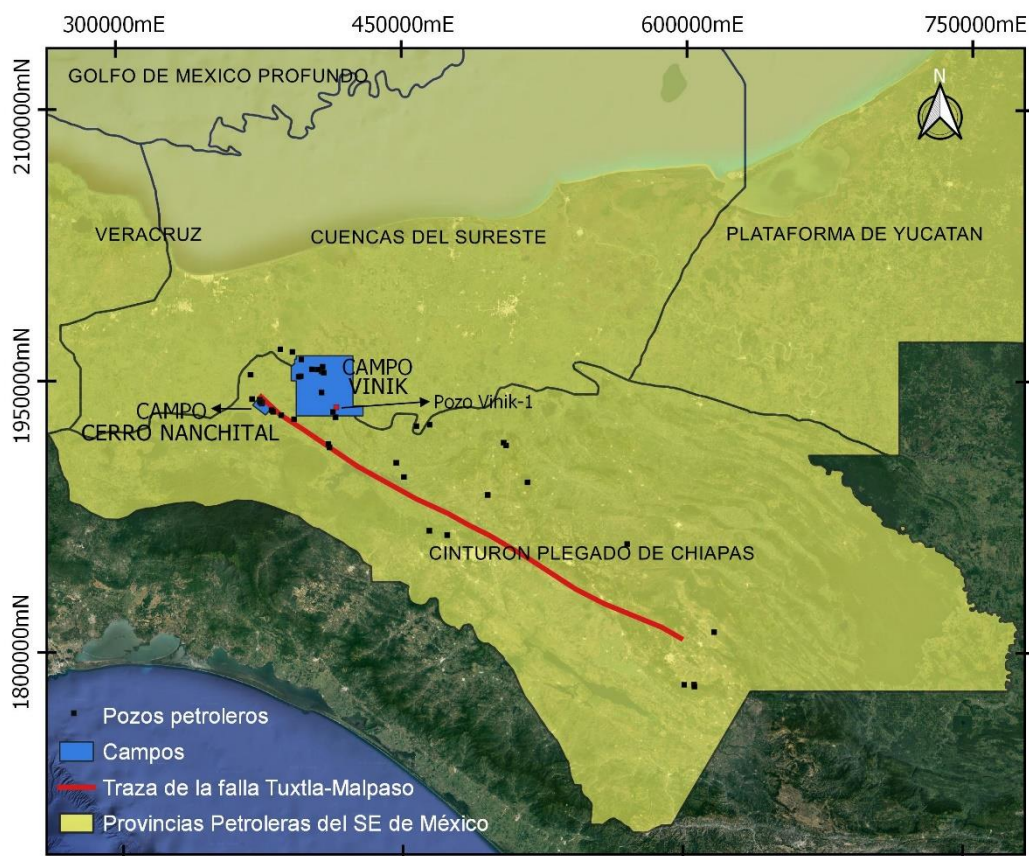


Figura 7.7. Ubicación de los campos y pozos petroleros de exploración y desarrollo ubicados en las cercanías de la falla Tuxtla-Malpaso en la provincia petrolera Cinturón Plegado de Chiapas (CPCH). (Mapa elaborado con información del CNH).

### 7.3.1 Importancia del estudio de las fallas y fracturas

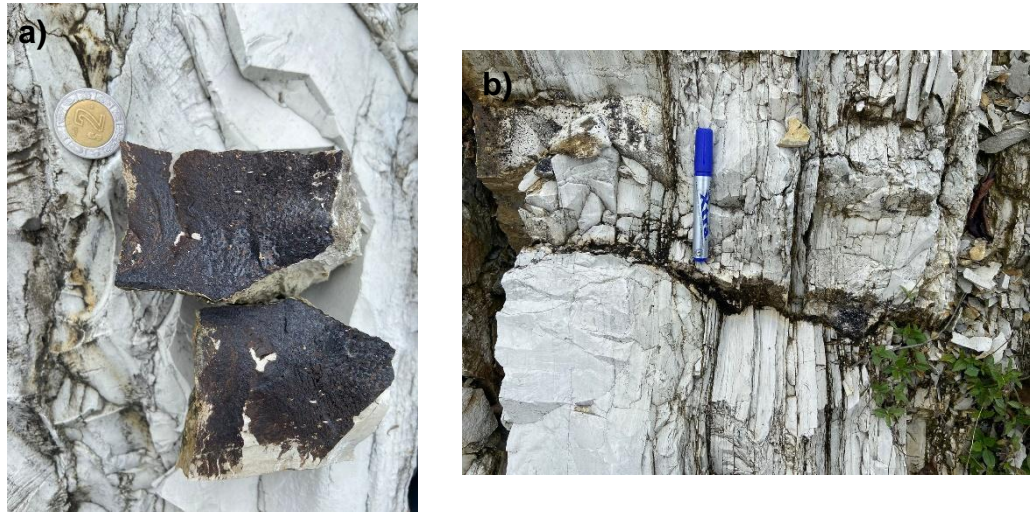
Es importante señalar que la mayoría de la producción de hidrocarburos en México proviene de yacimientos carbonatados naturalmente fracturados (Padilla-Sixto y Toledo-Piña, 2013), especialmente estos yacimientos son más comunes en el sureste de México, y son considerados un desafío debido a la importancia en la producción de hidrocarburos y lo complejo que son. La complejidad de estos yacimientos hace que su estudio requiera un trabajo multidisciplinario en el cual se combine información estática y dinámica (Padilla-Sixto y Toledo-Piña, 2013).

El tectonismo es uno de los principales responsables del origen de la distribución de fracturas en los yacimientos naturalmente fracturados, y su orientación está en función de los esfuerzos regionales y locales. No obstante, comprender la distribución espacial de los sistemas de fracturas es sumamente importante para la identificación de las áreas con mayor potencial de producción de hidrocarburos (Alcántara-Virueete *et al.*, 2020). En consecuencia, los afloramientos en la superficie correspondientes a la sección prospectiva o los análogos de yacimientos pueden constituir la base litológica, estructural y estratigráfica sobre la cual los geólogos podrán elaborar modelos conceptuales (Bratton *et al.*, 2006).

Los diversos análisis realizados a las fallas y fracturas en este trabajo permitieron identificar las principales características estructurales de estas, tales como el tipo de falla o fractura, el rumbo, el buzamiento, su dimensión, la época de su formación, la geometría y la relación que tienen con otras estructuras existentes en el área. Por consiguiente, este estudio y las siguientes consideraciones pueden ser de ayuda para una mejor caracterización de los yacimientos en la zona de estudio.

- I. El análisis de los diferentes afloramientos observados muestran que la formación Chinameca, presenta una alta densidad de fracturas, así como presencia de petróleo (ver Figura 7.8) y olor fétido a gas en fracturas y rocas. Según la teoría, se sabe que esta formación se encuentra catalogada en el sistema petrolero de la región como una roca almacenadora debido a sus características. Las trampas estructurales que se registran en esta zona son anticlinales, fallas laterales y normales. Estas estructuras también están en el primer y único campo en producción en la provincia Cinturón Plegado de Chiapas, siendo este el campo

Cerro Nanchital (Clara-Valdés, Patiño-Ruiz, Barrera-González y Bernal-Vargas, 2013).



*Figura 7.8. Afloramiento de la Formación Chinameca situada en la zona norte de la falla Tuxtla-Malpaso catalogada en el sistema petrolero como una roca almacén. a) Caliza impregnada de petróleo y olor fétido a gas. b) Fracturas encontradas en el afloramiento, estas fracturas se encuentran rellenas por hidrocarburos.*

- II. Las secciones transversales (AA', BB', CC' y DD') permiten en una primera instancia reconocer la estratigrafía y las estructuras más prominentes que se encuentran en la zona de estudio, y así reconocer cuáles son las fallas o estructuras que podrían estar afectando a un posible yacimiento. Estas secciones iniciales pueden ser de ayuda a la sísmica para la obtención de un modelo geológico estructural más detallado de un yacimiento.
  
- III. El estudio de la falla Tuxtla-Malpaso y la distinción de los dos eventos de deformación que tuvieron lugar en la zona de estudio (cinemática lateral derecha e izquierda) son aportes geológicos-estructurales importantes, debido a que esta falla puede fungir como una trampa estructural y controlar la acumulación de hidrocarburos en el área. Por otra parte, pueden formar otras estructuras como las fracturas, las cuales pueden actuar como conductos para el petróleo y/o el gas. Es importante, ya que esto da una idea del tiempo de acumulación y si esta estructura actúa como una barrera al paso de los fluidos o no.

- IV. Las fracturas encontradas en la zona de estudio fueron provocadas por un evento tectónico regional y se desarrollaron principalmente por fallas con cinemática lateral derecha e izquierda con dirección NE-SW y NW-SE respectivamente, la longitud de las fracturas observadas va desde unos cuantos milímetros hasta varios metros. La distribución de las fracturas en las rocas es mayor cerca de la zona de falla y a medida que se aleja de ella, estas disminuyen. La presencia de estas fracturas puede mejorar la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento de hidrocarburos. Sin embargo, no siempre las fracturas conducen fluidos, también pueden actuar como una barrera para los fluidos (Bratton *et al.*, 2006).
- V. El conocimiento del tipo de fracturas que se encuentran en la zona de estudio permite una mejor comprensión del flujo de fluidos a través de las fracturas (Bratton *et al.*, 2006). Es sumamente importante especificar si las fracturas se encuentran abiertas o no en los yacimientos naturalmente fracturados, ya que la permeabilidad de la roca puede verse afectada positiva o negativamente. En la zona de estudio se hallaron fracturas abiertas, rellenas de calcita, arcilla y disueltas. Es importante tener este dato en cuenta en la caracterización de los yacimientos, puesto que las fracturas abiertas pueden almacenar grandes cantidades de hidrocarburos, no obstante, estas también pueden causar problemas de pérdida de circulación, lo cual se reduce a grandes costos y a una pérdida potencial de pozos (Bratton *et al.*, 2006). Las fracturas que se encuentran parcialmente rellenas son un factor importante debido a que dan las producciones de hidrocarburo más consistentes, debido a que la mineralización de las fracturas actúa como un agente de sostén natural que no permite el cierre de las fracturas. Por otro lado, las fracturas que están totalmente mineralizadas conforman compartimientos aislados que conducen a factores de recuperación muy bajos, aunque los volúmenes de hidrocarburos sean grandes (Aguilera y Aguilera, 2001).
- VI. La obtención de los diagramas de rosetas de fracturas permitió graficar la dirección de las fracturas y su frecuencia, teniendo como principal objetivo el determinar la orientación preferencial de las fracturas, siendo la orientación general NE-SW. Estas direcciones son importantes porque permiten conocer las direcciones de

flujo preferentes, para crear modelos del yacimiento, así como modelos de inyección de fluidos.

Las rocas calcáreas que se encuentran expuestas a lo largo de la zona de falla de la falla Tuxtla-Malpaso son un análogo de yacimientos naturalmente fracturados. Un ejemplo es el pozo Vinik-1 (PEMEX-CNH, 2020) perteneciente al campo Vinik y ubicado a unos kilómetros al sureste de la zona de Cerro Pelón (ver Figura 7.7), el cual resultó ser un pozo productor durante el 2020. El petróleo es extraído de rocas de la formación Chinameca ubicadas a 4 kilómetros de profundidad. El cambio de profundidad de la formación Chinameca en una distancia muy corta demuestra el control estructural asociado con la falla Tuxtla-Malpaso. Así mismo, la temporalidad en la generación de hidrocarburos propuesta previamente, entre el Oligoceno-Mioceno en la zona de la Cuenca Salida del Istmo (Meneses-Rocha, 2001), concuerda con la actividad de la falla Tuxtla-Malpaso.

## Capítulo 8. Conclusiones

La falla Tuxtla-Malpaso es una estructura compleja, que presenta una cinemática lateral izquierda, con un rumbo general  $N55^{\circ}W$ , y se considera una falla joven y activa. Esta falla resulta de mucho interés debido a su geometría y a su gran longitud, debido a que abarca gran parte del estado de Chiapas y una parte del sureste de Veracruz. Por lo tanto, comprender su historia de deformación, así como la relación con las estructuras menores, es de gran importancia.

A partir de los resultados alcanzados en este trabajo y el análisis de la información previa, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Las rocas de la Formación Chinameca y Angostura son un análogo expuesto de yacimientos naturalmente fracturados de petróleo del sureste de México.
2. La falla Tuxtla-Malpaso registra dos eventos de deformación durante el Cenozoico. El primer evento corresponde a una falla con cinemática lateral derecha y dirección NE-SW, que tuvo lugar a principios del Mioceno superior, por su parte, el segundo evento de deformación tiene una cinemática lateral izquierda y dirección NW-SE. Este último evento se llevó a cabo a finales del Mioceno superior e inicios del Plioceno. Hasta al día de hoy se sigue considerando una falla activa debido a que se han registrado algunos sismos sobre la traza de la falla.
3. La obtención de los datos de acortamiento y deformación producidos por la Falla Tuxtla-Malpaso para generar el anticlinal Cerro Pelón permitió determinar el desplazamiento mínimo horizontal de 1.31 kilómetros para la zona norte de la Falla Tuxtla-Malpaso.
4. Las rosetas de fracturas obtenidas ayudaron a identificar las direcciones preferenciales de las fracturas, siendo estas NW-SE y NE-SW. La distribución de estas fracturas a lo largo de la falla es cambiante, teniendo una mayor concentración cerca de esta y conforme se aleja de la zona de falla la cantidad de fracturas disminuye progresivamente, por su parte, su tamaño va desde unos cuantos milímetros hasta metros e incluso kilómetros. Se debe recalcar que existe una mayor presencia de fracturas con longitudes pequeñas, en escala kilométrica

se habla de fracturas menores a 2 kilómetros y en escala mesoscópica se tienen fracturas menores a 100 centímetros, debido a que se trata de una falla joven con poco desplazamiento, a pesar de tener una gran longitud.

## Bibliografía

- Abad, P.A.M. (2020). Análisis estructural-Fracturas: fallas. *Geología Estructural*. Recuperado de <https://www.geologiaestructural.com/>
- Aguilera, R. y Aguilera, M. S. (2001). Aspectos geológicos y de ingeniería en yacimientos naturalmente fracturados. *Escuela de petróleos*, 10-18.
- Alcántara-Virueite, R., Santiago-García, L., Fuentes-Cruz, G., García-Torres, H., Ángulo, B. y Martínez, M. (2020). Metodología de caracterización dinámica aplicada a un yacimiento naturalmente fracturado de alta complejidad. *Ingeniería Petrolera*, 60(2), 73-118.
- Ayala, L. (2017). Identificación de indicadores cinemáticos en geología estructural. *Explorock SAC Soluciones Geológicas*. Recuperado de <https://www.explorock.com/indicadores-cinematicos-en-geologia-estructural/>
- Benavides, L. (1950). El Anticlinal de Cerro Pelón, Municipio de Minatitlán, Veracruz. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 2(10), 599 – 616.
- Blackstone, D. L. (1988). *Traveler's Guide to the Geology of Wyoming* (2a. ed.). Estados Unidos de América: Geological Survey of Wyoming.
- Bratton, T., Canh, D. V., Van Que, N., Duc, N. V., Gillespie, P., Hunt, D., ... y Sonneland, L. (2006). La naturaleza de los yacimientos naturalmente fracturados. *Oilfield Review*, 18, 4-25.
- Brichau, S., Witt, C. y Carter, A. 2009. Thermochronology applied to the Chiapas mountains, Mexico. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 89, T23C-2064.
- Camargo–Puerto, J. (2004). *Manual de Geología Estructural. Guía para la interpretación y elaboración de Mapas Geológicos*. Bogotá, Colombia: Universidad Surcolombiana.

- Carreras, J. y Ortuño, F. (1990). Fundamento geométrico y cinemático de la modelización teórica y experimental de deformaciones no-coaxiales. *Acta geológica hispánica*, 25(4), 237-259.
- Centeno-García, E., Silva-Romo, G., Grajales-Nishimura, J. y Ortega-Flores, B. (2019). Caracterización del Sistema Petrolero de las Cuencas del Sureste de Mexico a partir de su análogo en Cerro Pelón, La Choapas, Veracruz. *Libreto Guía del Taller Teórico Practico*, 60.
- Clara-Valdés, L., Patiño-Ruiz, J., Barrera-González, D. y Bernal-Vargas, L. (2013). *Provincia Petrolera. Cinturón Plegado de Chiapas*. México: Pemex Exploración y Producción, Subdirección Técnica de Exploración.
- Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH). (s.f.). *Atlas Geológico. Cuencas Del Sureste-Cinturón Plegado De La Sierra De Chiapas*. CDMX, México: Centro Nacional de Información de Hidrocarburos (CNIH).
- De la Rosa–Mora, O. (2021). *Cartografía geológica y origen de las estructuras en flor de Cerro Pelón, Veracruz. Borde de la Cuenca Salina, Sureste de México* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. New York, Estados Unidos de América: Cambridge University Press.
- Galicia–Flores, E. y Lazcano–Camacho, M. (2018). *Caracterización sedimentológica de la Formación Salina del Anticlinal Cerro Pelón. Las Choapas, Ver.* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Godínez-Urban, A., Molina Garza, R. S., Geissman, J. W., y Wawrzyniec, T. (2011). Paleomagnetism of the Todos Santos and La Silla Formations, Chiapas: implications for the opening of the Gulf of Mexico. *Geosphere*, 7(1), 145-158.
- Gómez-Amaya, L. y Lozano-Gómez, J. (2019). *Análisis De Fracturas Naturales Y Su Relación Con La Producción De Hidrocarburos Para El Diseño De Pozos En El Campo Piedemonte*. Bogotá, Colombia: Fundación Universidad de América.

- Griem, W. (2020). Roseta de diaclasas. *Geología Estructural*. Recuperado de <https://www.geovirtual2.cl/Geoestructural/prak03.htm#:~:text=Una%20roseta%20de%20diaclasas%20es,o%20la%20direcci%C3%B3n%20de%20inclinaci%C3%B3n>
- Guzmán-Speziale, M., Pennington, W. D., y Matumoto, T. (1989). The triple junction of the North America, Cocos, and Caribbean plates: Seismicity and tectonics. *Tectonics*, 8(5), 981-997.
- Guzmán-Speziale, M., y Meneses-Rocha, J. J. (2000). The North America–Caribbean plate boundary west of the Motagua–Polochic fault system: a fault jog in southeastern Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(4-5), 459-468.
- Kakimi, T. (1980). Magnitude-frequency relation for displacement of minor faults and its significance in crustal deformation. *Chishitsu Chosasho Geppo;(Japan)*, 31(10).
- Krantz, R. W. (1988). Multiple fault sets and three-dimensional strain: theory and application. *Journal of Structural Geology*, 10(3), 225-237.
- López-Rodríguez, T. (2013). *Importancia del Sistema de Fracturas en la Producción de Aceite en México* (Tesis de Licenciatura). Instituto Politécnico Nacional, CDMX, México.
- Meneses-Rocha, J. J. (2001). Tectonic evolution of the Ixtapa Graben, an example of a strike-slip basin of southeastern Mexico: implications for regional petroleum systems. *Memoirs-American Association Of Petroleum Geologists (AAPG)*, 75, 183–216.
- Meneses-Rocha, J. J. (1985). *Tectonic evolution of the Strike-slip Fault province of Chiapas, México* (Tesis de Maestría). University of Texas at Austin, Texas, Estados Unidos de América.
- Narcía-López, C., Castro, R. R., & Rebollar, C. J. (2004). Determination of crustal thickness beneath Chiapas, Mexico using S and Sp waves. *Geophysical Journal International*, 157(1), 215-228. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02173.x

- Nieto–Jiménez, C. (2021). *Análisis del contacto Jurásico–Cenozoico en el sur del Anticlinal Cerro Pelón, Graciano Sánchez, Veracruz* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Padilla-Sixto, R. y Toledo-Piña, R. (2013). Evaluación de yacimientos naturalmente fracturados y retos por resolver. *Ingeniería Petrolera*, 53(3), 138-161.
- PDVSA. (2010). *Exploración. Cuadernos Soberanía Petrolera*. Caracas, Venezuela: Petróleos de Venezuela, S.A.
- Petroleum Experts. (2021). *Fieldmove Clino. Iphone User Guide*. Software de Ingeniería Petrolera y Geología Estructural.
- Pindell, J. y Kennan, L. (2001). *Kinematic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean*. doi: 10.5724/gcs.01.21.0193
- Quezada-Muñetón, J. M. (1987). El Cretácico Medio-Superior y el Límite Cretácico Superior-Terciario Inferior en la Sierra de Chiapas. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 39, 3-98.
- Ruiz-Cantú, S. (2017). *Análisis Geométrico y Cinemático de Pliegues Relacionados a Fallas que Representan Análogos de Trampas de Hidrocarburos en el Golfo de México* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.
- Sánchez-M. de Oca, R. (1967). *Informe Geológico del Área Suchiapa-Cintalapa, Chiapas*. Inédito. Petróleos Mexicanos.
- Sánchez-M. de Oca, R. (1979). Geología petrolera de la Sierra de Chiapas. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 31(1-2), 67-97.
- Scott, R. B. y Castellanos, M. (1984). *Stratigraphic and structural relations of volcanic rocks in drill holes USW GU-3 and USW G-3, Yucca Mountain, Nye County, Nevada* (No. USGS-OFR-84-491). Estados Unidos de América: U.S. Geological Survey.

- Serrano-López, G. (2021). *Revisión de la estratigrafía y estructura del pull-apart de Ixtapa, Chiapas* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Stewart, J. H. (1980). Geology of Nevada—a discussion to accompany the geologic map of Nevada, *Spec. Publ. Nev. Bur. Mines. Geol*, 4.
- Suarez–Burgoa, L. (2017). Fallas, zonas de falla geológicas y rupturas. *Universidad Nacional de Colombia*. Recuperado de <http://www.geomecanica.org/didacticMat/fallasZonasFallasGeol/index.html>
- Sylvester, A. (1988). Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, 100(11). 1666-1703.
- Tarback, E. y Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. (8a. ed.). Madrid, España: Pearson Educación S.A.
- Tolson, G. (1996). Un Catálogo De Indicadores Cinemáticos En Rocas Cizalladas. *GEOS*, 16 (1). 9 - 14.
- Van Der Pluijm, B. y Marshak, S. (2004). *Earth Structure. An Introduction To Structural Geology And Tectonics*. (2a. ed.). New York, Estados Unidos de América: W. W. Norton & Company, Inc.
- Vásquez, A., Grajales, J. y Rangel, E. (2021). Deformación Frágil En El Sector Norte De La Falla Tuxtla-Malpasso, Región De Río Playas, Veracruz. *Geos. Boletín Informativo de la Unión Geofísica Mexicana (UGM)*, 41(1), 43.
- Witt, C., Rangin, C., Andreani, L., Olalez, N., & Martinez, J. (2012). The transpressive left-lateral Sierra Madre de Chiapas and its buried front in the Tabasco plain (Southern Mexico). *Journal of the Geological Society*, 169(2), 143-155. doi: 10.1144/0016-76492011-024

## Anexos

### Anexo I. Concepto de deformación.

#### ➤ Deformación ( $\epsilon$ )

La deformación es el cambio de una geometría inicial a una final por medio de la traslación, rotación, dilatación (cambio de volumen) y distorsión de un cuerpo (Fossen, 2010). Cuando las rocas son sometidas a esfuerzos que superan su resistencia, comienzan a deformarse, normalmente plegándose, fluyendo o fracturándose (Tarbuck, E. y Lutgens, F., 2005).

La deformación puede clasificarse en (Tarbuck, E. y Lutgens, F., 2005):

- I. Deformación frágil (*brittle*): es la que produce rotura, cuando se supera su resistencia.
- II. Deformación dúctil (*ductile*): produce un cambio en el tamaño y forma de un objeto sin que el cuerpo se fracture. Esta deformación se puede subdividir en elástica y permanente. Donde la deformación elástica es aquella en la cual al retirarse los esfuerzos actuantes sobre un cuerpo, este recupera su forma original. Mientras que en la deformación permanente, aun cuando se retiren los esfuerzos, la deformación permanece.

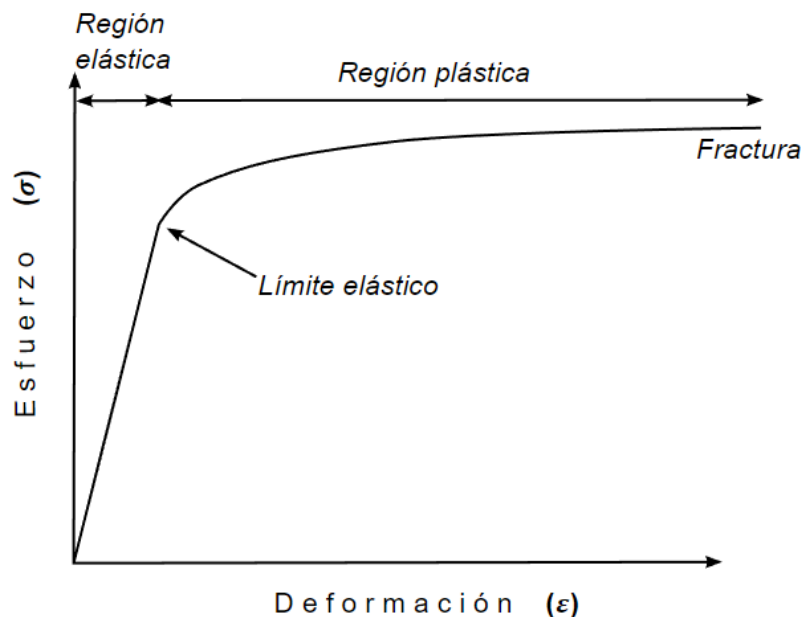


Figura II. Diagrama esfuerzo-deformación.

En la Figura II se presenta un gráfico de esfuerzo vs deformación, el cual busca representar el comportamiento de los materiales al ser sometidos a un esfuerzo. En primera lugar, se representa la región elástica representada por la recta; al someter a un cuerpo a un esfuerzo, este experimenta una deformación elástica. No obstante, al cesar dicho esfuerzo, el cuerpo vuelve a su estado inicial. Cuando se llega al límite elástico (punto de inflexión) la relajación deja de ser lineal y la curva pierde pendiente, pasando así al régimen plástico, cuando el esfuerzo en esta región cesa la deformación que se alcanza para los cuerpos es permanente, es decir, el cuerpo no se recupera y se habla de una deformación plástica. Si el esfuerzo sigue actuando sobre el cuerpo, llega a un punto en que se fractura, entrando así a la deformación frágil.

**Anexo II. Base de datos estructurales de la zona centro de la Falla Tuxtla-Malpasó (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas).**

➤ **Ejemplo de datos de planos de falla tomados en campo**

Planos de Falla (Estación TXCHI1)			
Dir. Incl. (°)	Incl. (°)	Pitch (°)	Cinemática
268	78	0	-
285	87	0	L.D.
200	70	0	L.I.
185	68	5	L.I.
0	87	5	L.D.
85	87	0	L.I.
165	83	0	L.I.
255	70	0	L.D.
310	70	4	L.I.
270	87	0	L.I.
200	87	5	L.I.
295	87	10	L.D.
197	85	0	L.I.
210	87	0	L.I.
85	70	10	L.I.
170	87	30	L.D.
155	72	5	L.I.
205	89	6	L.I.
125	87	8	L.I.

Planos de Falla (Estación TXSC3)			
Dir. Incl. (°)	Incl. (°)	Pitch (°)	Cinemática
350	70	10	L.D.
0	70	10	L.D.
355	60	8	L.D.
20	62	15	L.D.
20	80	25	L.D.
0	80	5	L.D.
12	60	5	L.D.
345	70	30	L.D.
0	60	15	L.D.
355	70	10	L.D.
345	50	20	L.D.
4	80	4	L.D.
0	80	4	L.D.
5	70	4	L.D.
350	70	10	L.D.
340	60	5	L.D.
330	70	2	L.D.
345	60	10	L.D.
350	50	4	L.D.
348	65	10	L.D.
345	60	10	L.I.
335	60	30	L.I.
340	70	12	L.I.
341	70	4	L.D.
332	72	0	L.I.
330	80	4	L.I.
340	50	4	L.I.
142	80	8	L.I.
158	82	4	L.I.

Planos de Falla (Estación TXSC7)			
Dir. Incl. (°)	Incl. (°)	Pitch (°)	Cinemática
210	50	25	L.D.
310	60	30	L.D.
320	60	27	L.D.
65	60	20	L.I.
60	85	50	Normal
335	51	27	L.D.

➤ **Ejemplo de datos de planos de fractura tomados en campo**

Nota	Fracturas (Estación TXSC1)	
	Dir. Incl. (°)	Incl. (°)
Fracturas extensionales (NE-SW)	350	80
	345	76
	70	64
	57	71
	53	76
	135	89
	56	70
	349	71
	350	83
	73	73
	63	78
	60	69
	357	80
	354	78
	302	72
	49	69
	138	86
	306	86

Nota	Fracturas (Estación TXCHI2)	
	Dir. Incl. (°)	Incl. (°)
Rumbo de fracturas NE – SW	256	83
	345	69
	341	72
	329	72
	341	69
	224	72
	186	87
	194	87
	343	77
	312	85
	257	76
	358	81
	169	84
	187	84
	189	85
	315	75
	251	68
	219	79

Nota	Fracturas (Estación TXSC4)	
	Dir. Incl. (°)	Incl. (°)
Rumbo de fracturas (extensionales): E-W y NE-SW. Las fracturas NE-SW son más viejas que las E-W, porque estas últimas cortan a las primeras	336	68
	338	82
	336	78
	336	84
	130	60
	116	63
	336	66
	334	82
	325	70
	7	74
	355	72
	8	57
	350	55
	344	41
	5	60
	4	47
	330	80
	256	89
	326	82
	12	49
308	34	

Nota	Fracturas (Estación TXCHI3)	
	Dir. Incl. (°)	Incl. (°)
Sobre los mismos planos se interceptan dos planos de estrías unas sub-horizontales y otras sub-verticales, los cuales indican que primero fue la falla normal y luego la vertical.	178	82
	157	89
	335	89
	110	68
	154	78
	105	59
	113	83
	105	76
	129	71
	132	87
	102	51
	106	59
	87	88
	308	89
	157	63
	78	73
	81	63

➤ **Ejemplo de datos de planos de estratificación tomados en campo**

Estratificación (Estación CASCHO)	
Dir. Incl. (°)	Incl. (°)
142	22
254	8
234	7
191	12

Estratificación (Estación TXCH15)	Espesor (cm)
Rocas masiva fracturada por fracturas T	30
	60
	45
	92
	50

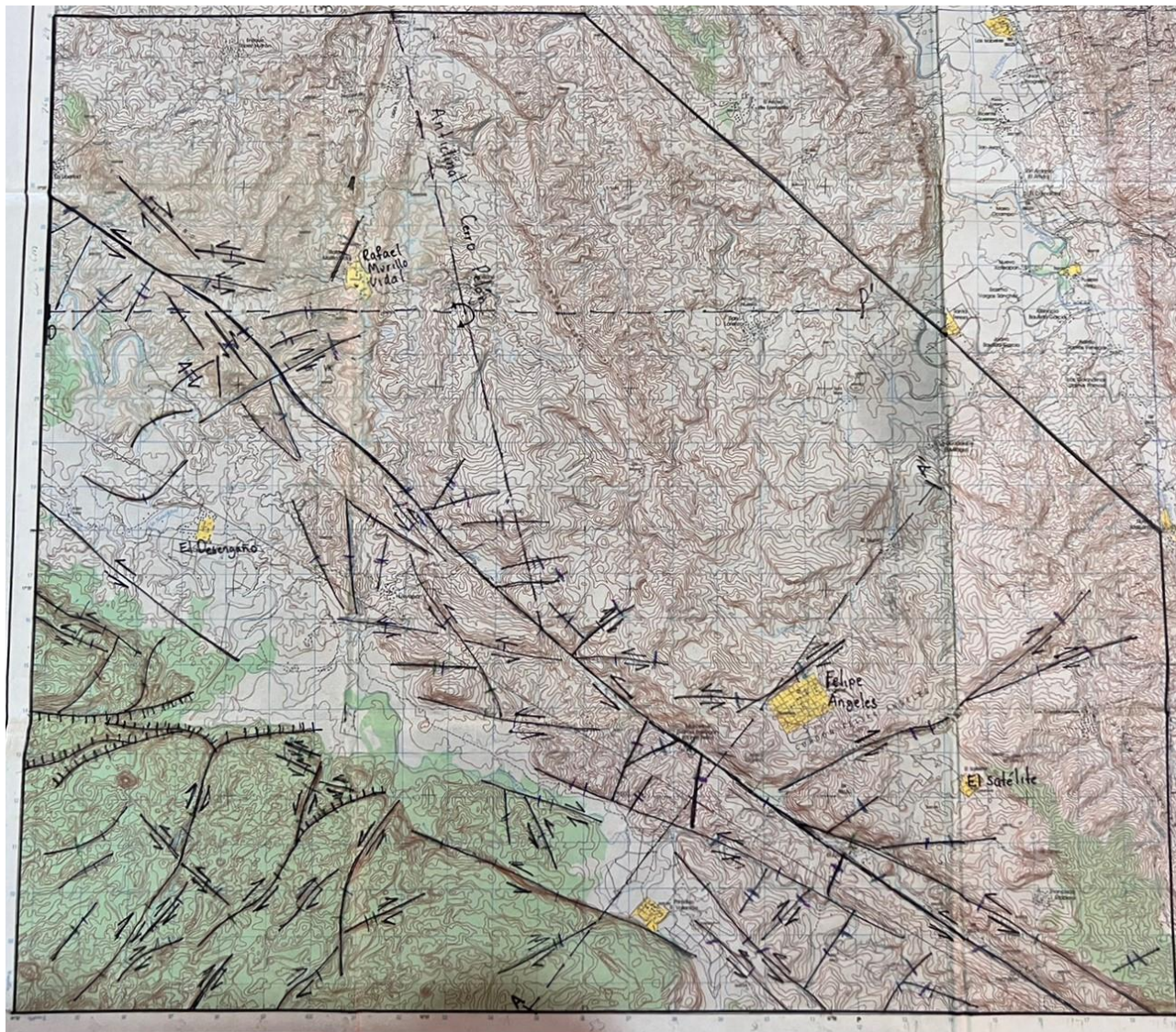
Estratificación (Estación TXSC11)		Capas
Dir. Incl. (°)	Incl. (°)	Espesores (cm)
175	5	32
179	22	14
185	15	78

Estratificación (Estación TXSC4)		Capas
Dir. Incl. (°)	Incl. (°)	Espesores (cm)
80	30	Capas masivas, no se ve estratificación, roca muy triturada y fracturada
175	20	
-	-	
-	-	
-	-	
-	-	
-	-	
-	-	

Estratificación (Estación TXSC6)		Capas
Dir. Incl.	Incl.	Espesores (cm)
204	23	11
205	41	16
198	25	75
-	-	9
-	-	70
-	-	14
-	-	35
-	-	37
-	-	110
-	-	40
-	-	80
-	-	40
-	-	25
-	-	6

**Anexo III. Trazado de lineamientos geomorfológicos en las cartas topográficas obtenidas del INEGI.**

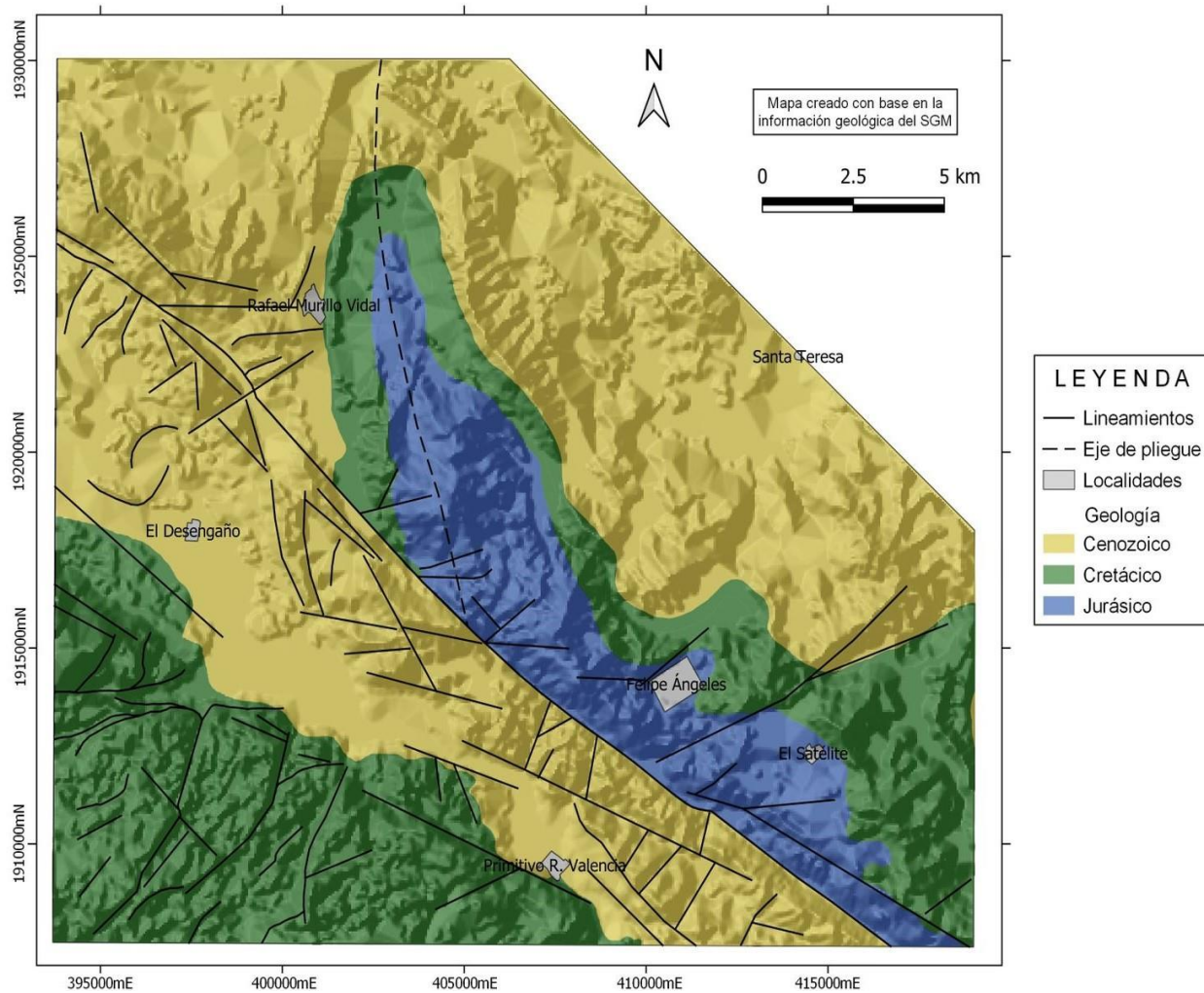
- **Carta topográfica Xochitlán (E15C37) correspondiente a el área de Felipe Ángeles, Veracruz.**



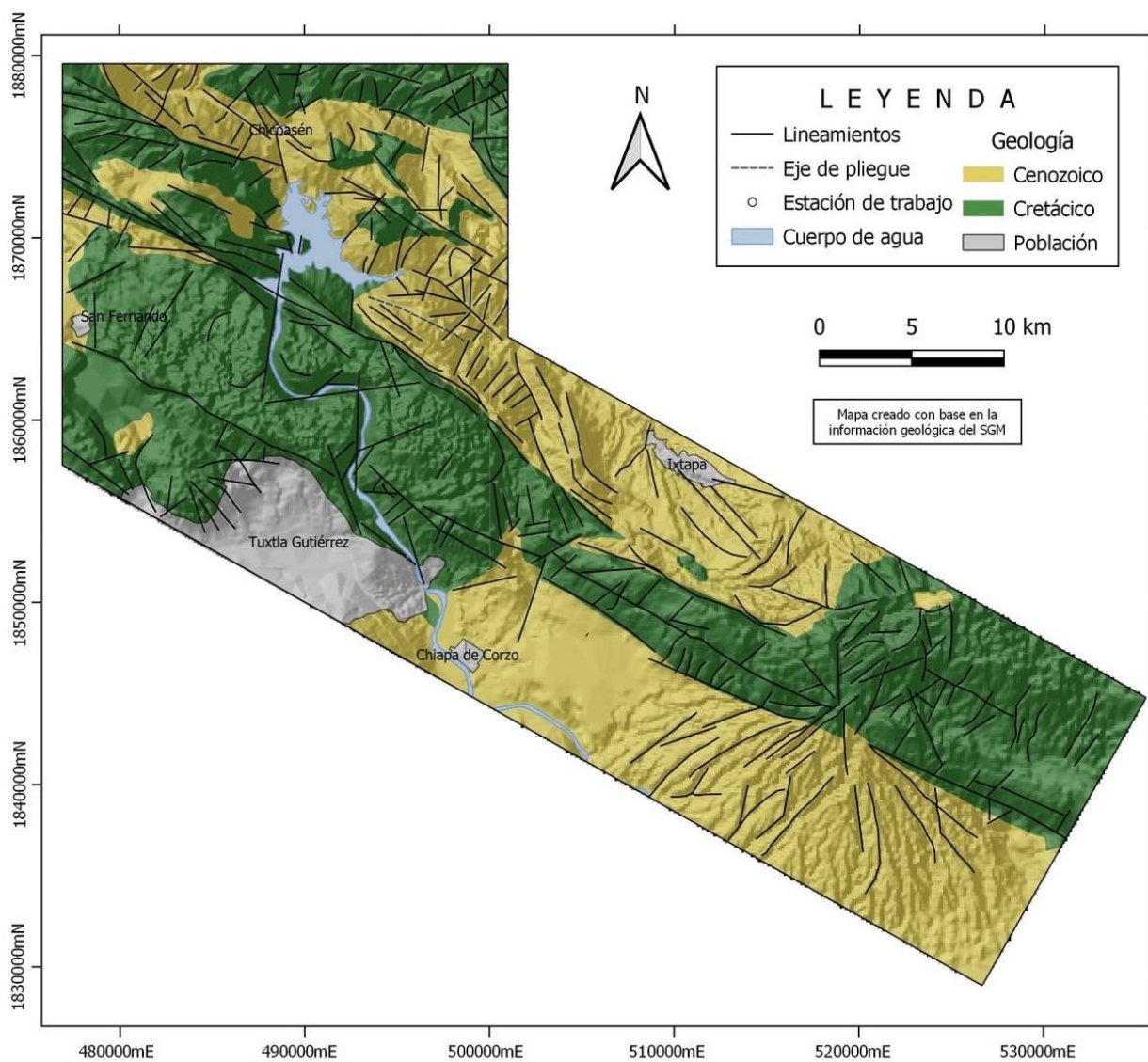
- **Cartas topográficas Tuxtla Gutiérrez (E15C69), Chicoasén (E15C59), Bochil (E15D51) y Acala (E15D61) correspondiente a el área de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.**



## Anexo IV. Mapa de lineamientos de la zona norte de la Falla Tuxtla-Malpasos.

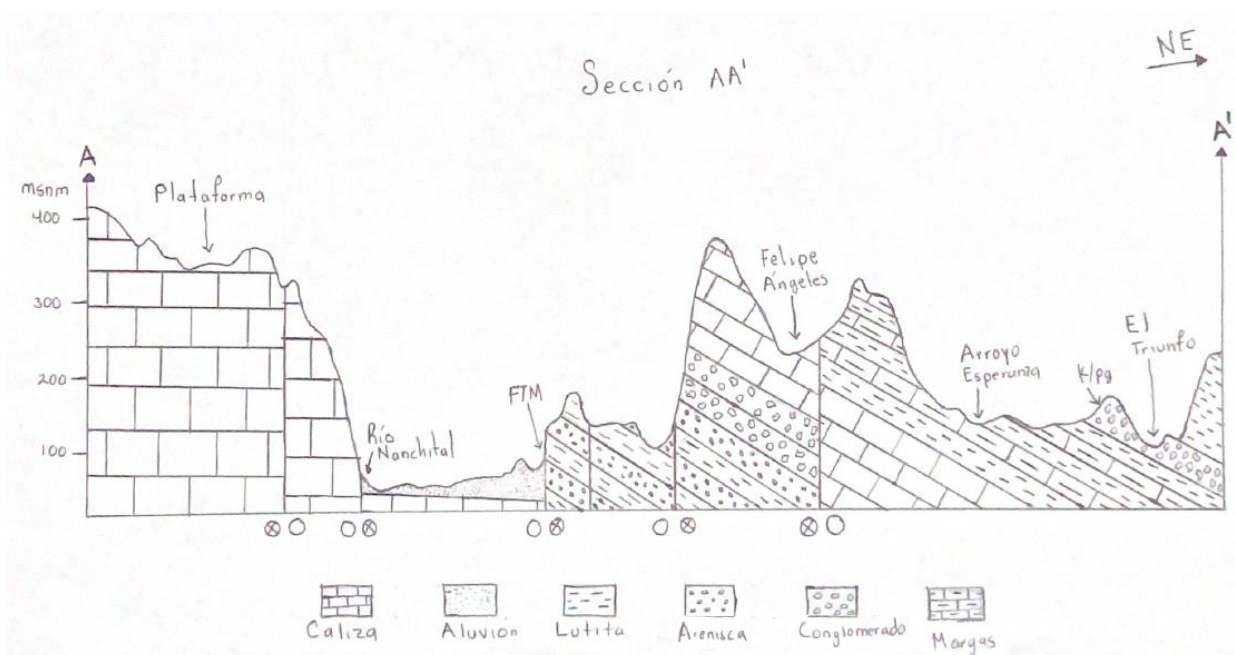


## Anexo V. Mapa de lineamientos de la zona centro de la Falla Tuxtla-Malpasos.

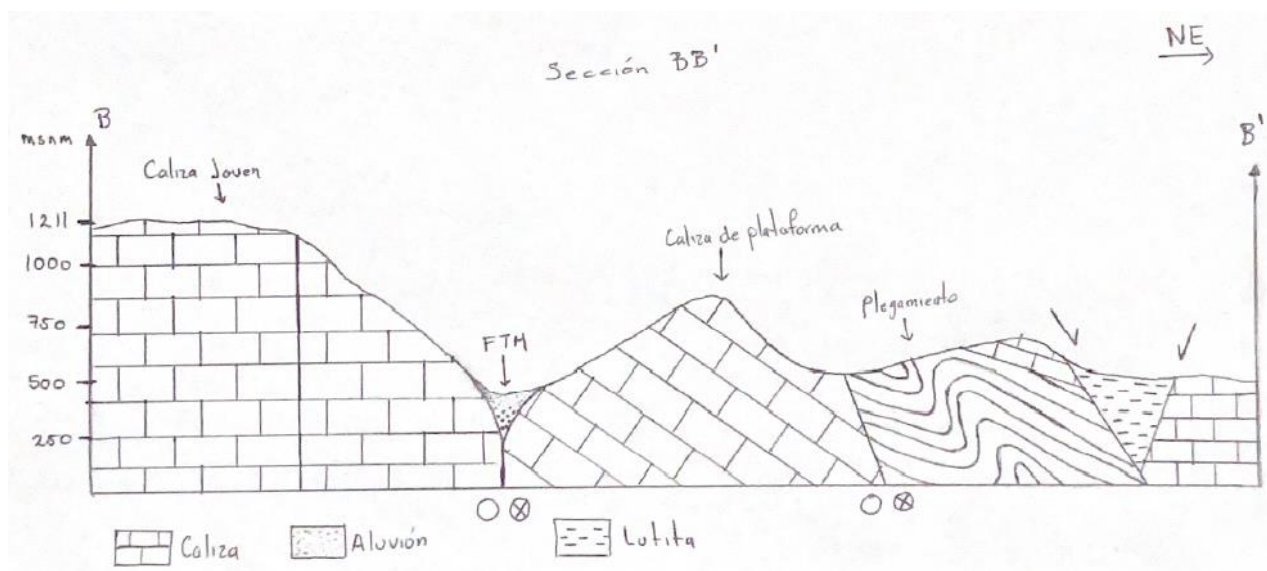


**Anexo VI. Secciones geológicas analógicas realizadas a partir de un perfil de elevación obtenido mediante Google Earth.**

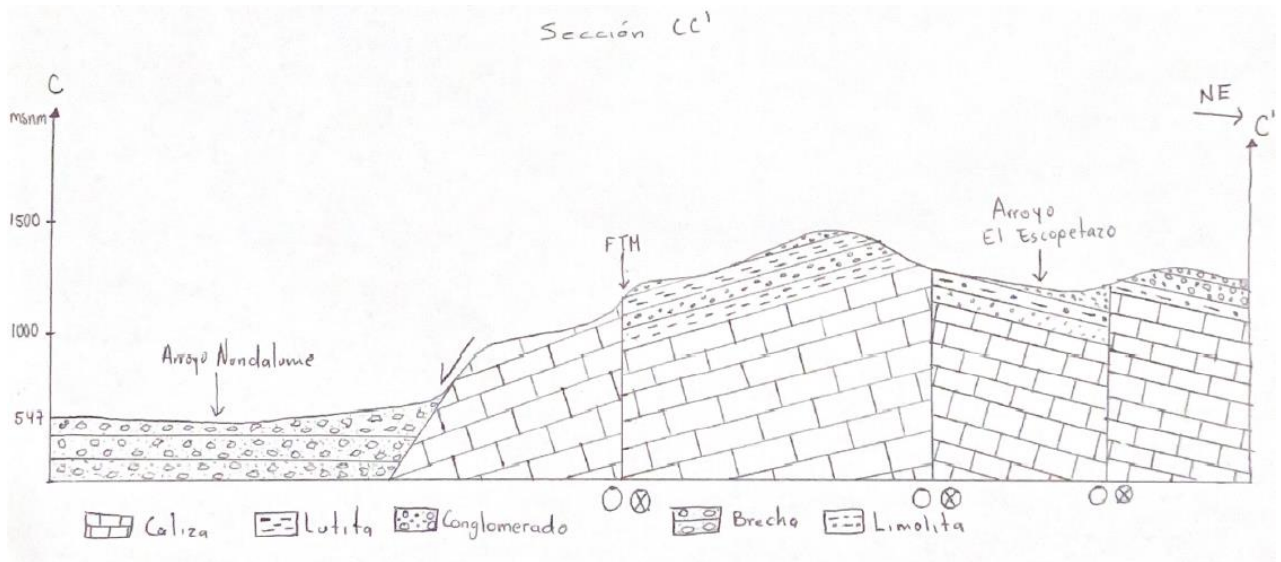
➤ **Sección AA'**



➤ **Sección BB'**

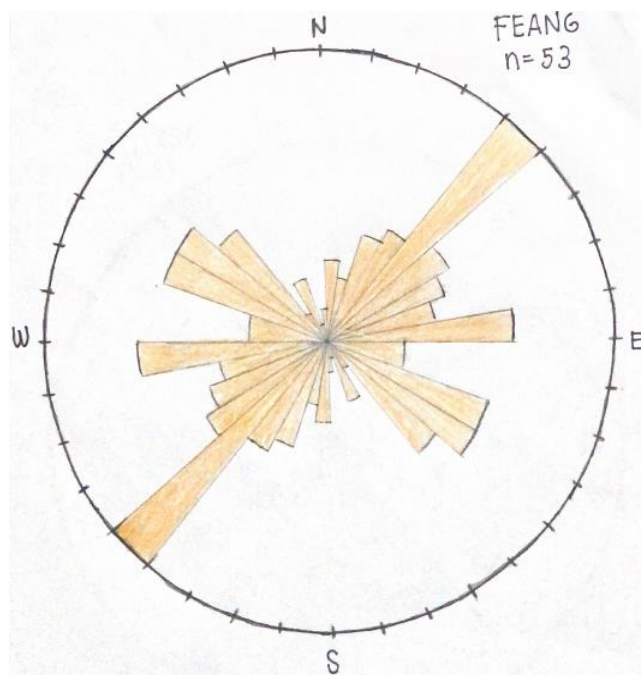


➤ Sección CC'



**Anexo VII. Rosa de fracturas de los lineamientos identificados en las cartas topográficas, realizadas mediante una falsilla polar**

➤ **Área Felipe Ángeles, Veracruz**



➤ **Área Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

