



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS EN MINAS, METALURGIA Y GEOLOGÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

CARACTERIZACIÓN CINEMÁTICA DE FRACTURAS Y
FALLAS EN EL TERRERO, GUANAJUATO, MÉXICO

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA

FÉLIX FERNANDO VALTIERRA MILLÁN

DIRECTOR

DR. EDGAR ÁNGELES MORENO

CO-DIRECTOR

DR. RAÚL MIRANDA AVILÉS

GUANAJUATO, GTO

DIC 2020-FEB 2021

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Roberto Valtierra Ramírez, Leticia Millán Álvarez y a mis abuelos J. Félix Valtierra Castillo, Paula Ramírez Hernández por brindarme lo necesario en sus manos y aún más, porque han estado siempre en tiempos difíciles, porque he alcanzado esta meta por ustedes, gracias por sus valiosos consejos, por ser motivación en mi niñez y juventud. Gracias por su amor y apoyo en todo momento.

En especial gracias a mi director de Tesis el Doctor Edgar Ángeles Moreno, por ser un gran profesor; gracias por su paciencia, dirección, conocimiento, apoyo y tiempo que me ha dado al seguir este trabajo de Tesis, que hemos culminado. Gracias por ser una fuente de motivación y ejemplo de pasión por la geología. Siempre se lo agradeceré.

A El Doctor Raúl Miranda Avilés que fungió como subdirector de este trabajo de tesis por compartir sus conocimientos, sus observaciones y por sus aportaciones en este trabajo.

Les agradezco a mis revisores, El Doctor Isidro Loza Aguirre, La Doctora poja Pooja Vinod Kshirsagar Y a El Maestro Juan José Martínez Reyes por sus enseñanzas durante la licenciatura, por el valioso tiempo en las revisiones y por sus aportaciones en este trabajo.

A mis profesores del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato por compartir sus conocimientos, tiempo, y por su convicción de enseñar. A mi hermana María Guadalupe Valtierra Millán, compañeros, amigos de la licenciatura por su apoyo, por ser parte de esta etapa y vivir juntos experiencias inolvidables

A mi Universidad de Guanajuato y la División de Ingenierías Campus Guanajuato por abrirme las puertas de su honorable casa de estudios. También por los espacios educativos en los que desarrolle mi licenciatura y por los excelentes profesores e investigadores que forman parte de esta gran universidad.

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

TÍTULO	PAG
1.INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES	2
1.3HIPÓTESIS	2
1.4 ZONA DE ESTUDIO	3
1.4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES	3
1.4.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	3
2. MARCO GEOLOGICO	5
2.1 SIERRA DE GUANAJUATO	5
2.2 NORTE DE LA VETA MADRE	7
2.3 ZONAS DE MERCURIO	8
3. METODOLOGÍA	9
3.1 INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL	10
3.2 MÉTODO CIENTÍFICO	11
3.3 FOTOINTERPRETACIÓN GEOLÓGICA	12
3.4 GEOLOGÍA DE CAMPO	13
3.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	14
3.5.1 CONSTRUCCIÓN MAPA GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL	14
3.5.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL EN CAMPO Y COLECTA DE DATOS ESTRUCTURALES	15
3.5.3 ORGANIZACIÓN DE DATOS ESTRUCTURALES	16
3.5.4 REPRESENTACIÓN DE DATOS ESTRUCTURALES Y ANÁLISIS	16
4.ESTRATIGRAFÍA	17
4.1 ANDESITA EL GIGANTE	19
4.2 TOBA EL TERRERO	21
4.3 TRAVERTINOS CALCÁREO-SILÍCEOS	23
4.4 UNIDAD DE RIODACITAS Y DACITAS	25
4.5 GRAVAS EL CAPULÍN	27
4.6 BASALTO EL GIGANTE-LA GIGANTA	28
5.GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	30
5.1 FALLA EL GIGANTE	30
5.2 FALLA EL TERRERO	31
5.3 FALLA EL HUIZACHAL	31
5.4 FALLAS NORMALES	33

5.5 FALLAS LATERALES	36
5.6 FALLAS INVERSAS	40
5.7 DIQUES ÍGNEOS	40
6. DISCUSIÓN	42
6.1 GENERACIONES DE ESTRUCTURAS DE DEFORMACIÓN Y FASES DE DEFORMACIÓN	42
6.1.1 FASE DE DEFORMACIÓN DF1	42
6.1.2 FASE DE DEFORMACIÓN DF2: FALLAS LATERALES	44
6.1.3 FASE DE DEFORMACIÓN EXTENSIONAL DF3	45
6.2 FALLAS INVERSAS	46
6.3 DIQUES	46
6.4 MINERALIZACIÓN Y ALTERACIONES HIDROTERMALES	47
7. CONCLUSIONES	48
ANEXOS	55
Anexo 1. Datos obtenidos en campo ordenados por tipo de estructura.	55
Anexo 2. Mapa geológico-estructural del área de El Terrero y alrededores	66

RESUMEN

La Sierra de Guanajuato forma parte de la parte sur de la Mesa Central y esta contiene el Distrito Minero de Guanajuato (DMG) que es considerado un distrito de clase mundial en la minería. En el DMG existen estudios relacionados a la mineralización, geología básica y exploración minera, sin embargo, estudios específicos y a escalas locales en geología estructural son escasos y más aún en la parte Norte de la Veta Madre, que es dónde se localiza el área de estudio denominada El Terrero. La caracterización geológica – estructural de semidetalle es importante porque se pueden establecer relaciones con eventos hidrotermales y de mineralización que en el DMG son de importancia para establecer vectores de exploración. Es por lo que el objetivo principal de este trabajo fue el de caracterizar la deformación y cinemática en la zona El Terrero, parte Norte de la Veta Madre de la Sierra de Guanajuato mediante la colecta y análisis estructural de datos de campo para conocer las características de la deformación en el área de estudio. Las metodologías empleadas para resolver el problema planteado y lograr los objetivos, fueron: investigación documental, cartografía geológica y geológico-minera, geología de campo, geología estructural, análisis estructural e integración de datos. Los resultados de este trabajo muestran que la zona de estudio El Terrero, contiene a las unidades: Andesita El Gigante, Toba El Terrero, Domos riolíticos y riodacíticos, andesitas (Cimientos) y basaltos-andesitas El Gigante. La Toba El Terrero es una secuencia de travertinos, capas silíceas, rocas piroclásticas de composición riodacítica y rocas sedimentarias.

Las características estructurales y cinemática de fallas y fracturas en el área permitieron se definieran tres fases de deformación, DF1, DF2 y DF3. La fase DF1 fue asociada a una de deformación extensional con direcciones de extensión NW-SE y NE-SW ligada con el emplazamiento de diques andesíticos cortando a la Andesita El Gigante y que es congruente con las orientaciones de la falla El Mateo NE-SW y la falla Veta Madre (NW-SE). Durante esta fase se formó la falla El Terrero que controló la distribución espacial del evento hidrotermal que formo los travertinos en la secuencia Toba El Terrero considerada de edad Oligoceno. La fase DF2 está definida por un fallamiento lateral de tipo Riedel con orientaciones de fallas N-S y NE-SW principalmente; que se relacionan con otras fallas normales, fallas inversas y diques de acuerdo con su cinemática. La sobreposición de estrías de falla normal (DF3) sobre estrías de fallas laterales (DF2) sugieren reactivación de las fallas laterales por fallas normales.

ABSTRACT

The Sierra de Guanajuato is in the southern part of the Mesa Central and it contains the Guanajuato Mining District (GMD) that is considered a world-class mining district. In the GMD many studies have been carried out related to mineralization, basic geology and mineral exploration, however, specific studies in local mapping scales about structural geology are scarce and even more so in the northern part of the Veta Madre where El Terrero is located. The characterization of regions at a semi-detail scale about structural geology is important because relationships can be established with hydrothermal and mineralization events which is important to establish exploration guides in GMD. That is why the main objective of this work was to characterize the deformation and kinematics in the El Terrero area. The methodologies used to solve the problem and achieve the objective were, documentary research, geological and geological-mining cartography, field geology, structural geology, structural analysis and data integration. The results of this work show that in the El Terrero area the units are: Andesite El Gigante, Toba El Terrero, rhyolitic and riodacitic domes, andesites (Cimientos) and basalt-andesites Cerro El Gigante. La Toba El Terrero is a sequence of travertines, siliceous layers, pyroclastic rocks with a riodacitic composition and sedimentary rocks.

The structural characteristics and kinematics of faults and fractures in the area allowed define three phases of deformation, DF1, DF2 and DF3. DF1 phase was associated with an extensional deformation with NW-SE and NE-SW extensional direction which were linked to the emplacement of andesitic dykes cutting El Gigante Andesite and which is congruent with the orientations of the El Mateo fault (NE-SW) and the Veta Madre fault (NW-SE). During this phase DF1, El Terrero fault was formed, which controlled the spatial distribution of the lately hydrothermal event that formed the travertines of Toba El Terrero and this phase of DF1 deformation is of Oligocene age. Phase DF2 is defined by a Riedel-type lateral faulting with fault orientations mainly N-S and NE-SW, which are related to other normal faults, reverse faults and dikes according to their kinematics. The superposition of normal fault striations (DF3) on lateral fault striations (DF2) suggest reactivation of lateral faults by normal faults associated to DF3.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El área de estudio, El Terrero, se encuentra dentro de la Sierra de Guanajuato (SG) y a su vez pertenece al Distrito Minero de Guanajuato (DMG). La SG es una cadena montañosa con elevaciones que van de 2000 a 3000 m s.n.m. y se considera desde el punto de vista geológico como un bloque estructural levantado (Nieto-Samaniego et al., 2005) y es el límite tectónico al sur de la Mesa Central. La zona El Terrero se encuentra al pie de los cerros El Gigante y La Giganta, en la parte Norte con respecto al rumbo de la Veta Madre y en las cercanías de la falla Mateo (falla El Gigante).

En la SG existen numerosas fracturas y fallas en su interior y límites (Ángeles-Moreno, 2018), pero muchas de estas estructuras de deformación (fracturas y fallas) no se han caracterizado totalmente desde el punto de vista cinemático y solo existen trabajos dispersos en algunas zonas de la SG (Nieto-Samaniego et al., 2012; Nieto-Samaniego et al., 2015; Ángeles-Moreno et al., 2018) y en la parte Norte del Distrito Minero de Guanajuato (DMG), lo que es el El Terrero, no hay datos estructurales de esta naturaleza.

La caracterización cinemática y comportamiento de la deformación son características de una determinada región que permiten establecer como las rocas de una región pudieron haber sido afectadas por diferentes fases de deformación y poder establecer relaciones posteriores con otras características geológicas y/o de mineralización como puede ser la estratigrafía de la región, eventos hidrotermales y zonas de permeabilidad. Los nuevos datos estructurales aportarán información para entender el comportamiento estructural en la parte Norte del DMG y en particular de la falla Veta Madre de la Sierra de Guanajuato.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 EL OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la deformación y cinemática de fracturas y fallas en la zona El Terrero, parte Norte de la Veta Madre de la Sierra de Guanajuato mediante la colecta y análisis estructural de datos estructurales de campo para conocer las características de la deformación en el área de estudio.

1.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

Reconocer estructuras geológicas importantes en la zona El Terrero mediante análisis imágenes de satélite de Google Earth y análisis de lineamientos estructurales a partir de la topografía.

Colectar datos de geología estructural básicos del área de estudio mediante uso de técnicas básicas de la geología estructural para posteriormente realizar un análisis estructural de la deformación.

Establecer con los resultados obtenidos de la deformación algunas fases de deformación de la zona y las posibles relaciones con los eventos hidrotermales de la zona mediante una integración de los resultados y compilación de trabajos previos que hayan tratado eventos de mineralización o alteraciones hidrotermales.

1.3 HIPÓTESIS

Las fracturas y fallas presentes en El Terrero muestran diferentes eventos de deformación que han ocurrido en las rocas y que pueden estar relacionadas espacialmente a algunos eventos de hidrotermalismo y zonas de alteración.

1.4 ZONA DE ESTUDIO

1.4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

El área de estudio se encuentra en una serie de cadenas montañosas con elevaciones que van de 2000 msnm a los 3000 msnm, las sierras presentan un rumbo general NW-SE, la topografía está formada por cerros y lomas alargadas ligeramente redondeadas.

El clima en el área es semidesértico, la temperatura media anual es de 18°C, siendo máximas de 34°C durante el mes de mayo y mínimas de -1°C en el mes de enero. El área de estudio se encuentra cubierta por una selva húmeda caducifolia que está siendo talada haciendo uso de especies como el encino y la pingüica (Echegoyén-Sánchez, et al., 1970).

1.4.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los estudios realizados en este trabajo se localizan dentro de la sierra de Guanajuato, específicamente en la parte central y en el norte del DMG.

El Terrero está ubicado en la parte central de la sierra de Guanajuato, donde aflora el Basamento Mesozoico de la Sierra de Guanajuato (BMSG) (Angeles-Moreno, 2018) y una cubierta de rocas de edad cenozoica, al norte del área de estudio se encuentran el Cerro El Gigante y el Cerro La Giganta, mientras que al sur se encuentra el Cerro Pelón y la Barranca Copenhague (Copenario) (Figura 1). Es importante señalar que también el área de El Terrero está ubicada 12 km al norte de la Veta Madre y 7 km al noreste de vetas de La Luz, tanto la Veta Madre como el sistema de vetas de La Luz tiene una orientación NW-SE.

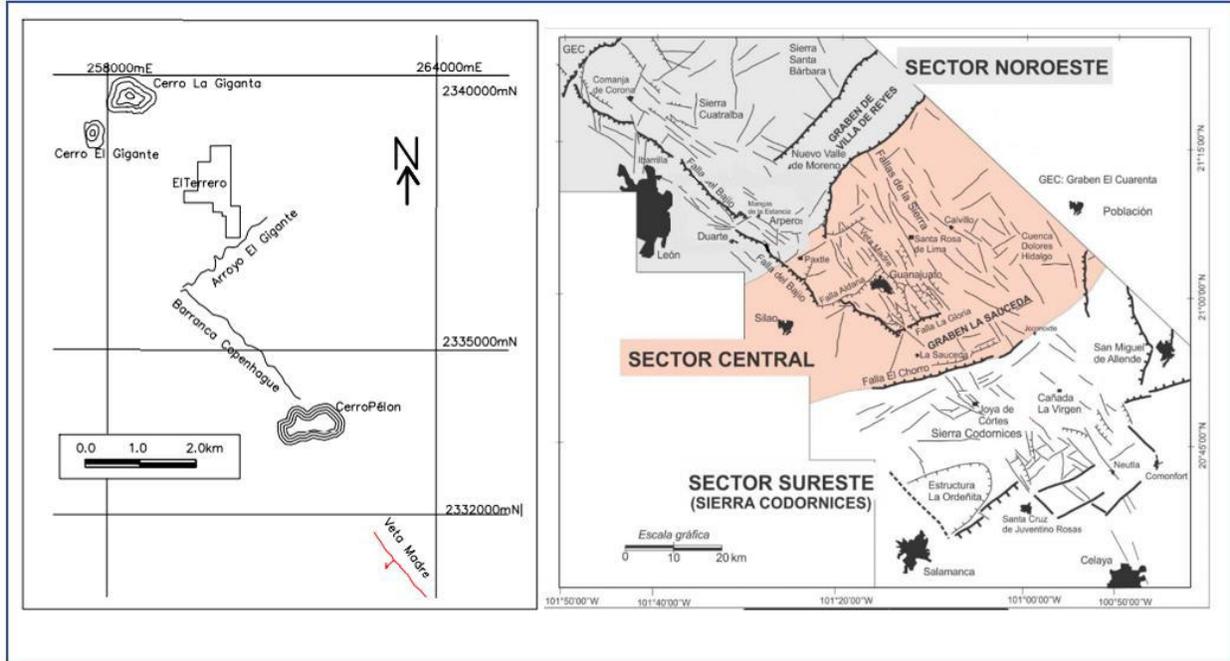


Figura.1 Mapa de ubicación del área de estudio, El Terrero, en la sierra de Guanajuato (mapa regional tomado de Ángeles-Moreno, 2018).

CAPÍTULO 2

MARCO GEOLÓGICO

2.1 SIERRA DE GUANAJUATO

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL DE LA SIERRA DE GUANAJUATO Y GENERALIDADES

La Sierra de Guanajuato forma parte de la Mesa Central y a su vez se localiza en un área donde se encuentran los límites de dos provincias fisiográficas y geológicas, la Sierra Madre Occidental (SMO) y el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) (Figura 2.1).

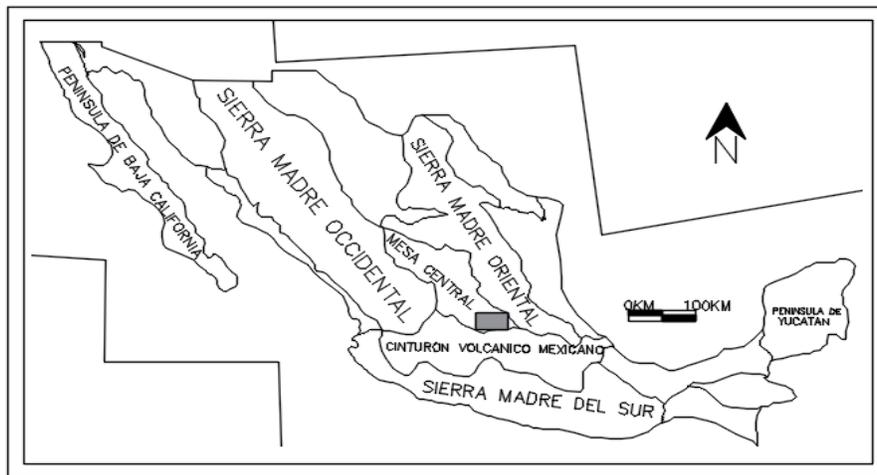


FIGURA 2.1 Ubicación Regional de la Mesa Central (Nieto-Samaniego et al, 1992).

En la Sierra de Guanajuato están expuestas las secuencias volcánicas de la Sierra Madre Occidental (SMO) y CVM. Las secuencias volcánicas de la SMO contienen principalmente ignimbritas silíceas y lavas riolíticas con edades del Oligoceno y Mioceno. Las secuencias de rocas del arco volcánico continental (CVM) son consecuencia de actividad magmática que inicio en el Mioceno medio y que están representadas por campos volcánicos de lava máfica, flujos de composición basáltica y basáltica-andesítica., así como por estratovolcanes de composición andesítica y dacítica (Nieto-Samaniego et al.,1992; Aranda-Gómez et al., 1989).

De acuerdo con Martínez-Reyes (1992), la SG está constituida por rocas de diferente composición y origen, el rango de edad que abarca es variable; se han dividido en dos paquetes litoestratigráficos: mesozoico y cenozoico. Las rocas mesozoicas están conformadas en dos

secuencias: rocas de origen oceánico y rocas volcánicas depositadas en ambientes marinos. El paquete cenozoico lo componen rocas de origen continental clásticas y volcánicas.

De acuerdo a Aranda-Gómez et al (1989), las rocas expuestas en la superficie de la sierra de Guanajuato se pueden dividir en dos sucesiones estratigráficas, un basamento mesozoico y una secuencia volcanosedimentaria de edad cenozoica. El batolito granítico es de edad del Eoceno temprano (51 ± 1.3 Ma, K-Ar, Stein et al., 1994 en Aranda-Gómez et al., 1989) es incluido en la secuencia cenozoica. El contacto entre estas sucesiones esta marcado por una disconformidad angular, ya que el complejo basal presenta estructuras de deformación formadas durante el Cretácico temprano -Eoceno temprano y con un metamorfismo de facies de esquistos verdes mientras que la secuencia cenozoica no esta metamorfoseada y no plegada.

En la Sierra de Guanajuato (SG) se han realizado trabajos estructurales y estos han considerado a las fallas de tipo extensional (Nieto-Samaniego et al., 1992, 2012, 2015), sin embargo, se han observado en muchas de ellas relieves con estrias de fallas inclinadas; uno de los casos mas relevantes es la Veta Madre, que es una falla normal a la que se le determinó un desplazamiento vertical de 1500 metros, y en la que se observa en algunos lugares estrias con valores de *pitch* de 0° a 45° ., estos valores sugieren que han existido movimientos con una componente a rumbo de las estructuras. Los basculamientos sufridos por algunas unidades litológicas son pequeños, es expresado por la posición con respecto a la horizontal de las capas y en algunas capas están en posición horizontal o inclinaciones menores a 10° , lo que indica que las fallas posiblemente no sean lístricas (Nieto-Samaniego et al., 2015).

De acuerdo a Nieto-Samaniego et al. (1992), la Sierra de Guanajuato esta formada por doce bloques mayores cuyos limites son fallas normales, y los movimientos verticales en la sierra han provocado cuando menos en los eventos mas recientes corrimientos sobre los limites de los bloques. Estos movimientos fueron los responsables de su configuración estructural y morfológica actual (Nieto-Samaniego et al., 1992).

ESTRATIGRAFÍA DE LA SIERRA DE GUANAJUATO

La Sierra de Guanajuato (SG) está formada por un basamento mesozoico con rocas volcanosedimentarias y volcánicas, y rocas ígneas intrusivas (Echegoyen-Sánchez et al., 1970; Martínez-Reyes, 1992). Las rocas volcanosedimentarias presentan metamorfismo en facies esquistos verde y estructura de foliación (Martini et al., 2011); estas rocas son denominadas

Formación Esperanza (Echegoyen-Sánchez et al., 1970). Las rocas volcánicas mesozoicas comprenden metabasaltos y metandesitas que se denominan la Formación La Luz (Echegoyen-Sánchez et al., 1970). El Basamento Mesozoico es sobreyacido por rocas cenozoicas que van en edades del Eoceno al Cuaternario (Ángeles-Moreno, 2018). En el Eoceno está representado por el Conglomerado Guanajuato (Edwards, 1956) y el Granito Comanja que fue fechado en cerca de 51 Ma (Ángeles-Moreno et al. 2018). Después en la columna de acuerdo con Echegoyen-Sánchez et al. (1970) siguen las formaciones: Loseros, Bufa, Calderones, Cedro y Riolita Chichíndaro. La Formación Loseros está compuesta de tobas y areniscas volcánicas sin embargo Puy-Alquiza et al (2014) muestra que esta formación es de ambiente sedimentario y relacionada al Conglomerado Guanajuato. No hay edades isotópicas de esta unidad, pero la posición estratigráfica indica una edad del Eoceno ya que se encuentra sobre el conglomerado Guanajuato y debajo de la Formación Bufa (Nieto-Samanieto et al., 2015). La Formación Bufa está compuesta de tobas y riolitas que fueron definidos como flujos piroclásticos, esta unidad ha sido fechada con edades de 33.53 ± 0.48 Ma (Ar-Ar en sanidino) (Nieto-Samaniego et al., 2015). La Formación Calderones está constituida de areniscas, conglomerados, tobas y brechas (Echegoyen-Sánchez et al., 1970), esta unidad ha sido fechada con edades de 31.33 ± 0.29 Ma. (Ar-Ar en sanidino) (Nieto-Samaniego et al., 2015). La Formación Cedro formada de derrames de andesita (Echegoyen-Sánchez, 1970) y esta unidad ha sido fechada con edades de 32.20 ± 0.91 Ma (U-Pb en zircones) (Nieto-Samaniego et al., 2015). La Riolita Chichíndaro está formada de lavas riolíticas, brechas volcánicas y depósitos piroclásticos (Echegoyen-Sánchez et al., 1970), esta unidad ha sido fechada con edades de 30.1 ± 0.8 Ma y 30.8 ± 0.8 Ma (K-Ar en sanidino) (Nieto-Samaniego et al. 1996).

2.2 NORTE DE VETA MADRE

De acuerdo con Wandke (1928), la falla Veta Madre se extiende alrededor de 25 km a lo largo de su traza. La falla Veta Madre comienza al sureste de Guanajuato y continua como una falla rotacional aumentando el número de estructuras hacia la parte noroeste. En el norte de Veta Madre se han descrito fallas inversas con un echado de 70° a 80° hacia el oeste en contraste con las fallas normales con echado de 40° a 60° (Echegoyén-Sánchez et al., 1970).

En la parte Norte del Distrito Minero de Guanajuato se encuentran los sistemas principales de fallas mineralizadas, los sistemas La Luz, Veta Madre y vetas de la Sierra. Las fallas grandes y vetas en la parte Norte tienen rumbos paralelos a la falla Veta Madre. Se han reportado que la mineralización ocurre dentro de estos sistemas principalmente en fallas normales orientadas

paralelamente a la tendencia principal (Beare y Sostre, 2008). De acuerdo con trabajos mineros en la zona de Bolañitos (Beare y Sostre, 2008) se están explorando zonas hacia el noreste donde se observan vetas (Puertecito) que es paralela a veta de La Luz.

2.3 ZONAS DE MERCURIO

De acuerdo a Wittich (1909), durante el siglo dieciocho y diecinueve se desarrollaron minas en la Sierra de Guanajuato con las mismas profundidades que las minas bolañitos (la luz) donde se encontraron vetas metalíferas de cobre, bismuto, cinabrio etc. Los hallazgos de especies minerales se encontraron en arroyos y tienen un origen secundario provenientes de rocas cristalinas.

El Dr. Ernest Wittich (1909) divide a las especies minerales encontradas en la sierra de Guanajuato de acuerdo a la forma como se encontraron.

1. Minerales de rocas cristalinas.
2. Minerales de aluviones.
3. Minerales de vetas.
4. Minerales depositados por manantiales termales.

De acuerdo con Wittich (1909) los minerales de mercurio se hallan al pie del Cerro El Gigante y del Cerro de la Cabra, en vetas emplazadas en las (tobas basálticas El Gigante) con sulfuros metálicos, en donde algunos minerales de cinabrio están en vetas. Otros minerales que describe Wittich, son cinabrio, pirita, hematita y cuarzo como matriz.

Menciona Wittich (1909) que la zona de El Gigante fue una de las minas con mayor producción de mercurio durante la primera guerra mundial en México. En el área de estudio los lugareños reportan catas y pequeños socavones con la presencia de sílice de color rojo con posiblemente mercurio.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados en este trabajo de tesis se emplearon las siguientes metodologías: Investigación documental, método científico, fotointerpretación geológica, geología de campo, geología estructural y la integración de los resultados (ver figura 3.1 de esquema metodológico).

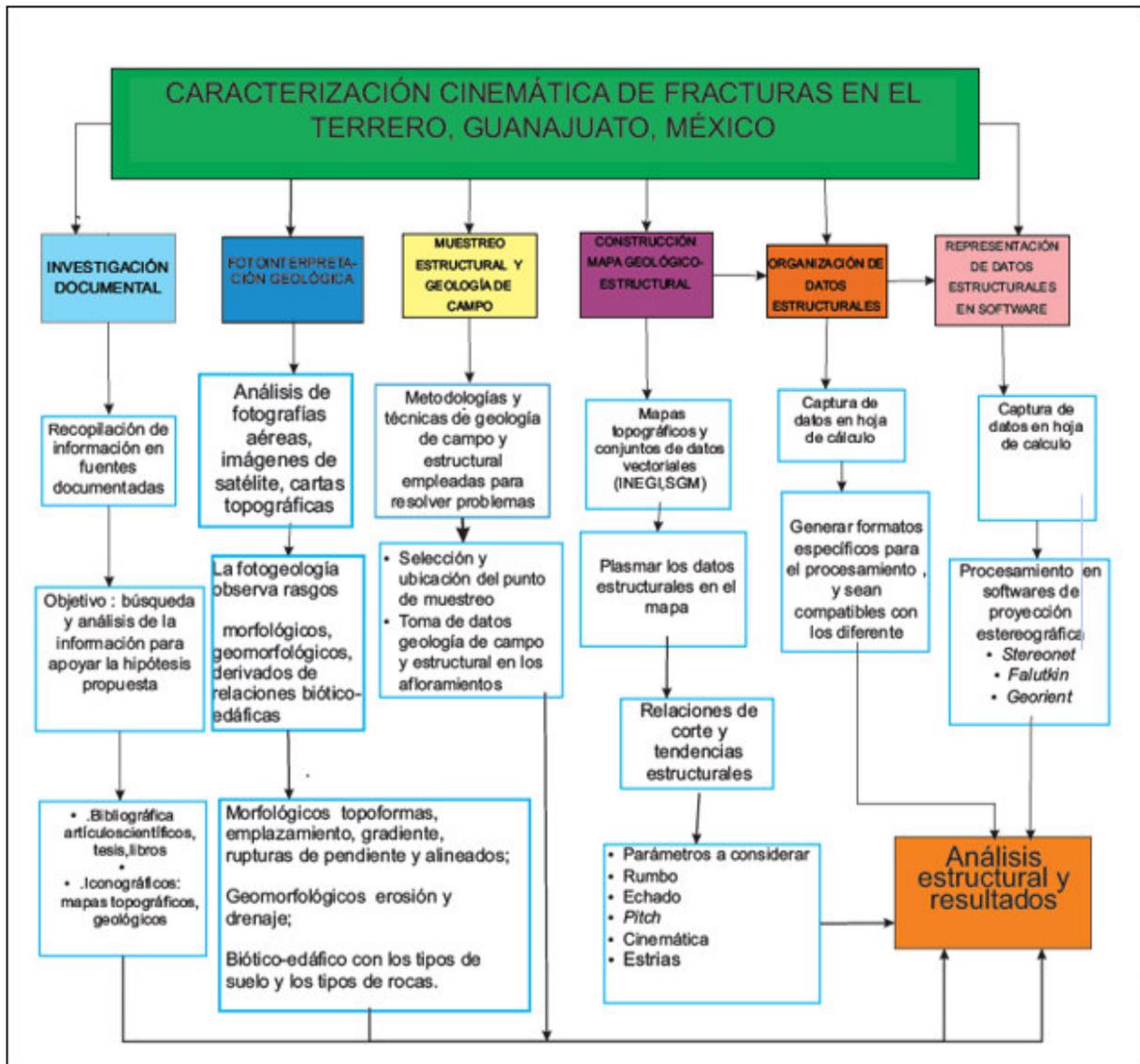


Figura 3.1 Esquema metodológico que muestra la secuencia de metodologías, actividades y algunos parámetros empleados en este trabajo de tesis y algunas actividades.

3.1 INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

De acuerdo con Máxima Uriarte (2020), la investigación documental es definida como aquella que procura obtener, seleccionar, compilar, organizar, interpretar y analizar información sobre un objeto de estudio a partir de fuentes documentales, tales como libros, documentos de archivo, hemerografía, registros audiovisuales, artículos, entre otros. Entre las características más importantes de la investigación documental, podemos mencionar las siguientes: Obtiene datos a partir de la revisión de documentos de diferente tenor, organiza los datos recolectados de manera coherente, permite redescubrir o reinterpretar diferentes aspectos de una materia, ayuda a identificar vacíos, omisiones o tergiversaciones en las fuentes de referencia anteriores, sugiere nuevas perspectivas y/o teorías de análisis a partir de la información obtenida, requiere capacidad de síntesis, deducción y análisis, y por último brinda solidez a las conclusiones del investigador. La investigación documental en este trabajo de tesis permitió delimitar el tema, plantear el problema y su justificación, y establecer con claridad los objetivos.

Para la delimitación del área del interés (Figura 3.2) se parte de la aplicación de la investigación documental que en específico para este trabajo se revisó la bibliografía existente referente a el conocimiento existente de geología estructural y tectónica para el área de El Terrero. Así también se realizó un análisis de trabajos publicados en la literatura, se usó la Carta Geológica-Minera de Guanajuato con clave F14-C43 y escala 1: 50,000 del Servicio Geológico Mexicano (Alvarado-Méndez et al., 1998), el mapa geológico de la Sierra de Guanajuato (Martínez-Reyes, 1992) y la carta topográfica Guanajuato a escala 1:50,000 del INEGI con clave F14-C43. Esta información sirvió para la delimitación y además de conocimientos previos del grupo Académico de Geología del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato en el área, como también la ubicación de afloramientos de calidad y con fácil acceso para observar las diferentes estructuras y litologías de interés para realizar el presente trabajo.

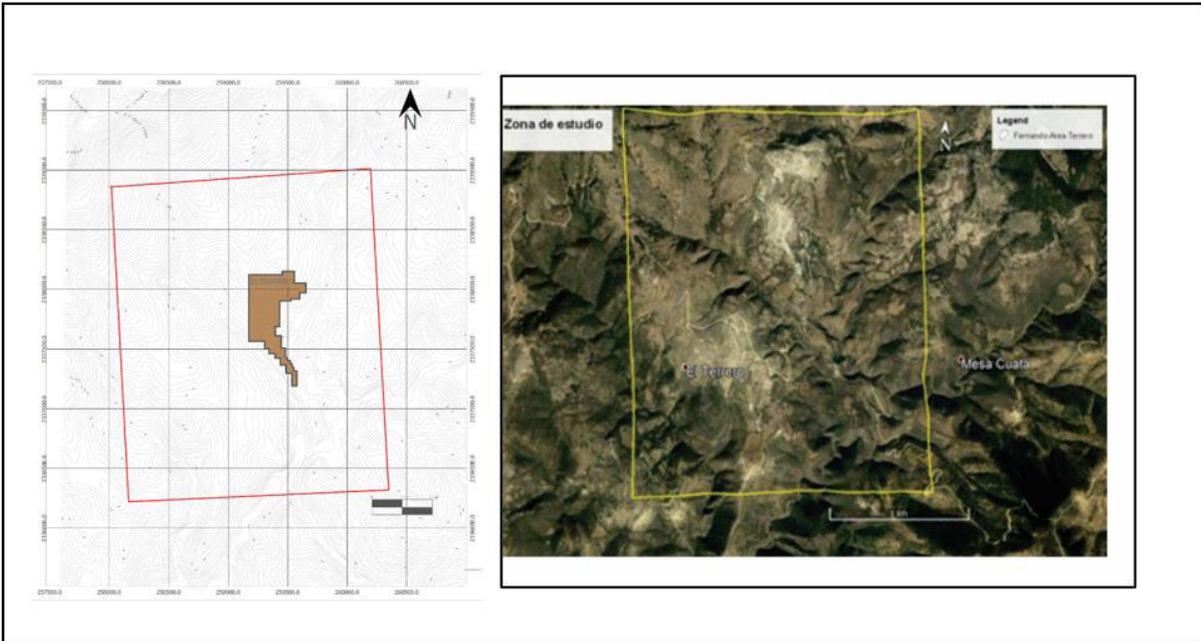


Figura 3.2 Área de estudio en la que se realizó este trabajo.

Después de realizar la investigación documental se pudo conocer los huecos faltantes en la geología básica de la región y se ve que es necesario un conocimiento geológico-estructural en el área seleccionada.

La información documental analizada en este trabajo comprende partes de trabajos geológicos de la Sierra de Guanajuato que han sido publicados en varios artículos que se han citado en el marco geológico. Estas referencias fueron obtenidas por la investigación personal.

3.2 MÉTODO CIENTÍFICO

El método científico es entendido como una serie de pasos que llevan al descubrimiento de un nuevo conocimiento (López-Cano, 1998). Estos pasos van desde la observación, planteamiento del problema, objetivos, hipótesis, una metodología, hacer una experimentación, tener los resultados y probar la hipótesis. En este trabajo de tesis de hecho esta estructurado con base en el método científico. La observación implica en el área de estudio que hace falta un conocimiento geológico-estructural para entender las relaciones con la formación de las rocas en el área. Esto llevo a plantear la hipótesis descrita en este trabajo y los objetivos del presente trabajo. La experimentación ya fue dada en la naturaleza ya que en la geología muchos de los experimentos

ya fueron realizados por la naturaleza y se investigan estas causas de las observaciones geológicas.

3.3 FOTOINTERPRETACIÓN GEOLÓGICA

La fotogeología es una disciplina de la geología que tiene como objetivo el estudio de la conformación geológica de una región a partir del análisis de imágenes fotográficas (Silva-Romo et al., 2001). El estudio fotogeológico contribuye al trabajo de la cartografía geológica (Silva-Romo et al., 2001). La fotointerpretación geológica se realiza a partir del análisis de fotografías aéreas, imágenes de satélite, cartas topográficas. De acuerdo a Guerra-Peña (1980) y Silva-Romo et al (2001) existen varios criterios fotogeológicos derivados de varios tipos de rasgos. Los rasgos pueden ser de objetos fotografiados o percibidos por los sensores remotos, rasgos morfológicos, rasgos geomorfológicos, rasgos derivados de las relaciones biótico-edáficas. Los criterios para la parte de las características de los objetos percibidos por los sensores remotos pueden ser forma, tamaño y sombra; existen criterios de fotografía como tono y textura, para los criterios de rasgos morfológicos son las topoformas, emplazamiento, gradiente, rupturas de pendiente y rasgos alineados; criterios geomorfológicos como erosión y drenaje; y por último los criterios biótico-edáfico como la correspondencia entre los tipos de vegetación con los tipos de suelo y los tipos de rocas.

Los criterios para establecer un primer mapa litológico con lineamientos estructurales desde gabinete fueron los propuestos por Guerra-Peña (1980) y Silva-Romo et al. (2001) y con base en criterios morfológicos se estableció una Interpretación de lineamientos estructurales. La fuente para aplicar estos criterios fueron las imágenes de territorio de Google Earth que comprenden imágenes de satélite, fotografías aéreas, información geográfica de datos de SIG y modelos creados por computadora. Muchas de las imágenes de satélite son de la plataforma LANDSAT.

La interpretación de los lineamientos estructurales y la fotointerpretación geológica lleva a la construcción de un mapa geológico fotointerpretado a escala 1: 10 000. En este mapa se expresan los lineamientos estructurales denotados por cañadas, laderas, cimas de montañas o cambios de pendiente.

3.4 GEOLOGÍA DE CAMPO

La geología de campo vista como una metodología comprende una serie de técnicas inherentes a la geología que están basadas en las ciencias que forman a la geología básica como la estratigrafía, petrología, mineralogía, cartografía geológica y geología estructural. Estas técnicas inherentes a cada una de las ciencias de la geología van desde la cartografía geológica con varias técnicas y métodos. Como el método de tres puntos, gráficas de superficies geológicas, cortes geológicos, etc., así también por ejemplo en la estratigrafía están los levantamientos de esquemas y columnas estratigráficas.

La geología de campo de acuerdo con Compton (1985), permite resolver problemas geológicos cuando se establecen relaciones entre los materiales que forman la Tierra, y con otros rasgos naturales. Así también las interpretaciones realizadas en el campo se pueden comprobar inmediatamente con las predicciones que las relaciones predicen y el estudio de las relaciones de materiales y estructuras pueden llevar al descubrimiento de nuevas relaciones, y esto llevará a nuevas ideas.

De acuerdo a Silva-Romo et al. (2001), el objetivo fundamental del trabajo geológico de campo es la ratificación o rectificación de las hipótesis de trabajo que se plantea el geólogo a partir del análisis de las diversas fuentes documentales.

En este trabajo y a partir de la aplicación de los criterios geológicos en la geología de campo, se programaron varias salidas de campo recorriendo veredas, caminos de terracería, arroyos y serranías del área de estudio. Esto permitió estudiar los distintos afloramientos rocosos de interés. En algunas ocasiones se pudieron corroborar fotointerpretaciones geológicas de gabinete que se habían interpretado del área de estudio.

Los puntos de observación y la ubicación de los afloramientos rocosos se realizaron utilizando un receptor GPS (*Global Position System*) marca Garmin y apoyándose de software especializado en navegación y georreferenciación satelital como Google Earth.

La sistemática para la toma de datos geológico-estructurales en el trabajo geológico de campo comprendió:

1 Ubicación GPS del punto.

2 Descripción litológica.

3 Toma de datos estructurales en las fallas, fracturas, foliación etc.

3.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La geología estructural de acuerdo a Fossen (2005), se define como la ciencia que estudia la geometría, distribución y formación de estructuras. En este trabajo se entiende a la geología estructural como parte de la geología que estudia el origen, formación y las relaciones cinemáticas y dinámicas entre las estructuras de deformación (como son pliegues, lineaciones, foliaciones y fracturas). En este trabajo se enfocó a el estudio de las estructuras frágiles como fallas y fracturas en el área de estudio.

La geología estructural como ciencia tiene varias metodologías y técnicas que son intrínsecas y propias de esta área como pueden ser métodos geométricos, cuantitativos y cualitativos. En este trabajo de tesis se aplicó los métodos geométricos como relaciones entre planos y líneas, así como el método inverso en el estudio de la cinemática de la deformación. A continuación, se muestran las etapas de la parte de geología estructural que se siguieron para estudiar las fracturas y fallas en el área, estas etapas comprenden: construcción de un mapa geológico-estructural, geología estructural de campo, el muestreo de datos estructurales, organización de datos estructurales, representaciones gráficas de datos estructurales y el análisis estructural.

3.5.1 CONSTRUCCIÓN MAPA GEOLOGICO- ESTRUCTURAL

Para la construcción del mapa geológico estructural se tomó como mapa base la carta topográfica F14-C43 del INEGI a diferentes escalas con el manejo de un SIG (sistema de información geográfica). La escala manejada es 1:10,000 y para detalles se realizaron a escala a 1:5,000. El mapa geológico-estructural se construyó en gabinete con el apoyo de la metodología de la fotointerpretación geológica.

Los lineamientos de posibles fracturas se registraron en el mapa base. Estos lineamientos se interpretaron a partir de las imágenes de satélite de Google Earth.

3.5.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL EN CAMPO Y COLECTA DE DATOS ESTRUCTURALES

En esta etapa la geología estructural y geología de campo consistió en identificar las estructuras geológicas. Del tipo estructuras de deformación, esto se realizó estudiando los afloramientos rocosos. Los afloramientos aparecieron a lo largo de veredas, caminos y arroyos en el área de estudio. Las estructuras de deformación que se identificaron fueron: fracturas, fallas, foliación, clivajes de fractura y estrías. También estructuras sinsedimentarias se identificaron como pliegues sinsedimentarios y se colectaron datos de ejes de pliegue y flancos de pliegue. Estructuras primarias como contactos de estratificación, discordancias entre unidades litológicas, contactos de diques y diques ígneos, también se registraron.

Para cada afloramiento se realizó la observación en su conjunto y a detalle, esto permitió definir las estructuras principales de las secundarias y las estructuras de deformación. Posteriormente se realizó la descripción de las geometrías de las rocas y las estructuras en el afloramiento tomando en cuenta la orientación, dimensiones, color de roca, intemperismo y alteraciones.

Estos datos colectados se registraron en la libreta de campo y con base en su escala de tamaño se representaron gráficamente en el mapa geológico-estructural elaborado en gabinete.

La colecta de datos estructurales consistió en el empleo de la brújula tipo Brunton y teniendo la ubicación de los puntos de observación geológica fueron con receptor GPS en coordenadas UTM zona 14N -WGS84. Los datos estructurales colectados fueron: rumbo, echado, pitch y cinemática (en caso de tener estrías de falla) de las fallas, fracturas y vetillas. Los datos fueron documentados en las distintas unidades litológicas tales como la andesita ("El Gigante) sedimentarias y volcánicas ("Toba El Terrero").

3.5.3 ORGANIZACIÓN DE DATOS ESTRUCTURALES

Los datos estructurales tomados en campo se registraron en la libreta de campo con el formato azimutal para posteriormente ser vaciados en hojas de cálculo Excel para su posterior análisis e interpretación.

Los datos estructurales al ser vaciados a la hoja de cálculo (Excel) se organizaron en un formato específico para poder procesarlos en softwares de proyección estereográfica. Se usaron programas de cómputo (software) como Fault Kin (Allmendinger et al., 2012) y Stereonet (Allmendinger et al., 2012).

Para evitar errores en los softwares en la base de datos se verificó que los datos fueran compatibles desde el punto de vista de las orientaciones y de las relaciones básicas geométricas entre los elementos de rumbo, echado, pitch, dirección de echado y plunge (ver tabla 1 en anexo 1).

3.5.4 REPRESENTACIÓN DE DATOS ESTRUCTURALES Y ANALISIS ESTRUCTURAL

Para algunos datos estructurales se emplearon los diagramas de red estereográfica de stereonet para mostrar las orientaciones preferenciales de elementos de líneas o planos. Estos resultados son mostrados en la parte de resultados de este trabajo de tesis. El análisis estructural consiste en establecer las relaciones geométricas entre las distintas estructuras de deformación así descubrir las relaciones geométricas del análisis de la cinemática entre las estructuras como fallas y estrías.

CAPÍTULO 4 ESTRATIGRAFÍA

En el área de El Terrero se reconocieron varias unidades litológicas como: son las unidades Andesita El Gigante, Toba El Terrero y travertinos, domos riolácíticos y dacíticos, gravas El Capulín y basaltos El Gigante y La Giganta. La columna estratigráfica del área de estudio se muestra en la figura 4.1. En la columna se agregaron las: Gravas “El Capulín” y basaltos “El Cubilete” ya que se correlacionan los basaltos de la parte superior del Cerro El Gigante con estos basaltos El Cubilete. En este capítulo se describen estas unidades litológicas.

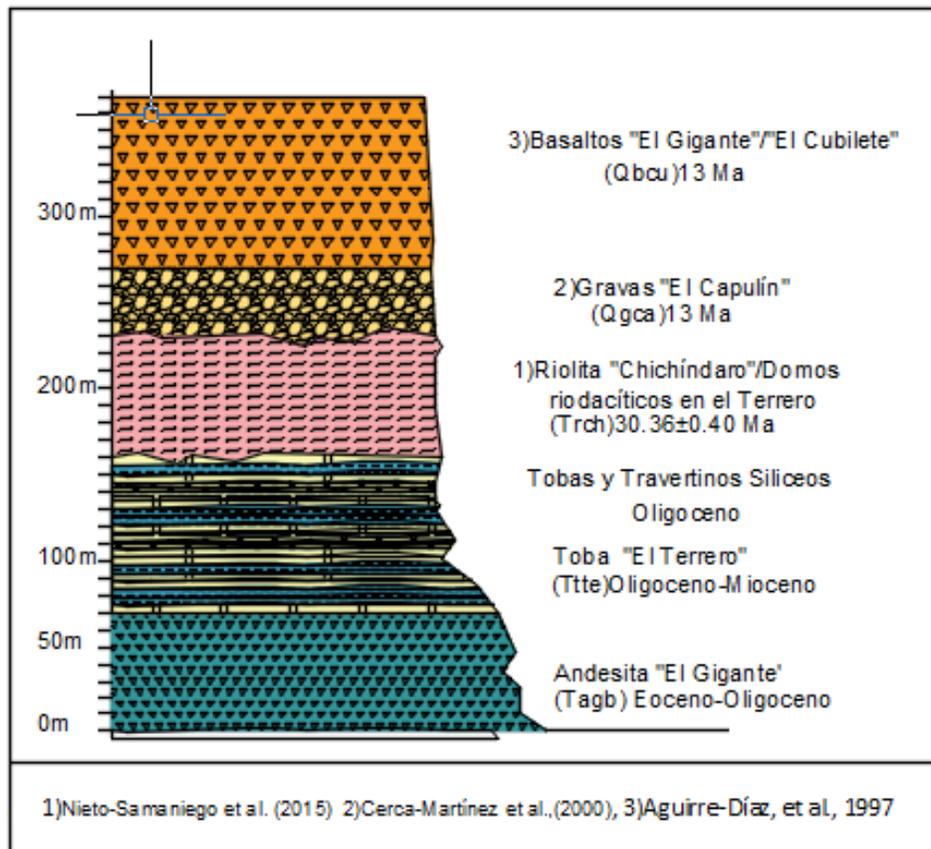


Figura 4.1 Columna estratigráfica del área de estudio “El Terrero”.

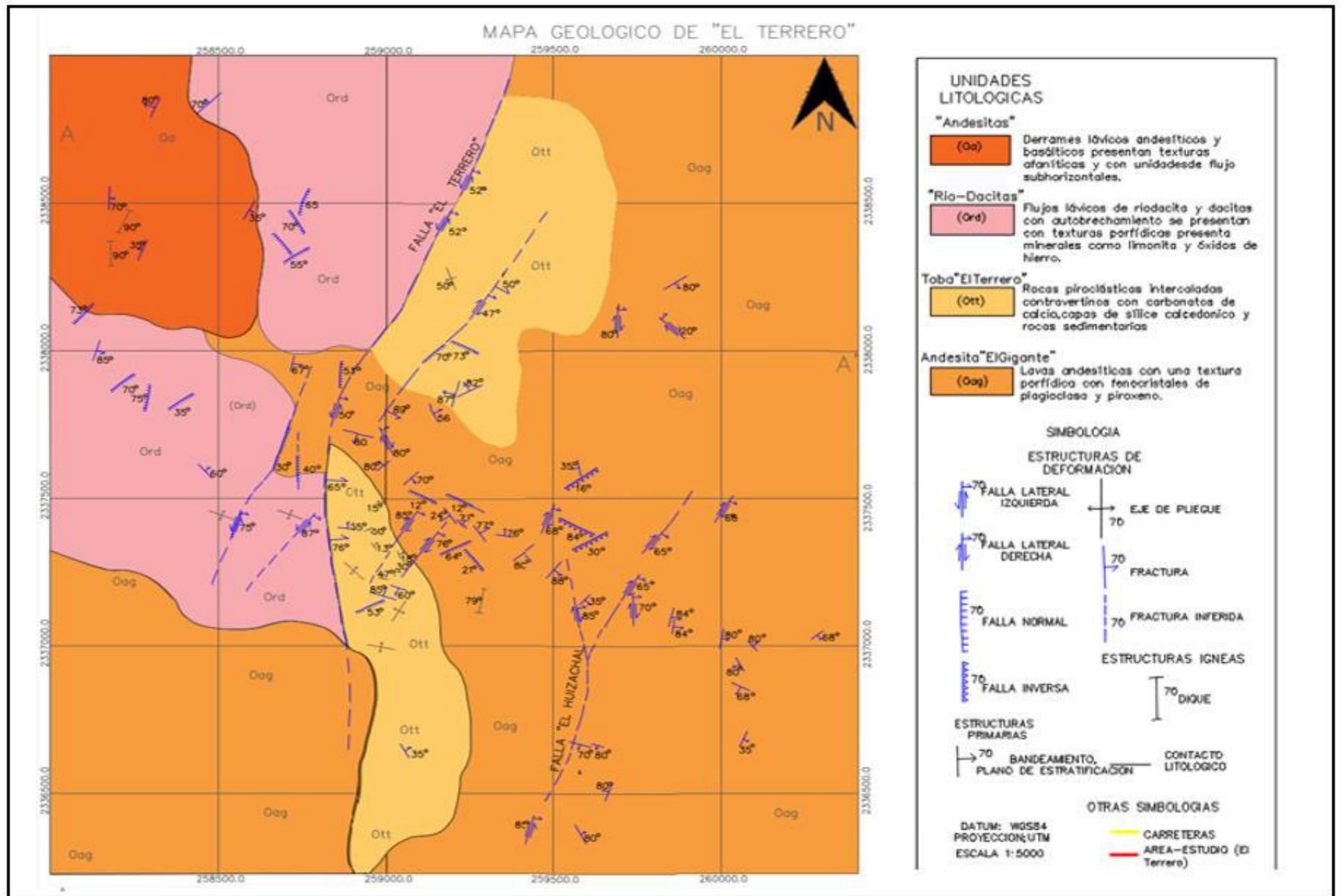


Figura 4.2 Mapa Geológico-Estructural del área de estudio "El Terrero".

4.1 ANDESITA EL GIGANTE

Antecedentes

Esta unidad se ubica en la parte norte de la Veta Madre y a lo largo del arroyo El Gigante, así como en los alrededores del poblado de “El Terrero”. Descrita por primera vez por Nieto-Samaniego (1985) recibiendo el nombre de Andesita Presa de Manantiales por la semejanza con esta andesita ubicada en las cercanías del graben de la Sauceda, posteriormente fue descrita por Martínez-Reyes (1992) como Andesita El gigante-Bernalejo.

Martínez-Reyes (1992), la describió como lavas andesíticas con abundantes cristales de plagioclasa, augita y hornblenda.

Litología

En el área de estudio esta unidad presenta una composición andesítica, con una textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y piroxeno. Tiene una estructura masiva y posible carácter hipabisal con un color grisáceo oscuro en el afloramiento (Figuras 4.1, 4.2 y 4.3).

Esta unidad también se observa en algunas partes como una andesita porfídica a afanítica con cristales de piroxenos grandes (0.5-1.5cm) con presencia de vetillas de calcedonia y clorita; y en algunos lugares es cortada por diques máficos. Presenta un espesor mínimo de 75 m de acuerdo a la cartografía geológica de campo.

Geometría

En el área de estudio esta unidad presenta derrames tabulares, muy fracturada y presenta una tendencia de planos de foliación NW-SE con echados de 40-20 grados al NE. Los datos estructurales observadas en campo tienen diferentes y variadas orientaciones debido a que la roca está muy fracturada.

Relaciones estratigráficas y geocronología

En trabajos anteriores no se menciona las relaciones de contacto con las rocas metamórficas del Mesozoico de la Sierra de Guanajuato, pero se considera más joven esta unidad por sus características litológicas y por su equivalencia con la andesita El Cedro y la andesita Bernalejo (Martínez-Reyes, 1992).

En este trabajo se observa que el contacto de la andesita El Gigante con la Tonalita Cerro Pelón (parte del basamento mesozoico de la Sierra de Guanajuato) (Martínez-Reyes, 1992) es por falla que ha sido nombrada en trabajos mineros como falla El Mateo o falla El Gigante (Ángeles-Moreno, 2018). Y es sobreyacida por los flujos lávicos la unidad de domos riódacíticos y dacíticos, así como es sobreyacida en una discordancia erosional por la unidad de Toba El Terrero (Figura 2).

Martínez-Reyes (1992) reportó la andesita El Gigante como una roca de edad terciaria. Botero-Santa (2011), fechó a la andesita Bernalejo en el área de Comanja de Corona en 31.35 ± 0.35 Ma (U-Pb, en zircón), esta parte se menciona porque Martínez-Reyes (1992) correlaciona litológicamente la andesita El Gigante con la andesita Bernalejo.

Correlaciones estratigráficas

Esta unidad fue correlacionada litológicamente y por posición estratigráfica por Martínez-Reyes (1992) con la andesita Bernalejo del área de Comanja de Corona, Jalisco. Ángeles-Moreno (2018) realizó un análisis estratigráfico a raíz de nuevos fechamientos que obtuvo en la sierra de Guanajuato y correlaciona a la andesita El Gigante con la andesita El Cedro, andesita Bernalejo y una serie de ignimbritas que denominó Alfaro de cerca 31.56 ± 0.25 Ma (U-Pb en zircón).

Origen

Una interpretación para el origen de las andesitas oligocénicas fue inferida por Martínez-Reyes y que sugirió la presencia de un vulcanismo máfico de tipo intraplaca en el centro de México. Martínez-Reyes et al (2012), sugiere que estas rocas son una manifestación de vulcanismo del Paleógeno intraplaca, apareciendo como vulcanismo intercalado entre los derrames ignimbríticos oligocénicos cubierto por rocas riolíticas.

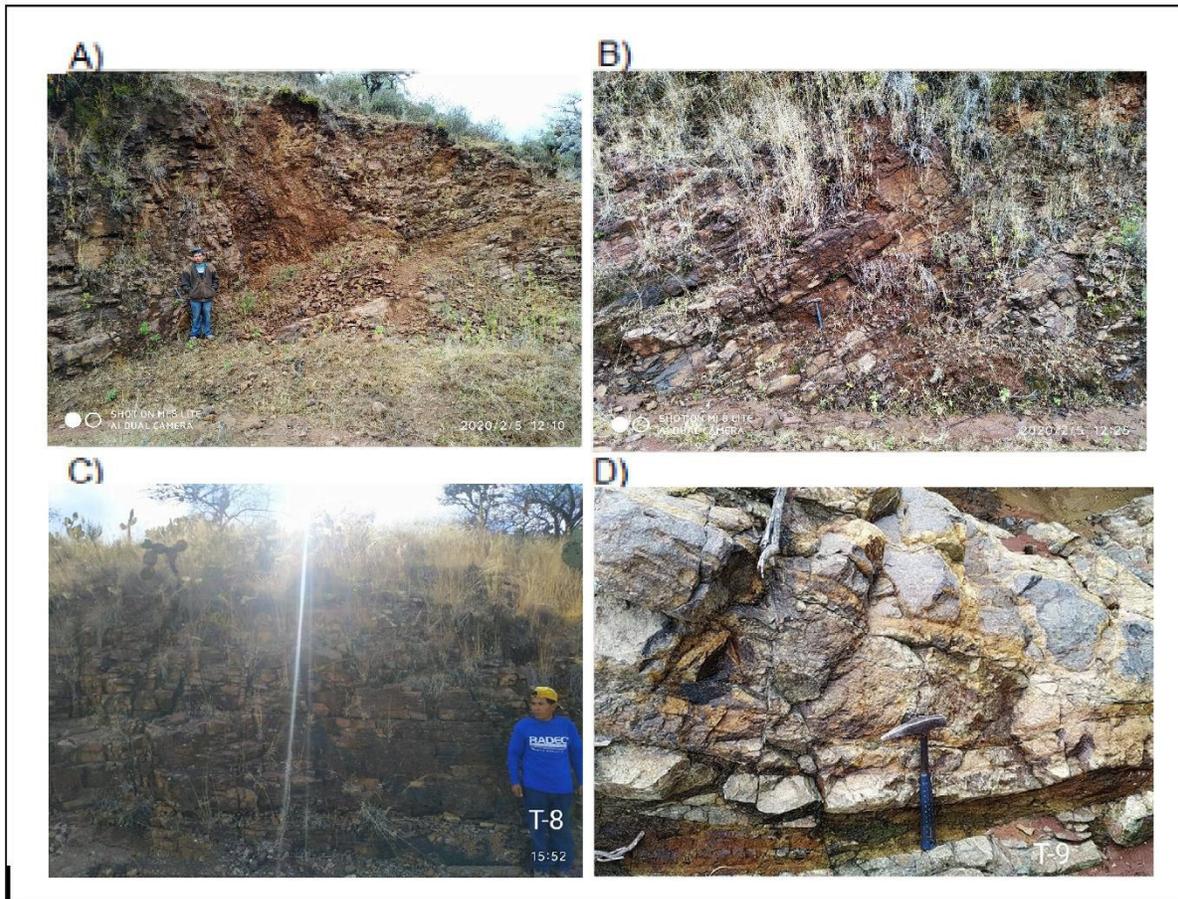


Figura 4.3. Andesita El Gigante. A) Textura porfídica. B) derrames lávicos, C) Clivaje de fracturamiento. D) Dique andesítico de textura porfídica que intrusión a la andesita El Gigante con cristales grandes de piroxenos y vetillas de calcedonia.

4.2 TOBA EL TERRERO

Antecedentes

La unidad aflora en los alrededores del poblado El Terrero, que se ubica al pie de los cerros El Gigante y La Giganta. Es la localidad tipo de la unidad y fue descrita por Martínez-Reyes (1992) como una secuencia de tobas lacustres de composición ácida a intermedia de 70m de espesor de estratos delgados a medianos de color blanco a amarillo verdoso, y que esta intercalada con horizontes silicificados, así como describió la presencia de huellas de gotas de lluvia, marcas de oleaje y pisadas de aves.

Litología

En este trabajo la Toba El Terrero se describe como una secuencia de rocas piroclásticas intercaladas con travertinos con carbonatos de calcio, capas de sílice calcedónico y rocas sedimentarias (Figura 4.4).

Las rocas piroclásticas son tobas de composición riodacítica a andesítica que presentan un color en afloramiento de amarillo a blanco. Los componentes de las rocas piroclásticas son líticos volcánicos de: andesita, dacita, riolita y riodacita; también aparece como componente piedra pómez.

Las capas de sedimentos son: gravas, arenas, limos y arcillas que se presentan intercalados con los travertinos y con las rocas piroclásticas. Muchas de las gravas son soportadas por matriz con limos y arenas.

Geometría

La unidad se presenta estratificada con un patrón de afloramiento en dos partes distribuido a lo largo de una dirección N-S en general. Los estratos sedimentarios presentan una continuidad lateral, pero otros presentan terminaciones en acuñamiento. Una estructura lenticular de los sedimentos en ocasión se observa (Figura 4.4).

Relaciones estratigráficas

La toba El Terrero en este trabajo se observó sobreyaciendo a la andesita El Gigante en donde un conglomerado basal se observa a la base de la unidad. Está en contacto por falla con los domos riodacíticos a dacíticas ubicados en la parte Norte y Noroeste del El Terrero, que se describen más adelante.

Edad

Martínez-Reyes (1992) consideró una edad de Plioceno tardío para la toba El Terrero, esto con base en la posición estratigráfica y trabajo de cartografía geológica. Ángeles-Moreno (2018),

consideró una edad del Oligoceno con base en análisis estratigráfico y a raíz de nuevos fechamientos que obtuvo en rocas volcánicas de la Sierra de Guanajuato.

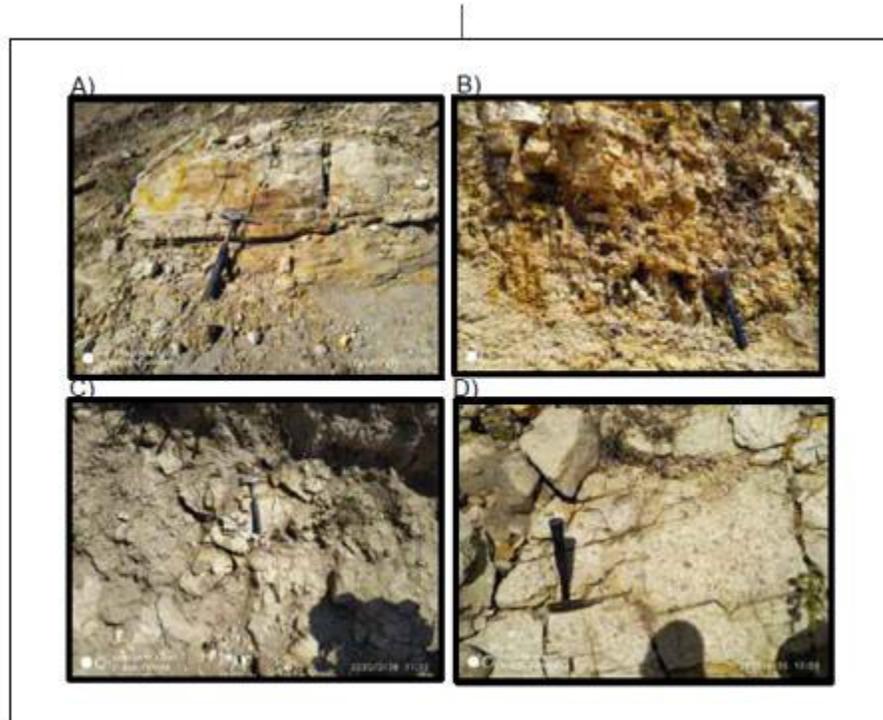


Figura 4.4 Afloramientos de la unidad Toba El Terrero: A) Capas lenticulares y laminares. B) Roca piroclásticas de grano fino con estartificación intercaladas con sedimentos limos y arcillas. C) Depósito piroclástico. D) Roca piroclástica ácida con pómez.

4.3 TRAVERTINOS CALCÁREO-SILÍCEOS

Antecedentes

Martínez-Reyes (1992), no menciona la presencia de carbonatos en la secuencia de la unidad Toba El Terrero, pero si menciona la presencia de sedimentos lacustres. En este trabajo se reconocen capas de travertinos calcáreos intercalados con sedimentos y depósitos piroclásticos.

Litología

En la secuencia de la Toba El Terrero se encontraron travertinos calcáreo -silíceos laminados y en capas intercaladas de color gris a negro pardo (Figura 4.5). En algunas láminas es común sílice amorfo y capas de sedimentos que van en granulometría de limos a arenas. En algunos niveles estratigráficos se observó la presencia de hidróxidos de hierro, sílice amorfo y

posiblemente óxidos de manganeso. El sílice es amorfo y presenta un color blanco y presenta en ocasiones recristalización a sílice con hábito botroidal y pequeñas laminaciones concéntricas de posible crecimiento.

Geometría

En la unidad la geometría es tabular con capas horizontales, pero hacia la parte oriente de los afloramientos muestra variaciones de espesor. En algunas capas de travertino y sílice se observan cambios laterales irregulares y en otras partes se observaron inclinaciones hacia el oriente de capas de travertinos.

Relaciones y correlaciones estratigráficas.

La unidad de travertinos silíceos se presenta en capas y laminaciones que aparecen intercalados con sedimentos de: arcillas, limos, arenas y gravas. Estos sedimentos contienen una gran cantidad de partículas volcánicas. Como se había mencionado la Toba El Terrero que contiene a los travertinos sobreyace en discordancia erosional a la andesita El Gigante. El contacto de la Toba El Terrero y travertinos es por falla con la unidad de rocas riodacíticas y dacíticas.

Edad

Los travertinos calcáreos y silíceos son parte de la secuencia de litologías de la Toba El Terrero, de acuerdo con Ángeles-Moreno (2018) la considera del Oligoceno y Martínez-Reyes (1992) la consideró del Plioceno tardío. En este trabajo se considera tiene un rango del Oligoceno-Plioceno.

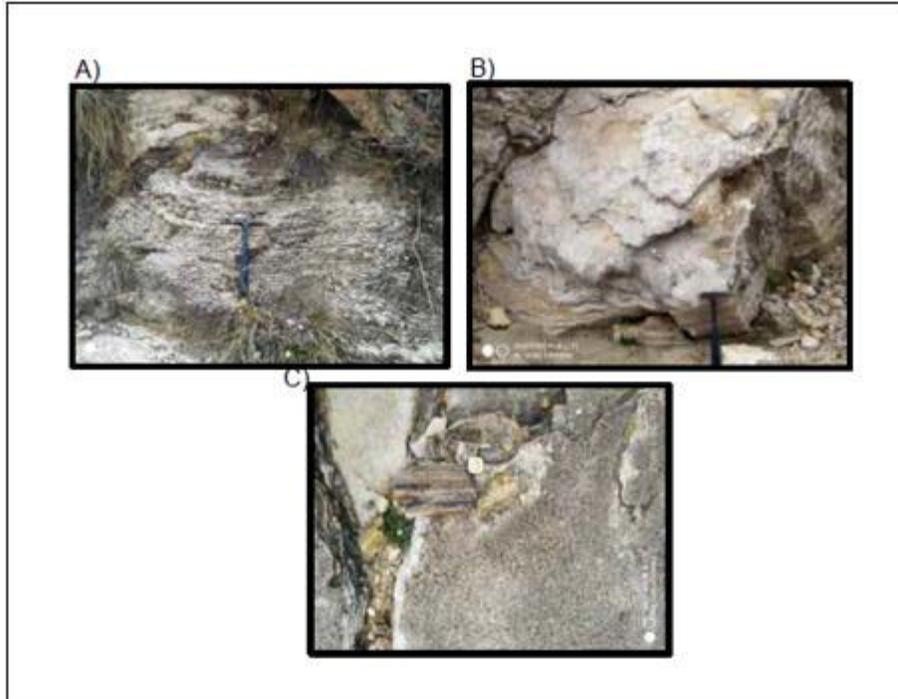


Figura 4.5. Afloramientos de Travertinos. A) Travertinos estratificados con intercalaciones de sedimentos. B) Intercalación de capas de carbonatos con sedimentos. C) Capas de carbonatos y posibles estructuras sedimentarias de gotas de lluvia.

4.4 UNIDAD DE RIODACÍAS Y DACÍAS

Antecedentes

Las rocas riolíticas, riodacíticas y dacitas de los alrededores al Terrero fueron cartografiados por Martínez-Reyes (1992) como Riolita Chichíndaro. La Riolita Chichíndaro ha sido tratada en varios trabajos como: Echegoyén-Sánchez et al. (1970), Gross (1975) y Nieto-Samaniego et al. (2015). En estos trabajos la unidad es descrita como derrames riolíticos, brechas volcánicas y tobas; las riolitas presentan texturas porfídicas, con fenocristales de cuarzo, feldespato potásico (sanidino) y oligoclasas. En algunas rocas estos trabajos también describen la presencia de hematitas, óxidos de hierro y otros minerales de alteración posteriores a la formación de la roca, así como, cambios texturales con esferulitas, con zonas vítreas y algunos cambios composicionales a dacitas.

Litología

En el área de estudio la unidad de riolitas y dacitas se presenta en la parte Norte de la población El Terrero. Estas litologías se presentan como flujos lávicos de riolita, riolita y dacitas con autobrechamiento local (Figura 4.6). Las riolitas se presentan en afloramientos con colores rojos a morados y se presentan con texturas porfídicas. Los fenocristales son cristales de cuarzo, plagioclasas (0.5-1.5cm), presenta minerales como limonita y óxidos de hierro.

Geometría

La unidad descrita en este trabajo presenta una geometría tabular a irregular determinada por flujos de lava y rocas bandeadas que se muestran con distintas inclinaciones. No es muy claro el espesor, pero puede tener un espesor mínimo de 70 metros y el bandeamiento tiene una orientación NE-SW con echados al SE.

Edad

Para la Riolita Chichíndaro (Gross, 1975) obtuvo una edad de 32 ± 1 Ma estimada por K–Ar mientras que Nieto-Samaniego et al. (2015) determinó una edad de 30.36 ± 0.40 Ma (U/Pb LA-ICPMS en zircones). En este trabajo no se determinó un fechamiento de esta unidad.

Relaciones de contacto y correlaciones Estratigráficas

De acuerdo a Nieto-Samaniego et al (2015), la Riolita Chichíndaro en el Distrito Minero de Guanajuato descansa concordamente sobre la Formación Cedros y es anterior a la Ignimbrita Cañada de la Virgen.

La unidad de riolitas y dacitas descritas en este trabajo están en contacto por falla con la Toba El Terrero. La relación de esta unidad con la Andesita El Gigante en el área de El Capulín, población al Suroeste del Terrero (Ver mapa geológico Figura 4.2) se observó que sobreyace a la andesita. Si se considera equivalente la unidad de riolitas y dacitas en el El Terrero a la Riolita Chichíndaro implicaría que esta unidad es oligocénica de cerca de 30.36 Ma Nieto-Samaniego et al (2015).

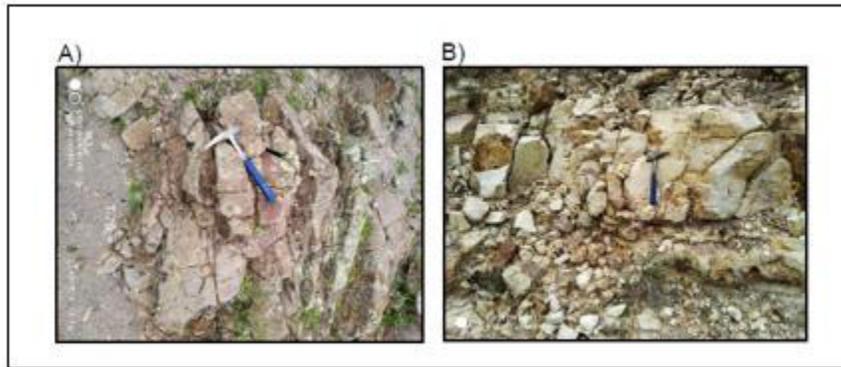


Figura 4.6. Afloramientos de riolacitas y riolitas. A) Riodacita. B) Roca volcánica ácida fracturada posible contacto por falla.

4.5 GRAVAS EL CAPULÍN

Antecedentes

La unidad de Gravas El Capulín fue definida por Martínez-Reyes (1992) en la zona del cerro El Cubilete y en la localidad de El Capulín. En este trabajo no se reconoció en el área.

Litología

Martínez-Reyes (1992) las describe como una roca sedimentaria poco consolidada constituida por gravas y arenas tobáceas, en una matriz soportada, con clastos angulares y subangulares de ignimbrita, lutitas, basalto y clastos redondeados de riolitas.

En el área de estudio no se observó, pero según el mapa geológico de Martínez-Reyes (1992) estas gravas se encuentran subyaciendo a los basaltos de la unidad basalto El Cubilete, en la parte alta del Cerro El Gigante, hay basaltos que podrían ser equivalentes en posición estratigráfica y edad al Basalto El Cubilete. Así también es posible que en la zona existan gravas equivalentes ya que Ángeles-Moreno (2018) describe gravas y arenas subyaciendo a basaltos en otras partes de la Sierra de Guanajuato y que fechó en cerca de 9 Ma (K-Ar, roca total).

Edad

La unidad Grava El Capulín Martínez-Reyes (1992), la describió debajo del Basalto El Cubilete que tiene una edad de 13 Ma (Aguirre-Díaz, et al., 1997) y Ángeles-Moreno (2018) describió otros conglomerados debajo de basaltos y andesitas de cerca 9 Ma. En base a estos resultados de trabajos antecedentes se considera que la Grava El Capulín tendrá una edad del Mioceno.

Relaciones y correlaciones estratigráficas

La unidad Grava El Capulín en otras partes de la Sierra de Guanajuato se ha reconocido y se encuentra debajo de mesas de basalto que tiene edades de cerca 14 Ma (Cerca-Martínez et al., 2000). En las cercanías de la Cañada La Virgen, Las Gravas El Capulín se encuentra sobreyaciendo a la ignimbrita San Nicolas y subyace bajo el Basalto El Cubilete (Nieto-Samaniego, 1992; Nieto-Samaniego et al., 1996).

4.6 BASALTO EL GIGANTE-LA GIGANTA

Antecedentes

Los basaltos El Gigante-La Giganta fueron mencionados por Ángeles-Moreno (2018) y es correlacionado con el basalto El Cubilete de cerca 13 Ma (Aguirre-Díaz, et al., 1997). El basalto El Cubilete fue descrito por Martínez-Reyes (1992) y que denomina así a varios basaltos y mesas de basalto en las partes altas de la Sierra de Guanajuato incluyendo al basalto El Gigante-La Giganta. Martínez-Reyes describe al basalto El Cubilete como un basalto y andesita de augita con textura traquítica. En el trabajo de Quintero-Legorreta (1986) propuso una edad, pero sin definirlo.

Litología

En este trabajo se describe a esta unidad compuesta de derrames lávicos andesíticos y basálticos que se encuentran en las partes altas del cerro El Gigante y La Giganta presentan texturas afaníticas y con unidades de flujo subhorizontales.

Edad

La estructura de la unidad se presenta en geometrías tabulares en unidades de derrames lávicos. Los derrames muestran espesores variables y a veces se ven como escarpes en la parte alta de los Cerros El Gigante y La Giganta.

Geocronología

La edad que se asigna al basalto El Cubilete es de 13.5 Ma (Aguirre-Díaz et al., 1997). Martínez-Reyes (1992) le asignó una edad del Cuaternario. En otras partes de la Sierra de Guanajuato, Angeles-Moreno (2018) determinó edades de mesas de basalto que varían de 7 a 9 Ma (edades K-Ar en roca total).

El basalto El Gigante-La Giganta no han sido fechados, pero por la posición estratigráfica se sugieren sean de edad Mioceno.

Relaciones y correlaciones estratigráficas

En la cartografía geológica de Martínez-Reyes (1992), los basaltos de El Gigante son colocados sobreyaciendo a la Riolita Chichíndaro. En este trabajo se observó que los basaltos y andesitas de El Gigante-La Giganta sobreyacen a las unidades de andesita, y a las riolitas y riolitas en la zona de El Terrero. En el Cerro El Cubilete se presenta sobreyaciendo a las gravas El Capulín (Martínez-Reyes, 1992).

CAPÍTULO 5

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En este capítulo se describen las diferentes estructuras de deformación y otros tipos de estructuras geológicas presentes en el área El Terrero. Algunas de estas estructuras se muestran en diagramas estereográficos y de rosetas empleando los softwares de estereonet y faultkin de Allmendinger et al (2012).

Las estructuras de deformación comprenden fracturas y fallas, y las otras estructuras geológicas que se caracterizaron son diques y estratos o capas de unidades de flujo ígneas. Las fallas se agruparon con base en su cinemática en fallas normales y laterales. Los datos estructurales de las estructuras se muestran en el anexo 1 de este trabajo.

Tres fallas mayores se definieron en este trabajo como son: la falla El Terrero, falla Huizachal y falla El Gigante (falla Mateo). Se definieron los grupos de fallas en el área: fallas normales (extensionales), fallas laterales y fallas inversas.

5.1 FALLA EL GIGANTE

La falla El Gigante (falla Mateo) aparece a una distancia de 2 km de la parte sur y sureste de la población El Terrero y al noroeste de la veta Madre. En la cartografía de Martínez-Reyes (1992) fue cartografiada como un contacto geológico entre rocas mesozoicas y rocas cenozoicas. Randall et al (1994) en su cartografía la muestra como una falla de tipo normal que corta a la veta Madre y al sistema de vetas La Luz con una dirección NE-SW. Ángeles-Moreno (2018) la describe como una falla también de tipo normal con un rumbo aproximado de N55°E con echado al Noroeste.

En este trabajo se observó a la falla El Gigante como una serie de fallas y fracturas subparalelas NE-SW que limitan el bloque mesozoico de la Tonalita Cerro Pelón de la andesita El Gigante. A lo largo del bloque del bajo en la andesita El Gigante se reconocieron fracturas con vetillas de pirita y clorita, así como algunos diques andesíticos que cortan a la andesita El Gigante con dirección N55°E con 68°NW.

5.2 FALLA EL TERRERO

La falla El Terrero está localizada en la parte poniente de la población El Terrero. A una distancia variable de 700 m a 1 km y tiene una longitud mínima de 3 km, tiene una orientación que varía de N-S a N20°E-S20°W y N35°E-S35°W (Figura 5.1, mapa geológico estructural). El desplazamiento vertical es de cerca 70 m determinado por el desplazamiento de la andesita El Gigante.

En los planos de falla se observan dos generaciones de estrías, una sobrepuesta a la otra. La cinemática más antigua es de tipo lateral izquierda y sobrepuesta es un sentido de falla normal. En las unidades que se observó esta relación fueron la Andesita El Gigante y la Toba El Terrero. Los valores de pitch de la falla lateral varían de 0° a 25°, y en la falla normal varían de 85° a 70°. En otros planos se observaron estrías de falla oblicua, pero son menos frecuentes y poco claros. Las rocas de falla que se presentan en su núcleo son brechas de falla y fracturas con orientación paralela a la falla principal.

La falla afecta a litologías de la Andesita El Gigante y de la Toba El Terrero, litologías de la unidad de domos riodacíticos y dacíticos. Se observa que limita los afloramientos de la Toba El Terrero hacia la parte poniente. La edad de los dos movimientos de la falla por lo menos ocurrió posterior al emplazamiento de la Andesita El Gigante que se infiere tiene una edad del Oligoceno (Angeles-Moreno, 2018).

5.3 FALLA EL HUIZACHAL

La falla El Huizachal es una falla ubicada a 400 m al sureste de la población El Terrero y tiene una longitud mínima de 1.4 km, tiene una orientación que varía de N-S a N10°E a N20°E con echado variable de 85° a 70° hacia el poniente (Figura 5.1, mapa geológico estructural). Esta falla tiene una cinemática de falla lateral derecha con valores de pitch de 10° a 25°. La falla esta encajonada en andesita porfídica de El Gigante y presenta en el núcleo de falla brechas de falla con clorita, hematita y veces silificación. La edad de la falla se interpreta del Oligoceno-Mioceno, ya que corta a rocas de la andesita El Gigante.

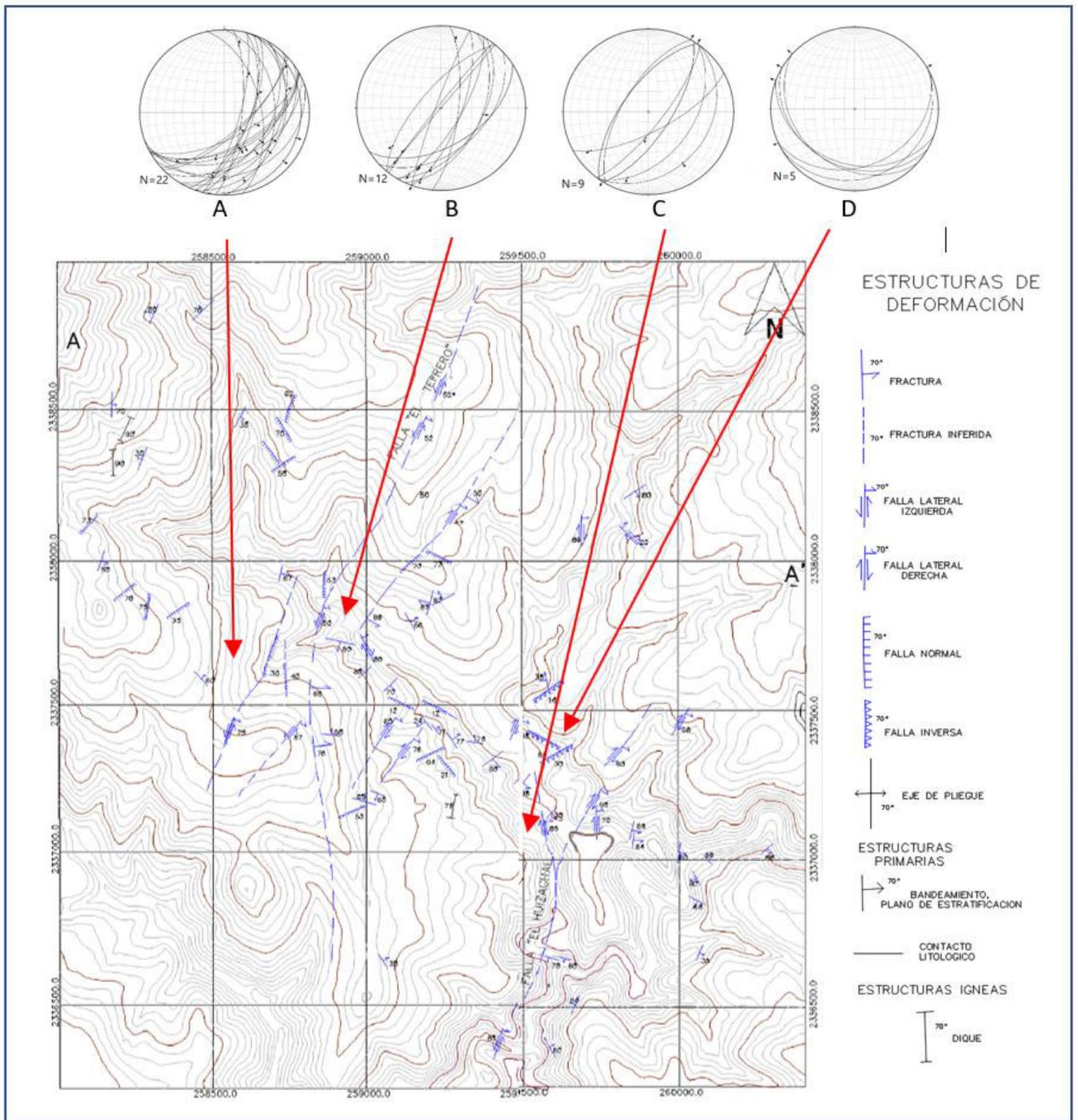


Figura 5.1. Mapa geológico-estructural con la orientación de las estructuras encontradas en el área de estudio. A). Estereogramas de fallas normales. B). Estereogramas de fallas laterales izquierda. C). Estereogramas de fallas laterales derecha. D). Estereogramas de fallas inversas. Las flechas en los diagramas estereográficos representan direcciones de deslizamiento.

5.4 FALLAS NORMALES

Las fallas normales en su mayoría se distribuyen principalmente en la parte central del área de estudio, aunque también se pueden encontrar en porción noreste, este conjunto de fallas tiene una longitud de su traza de falla que varía de unos cuantos metros a hasta como mínimo 200 metros.

Las fallas presentan dos orientaciones preferenciales al NE-SW y NW-SE, con echados que varían entre 20° y 70° grados hacia todos los cuadrantes (Figura 5.2). Las direcciones de extensión son hacia el NW-SE y NE-SW.

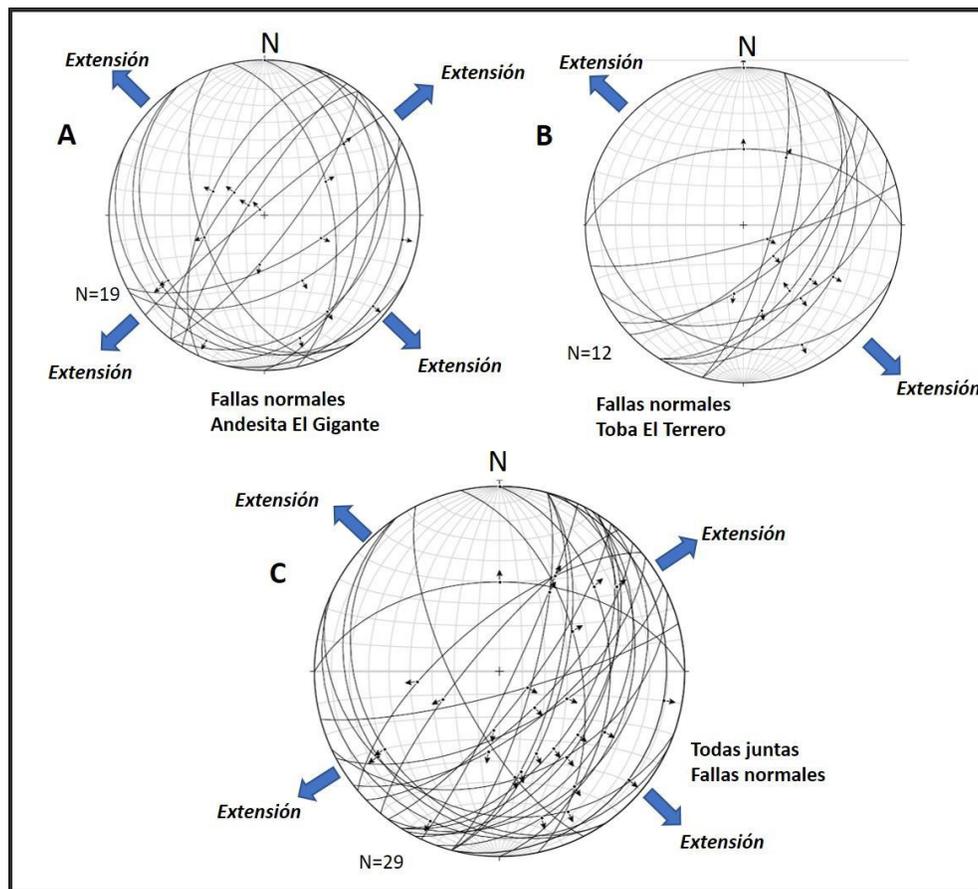


Figura 5.2 Orientaciones de los planos de falla, direcciones de deslizamiento y direcciones de extensión mayores. A, fallas normales en la Andesita El Gigante. B, fallas normales en la Toba El Terrero. C, todas las fallas normales en las unidades Andesita El Gigante, Toba El Terrero y la unidad de domos riódacíticos y dacíticos. Software Faultkin empleado en el análisis de extensión (Allmendinger et al., 2012).

Las fallas normales presentan en el núcleo brechas de falla que varían en espesor de unos cuantos centímetros a 30 cm como mínimo. Estas fallas están presentes en la Toba El Terrero, Andesita El Gigante y domos riolíticos en el área de estudio. De acuerdo con la cartografía geológica estructural algunas de las fallas NE-SW se observan cortando a algunas fallas NW-SE sugiriendo que algunas de las fallas NW-SE son más antiguas. En las figuras 5.3 y 5.4 se muestran algunos ejemplos de fallas presentes en la andesita El Gigante.

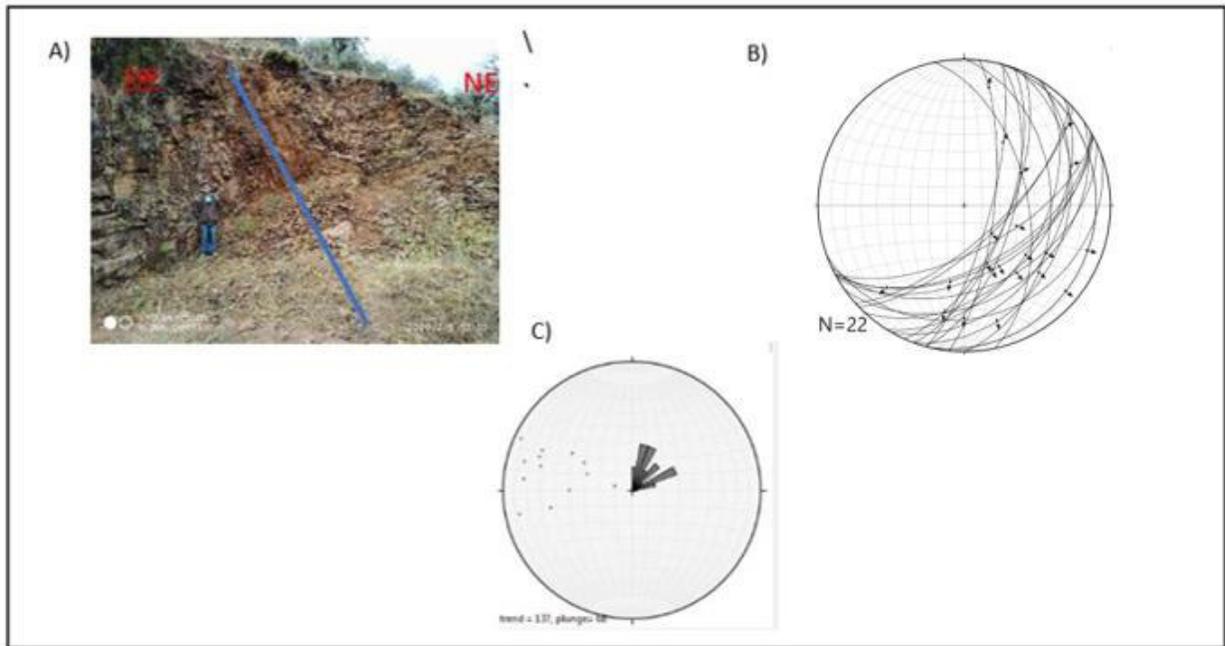


Figura 5.3 Algunos afloramientos de fallas Normales en El Terrero. A) Falla normal en andesita El Gigante. B) Orientación de fallas normales con orientación NE-SW encontradas en el área de estudio. C) Diagrama de rosetas y polos de fallas normales NE-SW en andesita El Gigante. Las flechas indican las direcciones de deslizamiento a lo largo de los planos de falla.

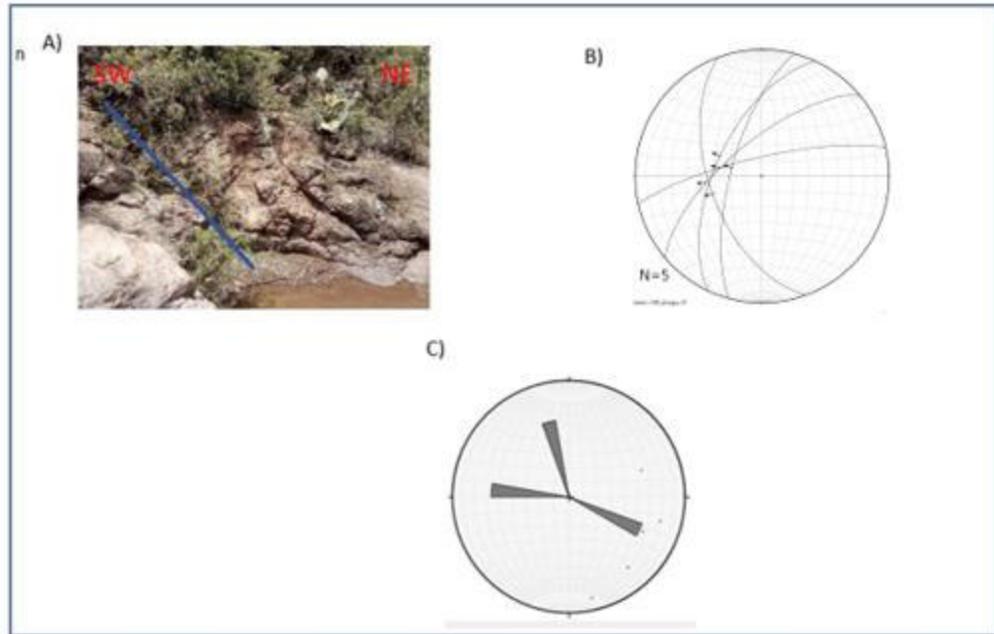


Figura 5.4 Falla normal en andesita El Gigante. B) Orientación de las fallas normales con orientación NW-SE y NE-SW encontradas en el área de estudio. C) Diagrama de rosetas y polos de fallas normales en andesita El Gigante. Empleando el software Stereonet de Allmendinger et al (2012). Las flechas indican las direcciones del deslizamiento a lo largo de los planos de falla.

La edad de estas fallas normales se infiere que sean del Oligoceno ya que en la Sierra de Guanajuato se han reconocido direcciones de extensión NE-SW y NW-SE en rocas volcánicas del Oligoceno (Nieto-Samaniego et al., 2012, 2015) y las fallas normales en el Terrero tienen direcciones similares.

5.5 FALLAS LATERALES

Las fallas laterales están distribuidas a lo largo de toda el área de estudio. Las fallas laterales afectan a litologías de la andesita El Gigante, Toba El Terrero y a la unidad de domos de riocacita y dacita. De acuerdo con el mapeo geológico se infiere un desplazamiento lateral a rumbo de 600 m como mínimo esto para la falla mayor El Terrero, que desplaza a la andesita El Gigante. En ocasiones las fallas aparecen con una cinemática de tipo lateral derecha y otras fallas con una cinemática lateral izquierda (Figura 5.5). Y los planos de estas fallas en muchas de las veces son compartidos por los mismos planos de falla que tuvieron deslizamiento de tipo normal. En algunos planos de falla NE-SW se observó a las estrías de falla normal sobrepuestas sobre las estrías de falla lateral sugiriendo que en los planos de falla NE-SW, las fallas laterales son más antiguas a las fallas normales. La sobreposición de estrías de falla y la diferente cinemática es una evidencia de una reactivación de fallas.

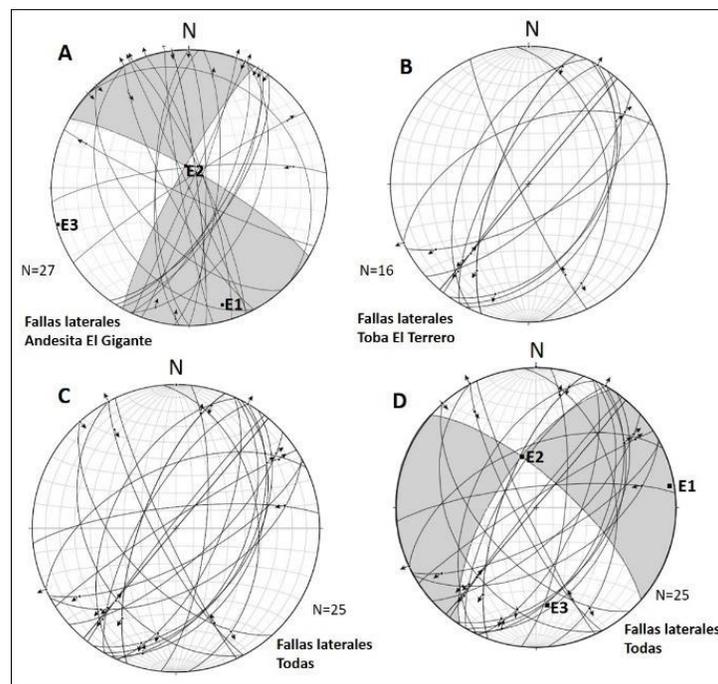


Figura 5.5 Fallas laterales de las unidades andesita El Gigante y Toba El Terrero. A, fallas laterales y dirección de estrías de la andesita El Gigante con análisis y solución de plano de falla *Linked Bingham*. B, fallas laterales y dirección de estrías de la unidad toba El Terrero. C, fallas laterales juntas y dirección de estrías. D, fallas laterales juntas con análisis y solución de plano de falla *Linked Bingham* estrías. E1, E2 y E3 son las direcciones de las deformaciones principales. Software Fault kin de Allmendinger et al (2012).

Las orientaciones de las fallas laterales son: NW-SE, NE-SW, NNW-SSW y NNE-SSW (Figura 5.5). Las fallas laterales en la andesita El Gigante muestran un comportamiento de solución de plano de falla lateral izquierdo y al analizar todas las fallas muestran una solución lateral derecha (Figura 5.5)

FALLAS LATERALES DERECHA

Las fallas laterales derechas aparecen distribuidas en toda el área de estudio (Figura 5.1). La longitud de las trazas de falla tiene una longitud que varía de unos cuantos metros a hasta más de 1000 metros. En este grupo de fallas se observó que presentan orientaciones al NE-SW y N-S (Figuras 5.6 y 5.7). las fallas con orientaciones NE-SW tienen echados que varían de entre los 30° y los 80° (Figura 5.6). Las fallas N-S laterales tienen echados entre 70° y 90° (Figura 5.7). Las fallas de este tipo están presentes en rocas de la unidad andesita El Gigante, Toba El Terrero y la unidad de domos riódacíticos.

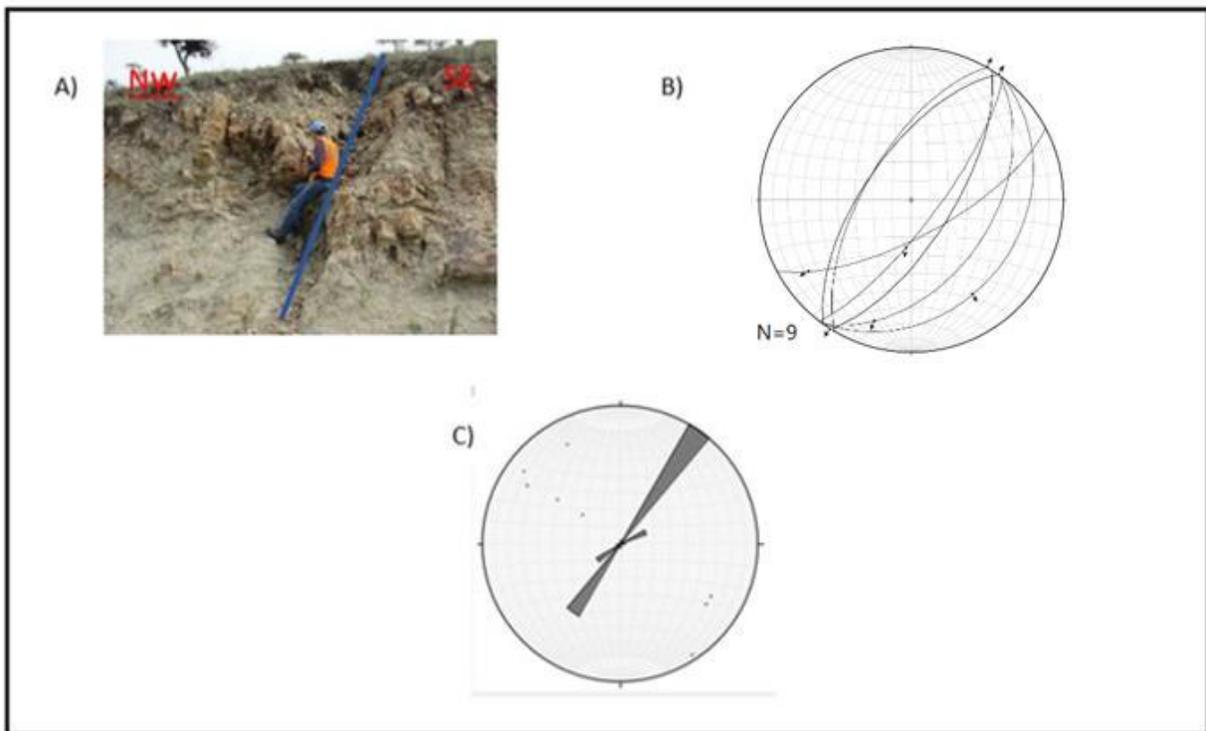


Figura 5.6 Algunas fallas laterales derecha en la unidad Toba El Terrero. B) Orientación de las fallas laterales derechas con orientación NE-SW. C) Diagrama de rosetas y polos de fallas laterales derecha.

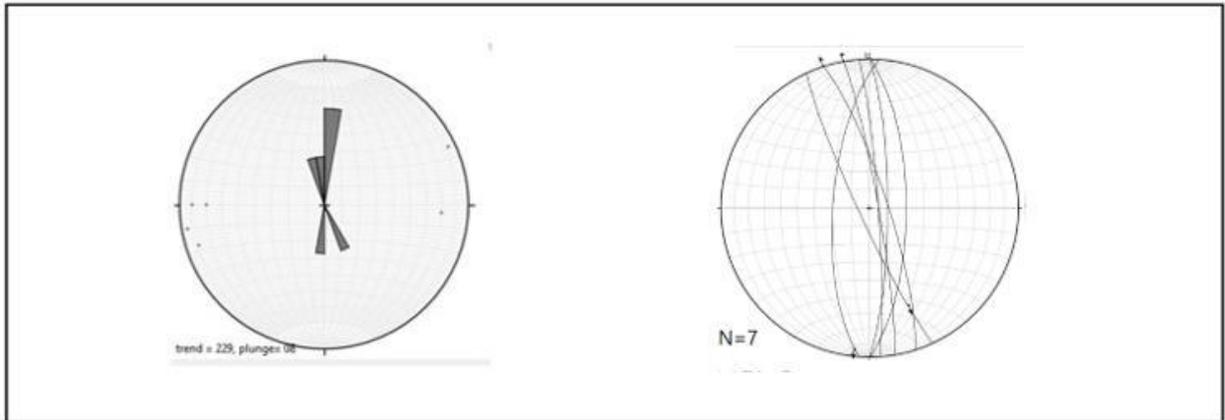


Figura 5.7. Orientación de las fallas algunas fallas laterales con orientación N-S de la andesita El Gigante encontradas en el área de estudio.

FALLAS LATERALES IZQUIERDA

Las fallas laterales izquierda se distribuyen en toda el área de estudio (Figura 5.1). La longitud de las trazas de falla es variable de unos cuantos metros hasta no menos de 1000 m. Las fallas se identificaron en las unidades: andesita El Gigante, Toba El Terrero y la unidad de domos riodacíticos y dacíticos. Las fallas presentan orientaciones N-S y NE-SW con echados que varían de entre los 40° y los 75° al SE, W y E. En la (Figura 5.8) se muestran algunas fallas laterales NE-SW con cinemática de lateral izquierda.

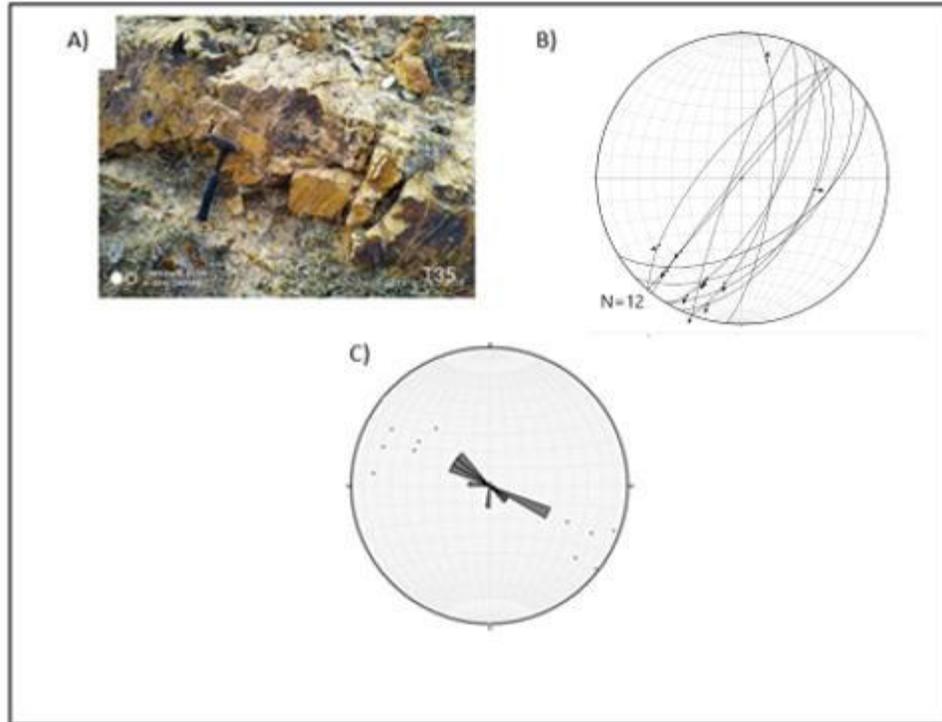


Figura 5.8. Falla lateral izquierda en la unidad Toba El Terrero. B) Orientación de las fallas laterales izquierdas con orientación NE-SW encontradas en el área de estudio (Estereogramas) de fallas normales en el terrero. C) Diagrama de rosetas y polos de fallas laterales izquierdas en la Toba El Terrero. Las flechas indican la dirección de deslizamiento a lo largo del plano de falla.

La edad de las fallas laterales se infiere pueda ser del Oligoceno-Mioceno ya que afectan a la andesita El Gigante que de acuerdo a Angeles-Moreno (2018) la correlaciona en posición estratigráfica con la andesita Bernalejo que tiene una edad de 31.36 ± 0.24 Ma (U-Pb en zircones LA-ICPMS) (Botero-Santa et al., 2015). La presencia de rocas piroclásticas ácidas dentro de las litologías de la toba El Terrero y que pueden ser derivadas de los domos riódacíticos o dacíticos y si estos a su vez se correlacionan con la Riolita Chichíndaro de cerca 30.1 ± 0.8 Ma (K-Ar en sanidino) (Nieto-Samaniego et al., 1996), entonces la Toba El terrero puede ser de edad Oligoceno y sugiriendo que las fallas laterales puedan alcanzar la base del Mioceno en edad.

5.6 FALLAS INVERSAS

Las fallas inversas se identificaron en varios lugares en barrancas cercanas al pueblo El Terrero entre las fallas El Terrero y la falla Huizachal. La longitud de la traza de las fallas se infiere pueda variar entre 100 m y 600 m, reconociéndose que afecta a la andesita El Gigante.

En este grupo de fallas se observó que la mayoría presentan una orientación preferencial NW-SE y WNW-ESE con echados que varían de 20° a 35° al SW y Sur (Figura 5.9). Las zonas núcleo de las fallas presentan brechas de falla y fracturas tipo "Riedel".

La presencia de una zona con fallas inversas en la andesita El Gigante sugiere que ciertos sectores en el área de estudio se comportaron como regiones transpresionales.

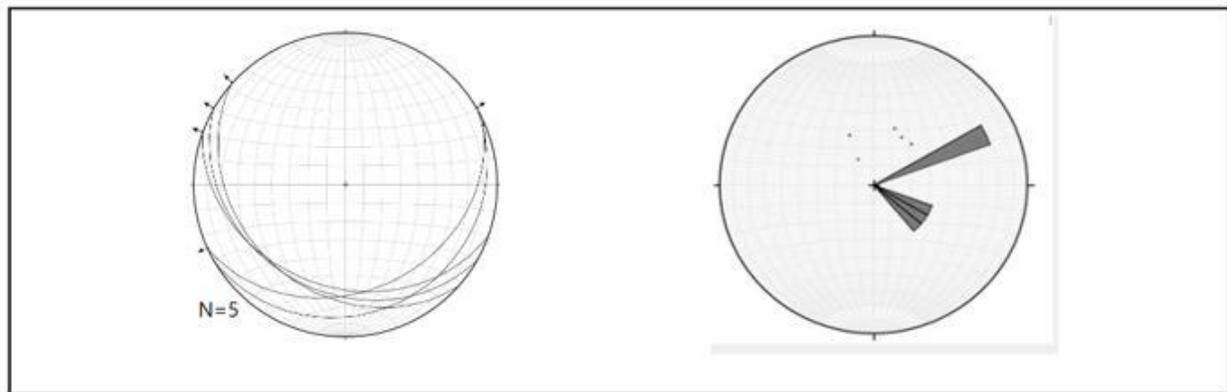


Figura 5.9. Orientación de las fallas inversas con orientación NW-SE y WNW-ESE encontradas en el área de estudio.

5.7 DIQUES ÍGNEOS

En el área de estudio se reconocieron varios tipos de diques. Los diques que se reconocieron son diques andesíticos y diques riolíticos. Diques andesíticos que cortan a la andesita El Gigante tienen en direcciones NW-SE y NE-SW (Figura 5.10) sugiriendo direcciones de extensión NE-SW y NW-SE y que sería compatible con la deformación de las fallas extensionales o fallas normales (Figura 5.2). Los diques riolíticos tienen orientaciones NW-SE sugiriendo también una extensión principal NE-SW (Figura 5.10). Se observaron unos diques cortando a la unidad de domos de riolíticas y dacitas así como a unas andesitas (Cimientos) que tienen direcciones N-S (Figura 5.10) y que sugieren una extensión E-W más tardía.

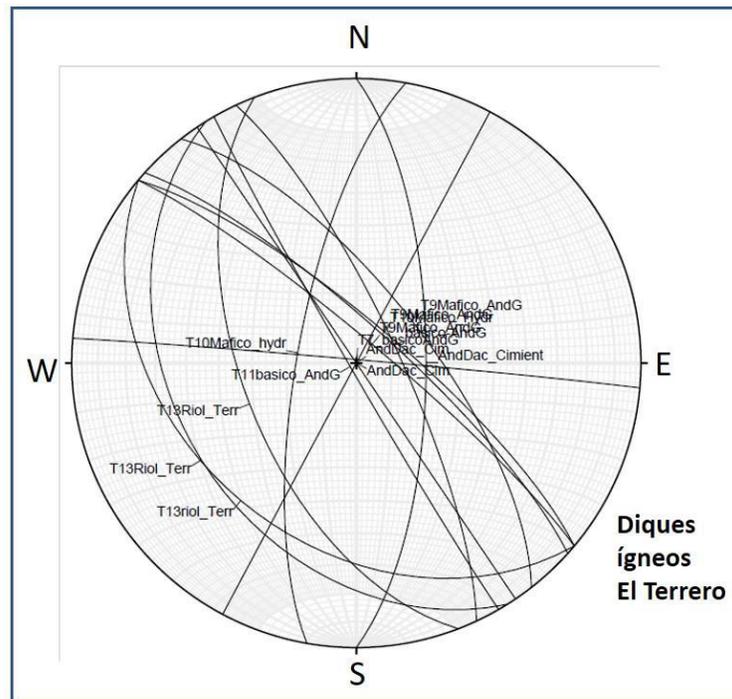


Figura 5.10 Orientación de los diques del área El Terrero. Se identificaron diques andesíticos y diques riolíticos.

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN

Los resultados estructurales se mostraron en el capítulo 5 a partir del procesamiento, observación, descripción y análisis de los datos geológico-estructurales obtenidos en el campo. Esto enmarcado en el objetivo principal de este trabajo de tesis que es el de caracterizar la deformación y cinemática de fracturas y fallas en la zona El Terrero, parte Norte de la Veta Madre de la Sierra de Guanajuato. En este capítulo se discuten algunos de los resultados de este trabajo (generaciones de estructuras, fases de deformación, significado de los diques y algunas relaciones con el hidrotermalismo en el área) y se muestran relaciones con algunos trabajos de geología estructural desarrollados en el Distrito Minero de Guanajuato (DMG).

6.1 GENERACIONES DE ESTRUCTURAS DE DEFORMACIÓN Y FASES DE DEFORMACIÓN

En este trabajo con base en las direcciones de extensión principales y el comportamiento cinemático se pudieron definir tres generaciones de estructuras (fracturas, fallas y estrías), dos generaciones de estructuras relacionadas a fallamiento extensional y otra a un fallamiento lateral. La generación de estructuras más antiguas se considera que fue una fase de deformación extensional (DF1) que estuvo relacionada con la distribución espacial de la andesita El Gigante y la formación de las vetas epitermales mayores NW-SE como la veta Madre. Otras dos generaciones de estructuras se desarrollaron posterior al emplazamiento de la andesita El Gigante, ya que cortan a esta unidad, y de estas, una fue una fase de deformación de fallamiento lateral (DF2) y la última documentada fue otra fase de deformación extensional (DF3).

6.1.1 FASE DE DEFORMACIÓN DF1

Esta fase de deformación en el área se considera una fase de deformación extensional con direcciones de extensión NW-SE y NE-SW. Está representada por las estructuras mayores que se encuentran al sureste del área de estudio como son la falla El Mateo NE-SW (falla El Gigante), la veta Madre (NW-SE) y algunos lineamientos mayores interpretados (Figura 6.1). La orientación de la falla Mateo NE-SW que es una falla poco clara en los afloramientos y contacto entre la

andesita El Gigante con el basamento mesozoico, así como la distribución de la unidad y diques intermedios en su interior sugiere una extensión NW-SE. Esta fase de deformación esta mejor representada dentro de la andesita El Gigante en donde se describieron fallas normales con direcciones principales NW-SE y NE-SW. La dirección de extensión NE-SW se ha documentado en el sur del Distrito Minero de Guanajuato en fallas mayores como la falla de veta Madre, falla La Leona y otras (Nieto-Samaniego et al., 2015). Estas estructuras cortan a las rocas las Formaciones Losero, Bufa, Calderones, Cedro y Chichíndaro y la extensión se ha considerado de edad Oligoceno (Nieto-Samaniego et al., 2015).

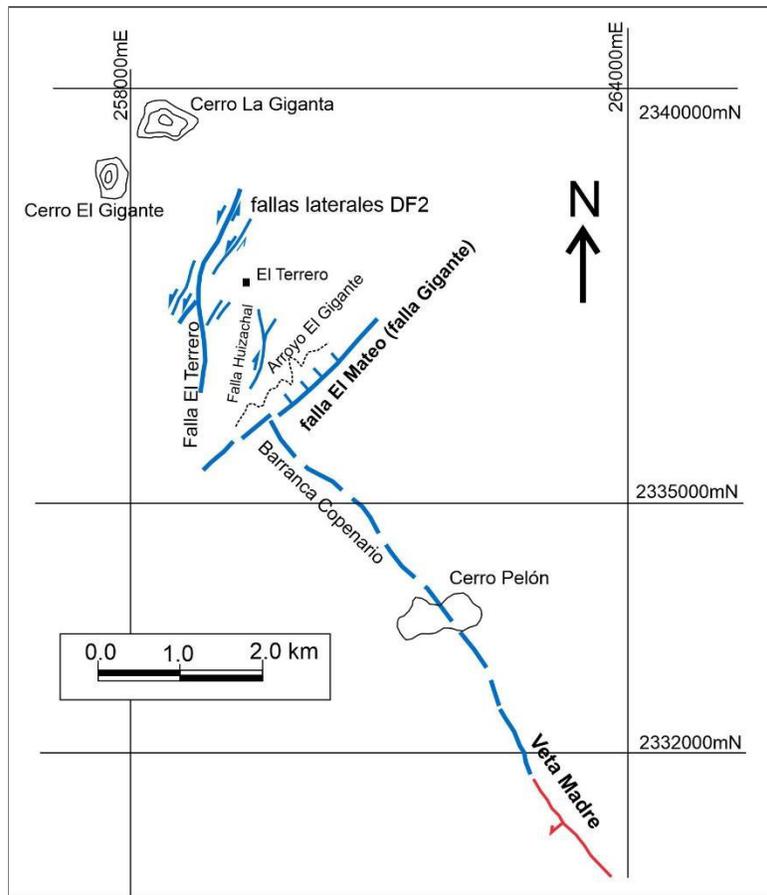


Figura 6.1 Relación espacial de las fallas en el área de estudio con la veta Madre (NW-SE) y con la falla Mateo (falla El Gigante) NE-SW.

6.1.2 FASE DE DEFORMACIÓN DF2: FALLAS LATERALES

Esta fase de deformación se interpreta a partir de la existencia de fallas laterales en el área de estudio que afectaron a litologías de la Andesita El Gigante, Toba El Terrero, unidad de Riodacita y Dacita. Las orientaciones principales de las fallas laterales son N-S y NE-SW con abundantes fallas asociadas NW-SE, NE-SW, y NNE-SSW (Figura 5.5). Las fallas de esta fase de deformación presentan una cinemática en ocasiones lateral izquierda y en otras una cinemática lateral derecha.

La fase de deformación DF2 presenta evidencia de reactivación por una fase extensional DF3 ya que se encontró sobreposición de estrías en planos de falla con cinemática de falla normal.

Las relaciones geométricas y angulares sugieren que la fase de deformación DF3 se comportó como un sistema de fallas tipo "Riedel" y que se relacionan varias estructuras de deformación como las fallas normales, diques y algunas fallas inversas (Figura 6.2).

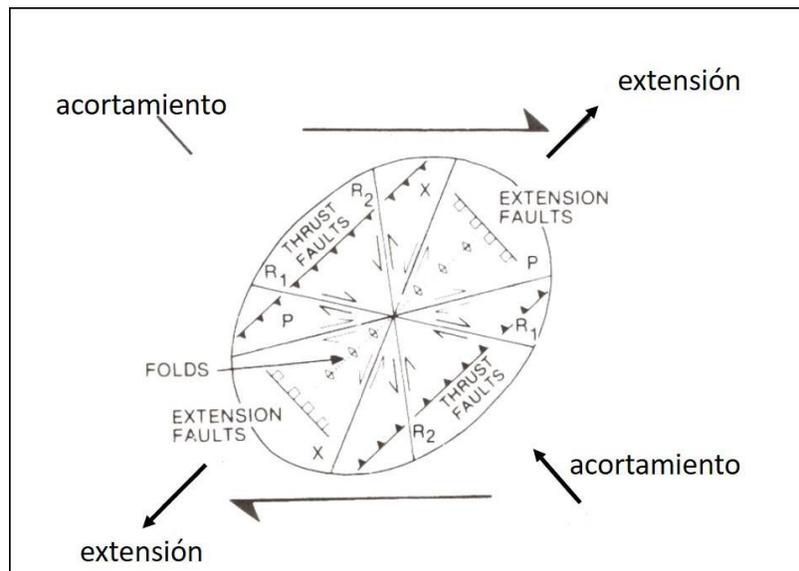


Figura 6.2 Elipse de deformación y estructuras tipo "Riedel" (tomado de McClay, 1987) que pueden explicar las relaciones geométricas de la fase de deformación lateral DF2 en el área de estudio.

6.1.3 FASE DE DEFORMACIÓN EXTENSIONAL DF3

Esta fase de deformación extensional DF3 es definida por la sobreposición de estrías de esta fase DF3 sobre las estrías de fallas laterales de la fase de deformación DF2, esto aparece en varios planos de falla de las fallas laterales. Las fallas de la fase DF3 presentan dos orientaciones preferenciales al NE-SW y NW-SE, con direcciones de extensión hacia el NW-SE y NE-SW.

Las fallas extensionales asociadas a la fase extensional DF3 es posible en parte que se traslapen con los planos de falla de la fase de deformación DF2 (Figura 6.3) y que las direcciones de extensión coincidan entre ambas fases de deformación, ya que es difícil separar los dos eventos que fueron extensionales. La presencia de dos direcciones de extensión ha sido documentada en los alrededores de la Sierra de Guanajuato interpretándose como una deformación tridimensional del Oligoceno con cambios en el estilo de deformación de cerca de 30 Ma (Del Pilar-Martínez et al., 2020) y es un carácter regional en la Mesa Central (Nieto-Samaniego et al., 1997).

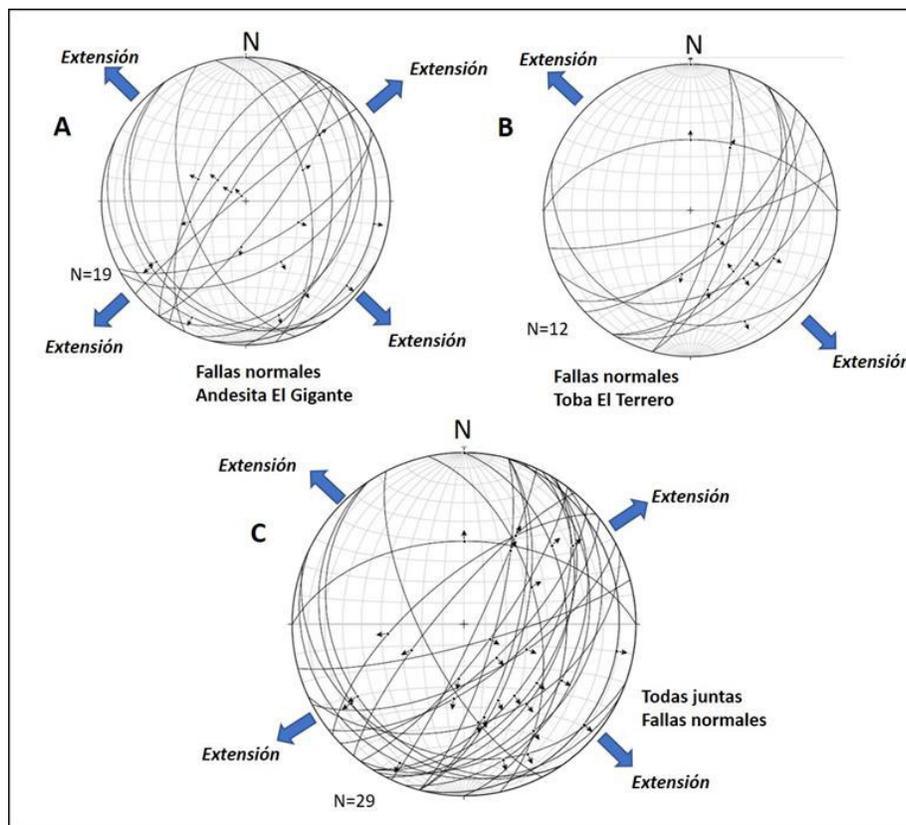


Figura 6.3 En estas fallas fueron registrados las dos fases de deformación extensionales DF1 y DF3. Coinciden las extensiones NE-SW y NW-SE para ambas fases de deformación, y por lo menos en las unidades andesita El Gigante y la Toba El Terrero.

6.2 FALLAS INVERSAS

Las fallas inversas que se documentaron en el presente trabajo se representan en un área de posible acortamiento ubicada entre las fallas EL Terrero y El Huizachal (lateral derecha) y dentro de la unidad andesita El Gigante. Estas fallas inversas parecen estar relacionadas con el fallamiento lateral de la fase de deformación DF2 ya que geoméricamente son compatibles con un sistema tipo “Riedel”.

6.3 DIQUES

Los diques que se documentaron en el área de estudio son andesíticos y riolíticos. Desde el punto de vista de su orientación se tienen tres tipos de diques los que tienen una orientación NW-SE (andesíticos y riolíticos), otros diques N-S (andesíticos) y diques NE-SW (andesíticos). Los diques NW-SE se presentan cortando a la andesita El Gigante y sugieren una extensión NE-SW (Figura 5.); estos diques están en las cercanías de los afloramientos de la unidad Toba El Terrero y en donde existe alteración hidrotermal de clorita y óxidos de hierro. En la andesita El Gigante y en las cercanías de la falla Mateo se observaron varios diques andesíticos con orientación NE-SW que son subparalelos con la orientación de la falla Mateo (falla El Gigante) y esto sugiere que pueden ser diques más antiguos y que pueden ser relacionados con la extensión NW-SE que estuvo relacionada con la formación de la falla Mateo durante la fase de deformación extensional DF1. Los diques andesíticos N-S cortan a andesitas (Cimientos) más jóvenes a la andesita El Gigante y podrían ser diques tardíos asociados a los derrames volcánicos más jóvenes que forman a los cerros de El Gigante y La Giganta. En el Distrito Minero de la Sierra Guanajuato en la zona de Calderones se han documentado diques andesíticos con orientación NE-SW que cortan a la Formación Calderones sugiriendo una extensión NW-SE (Nieto-Samaniego et al., 2015) y estos diques pudieron haberse formado al mismo tiempo que los diques subparalelos a la falla Mateo en la zona de estudio y que puede corresponder con la extensión NW-SE.

6.4 MINERALIZACIÓN Y ALTERACIONES HIDROTERMALES

Travertinos de la unidad Toba El Terrero

En la zona de estudio la unidad Toba El Terrero presenta horizontes de travertinos calcáreos y silíceos que implican la presencia de geotermalismo y se observó que las capas están intercaladas con rocas piroclásticas ácidas que tienen fragmentos de riolita o riodacita. Estas rocas piroclásticas podrían estar asociadas con el emplazamiento de domos riodacíticos, riolíticos y dacíticos en el área de estudio. Los domos riodacíticos y riolíticos si se supone son equivalentes en edad a la Formación Riolita Chichíndaro de cerca de 30 Ma (Nieto-Samaniego et al., 1996). Estas relaciones implicarían que el hidrotermalismo presente en la unidad Toba El Terrero es cercano a los 30 Ma. La falla el Terrero pudo haber actuado como falla extensional durante la fase de deformación DF1 ya que hay un desplazamiento vertical de cerca 70 m en la andesita El Gigante y que después tuvo reactivaciones durante las fases de deformación DF2 y DF3. El hidrotermalismo podría haber ocurrido durante los cambios de los regímenes de deformación de las fases DF1 y DF2.

Vetas, vetillas y alteraciones hidrotermales en la andesita El Gigante

En el área de estudio se observaron vetillas de cuarzo y calcedonia acompañadas de halos de alteración hidrotermal con presencia de clorita, pirita, limonitas y otros hidróxidos de hierro a lo largo de fallas y fracturas con orientaciones NW-SE, N-S y NE-SW. En algunas fallas N-S y NE-SW la presencia de brechas de falla con alteración de clorita y pirita sugiere que estas fallas fueron conductos de alta permeabilidad. Las fases de deformación extensionales DF1 y DF3 debieron haber ocurrido cercanos en tiempo con la introducción de fluidos hidrotermales ya que se observaron estrías de falla en rellenos de cuarzo y clorita hidrotermal. El hidrotermalismo presente en fallas y fracturas de la zona El Terrero podría haber ocurrido cercano a los 30 Ma tomando en consideración que la mineralización de la veta Madre se ha datado por Gross (1975) en edades de 29.2 ± 2.0 , 28.3 ± 5.0 , and 30.7 ± 3.0 Ma (K–Ar en mineral adularia) y una edad de Nieto-Samaniego et al. (2015) de 29.8 ± 0.8 Ma (mineral adularia K-Ar) de la veta Madre.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

Entre los resultados de este trabajo se elaboró el mapa geológico-estructural de la zona El Terrero que se ubica en la parte Norte del Distrito Minero de Guanajuato. Se estableció que el contacto entre la unidad Toba El Terrero con la Andesita El Gigante es una discordancia erosional con la presencia de un conglomerado. El contacto de la unidad de riolitas, riodacitas y dacitas con la Toba El Terrero es por falla, que se define en este trabajo como falla El Terrero.

A partir de la caracterización estructural se definieron tres grupos de fallas: fallas normales, fallas laterales y fallas inversas. Estas fallas afectan a las unidades: Toba El Terrero, andesita El Gigante y una unidad de riolitas, riodacitas y dacitas que es equivalente en edad a la Riolita Chichíndaro de 30 Ma. Los resultados del análisis estructural y algunas relaciones de corte de estructuras en campo permitieron definir tres fases de deformación en la zona que se nombraron como: DF1, DF2 y DF3.

DF1 se caracterizó como una extensión NW-SE y NE-SW que formó fallas normales y a lo largo de estas fracturas donde se emplazaron diques intermedios en la Andesita El Gigante. La correlación con otros estudios estructurales realizados en la SG sugiere que la fase de deformación es de edad Oligoceno. La orientación de la falla Veta Madre NW-SE y la falla El Mateo NE-SW en la parte Sur de El terrero son compatibles con estas direcciones de extensión.

DF2 se caracterizó por la formación de fallas laterales, normales y posibles inversas. Las fallas laterales que se formaron en esta fase presentan orientaciones N-S, NE-SW y fallas asociadas NW-SE, NE-SW, y NNE-SSW. Las relaciones geométricas y angulares sugieren que la fase de deformación DF2 se comportó como un sistema de fallas tipo "Riedel".

DF3 fue una fase de deformación extensional definida por fallas normales con orientación NE-SW y NW-SE, con direcciones de extensión hacia el NW-SE. En esta fase se reactivaron las fallas de la fase DF2.

La falla El Terrero parece que estuvo activa desde la fase de deformación DF1 y continuó su actividad a través de las otras fases de deformación DF2 y DF3. Esta falla parece haber controlado la distribución de los afloramientos de la unidad Toba El Terrero y de los travertinos.

En la Andesita El Gigante muchas fracturas y algunas fallas presentan minerales hidrotermales con: calcedonia, pirita, hematita y clorita sugiriendo que el hidrotermalismo en la zona fue canalizado a lo largo de las fracturas.

La presencia de horizontes de travertinos calcáreos y silíceos intercalados con rocas piroclásticas en la unidad Toba el Terrero sugiere vulcanismo contemporáneo con el hidrotermalismo en la falla El Terrero. La edad que se infiere para la Toba El Terrero es Oligoceno esto con base en la presencia de clastos de rocas riolíticas, riodacíticas y dacíticas en algunos depósitos piroclásticos intercalados con los travertinos.

REFERENCIAS

- Aguirre-Díaz, G. J., Nelson, S. A., Ferrari, L., López-Martínez, M., 1997, Ignimbrites of the central Mexican Volcanic Belt, Amealco and Huichapan Calderas (Querétaro-Hidalgo), en Aguirre-Díaz, G.J., Aranda-Gómez, J.J., Carrasco-Núñez, G., Ferrari, L. (eds.), Magmatism and tectonics of central and northwestern México: A selection of the 1997 IAVCEI General Assembly Excursions UNAM, Instituto de Geología, México, 39 p.
- Allmendinger, R.W., Cardozo, N., Fisher, D., 2012, Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors in Structural Geology: Cambridge University Press, 289 pp.
- Álvarez-Maya., 1997, Comportamiento de la veta madre en el basamento mesozoico, Distrito Minero de Guanajuato: Universidad Autonoma De San Luis Potosi, 10-17.
- Alvarado-Méndez, H., López-Ojeda, J.A., Caballero-Martínez, J.A., 1998, Carta geológico-minera Guanajuato, F14-C43, Guanajuato, escala 1:50000: Secretaría de Economía, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa con resumen de la geología.
- Angeles-Moreno, E., Nieto-Samaniego, A.F., Ruiz-González, F.J., Levresse, G., Alaniz-Alvarez, S.A., Olmos-Moya M.J.P., Xu, S., and Miranda-Avilés, R., 2017, The transition between shortening and extensional regimes in central México recorded in the tourmaline veins of the Comanja Granite: Journal of South American Earth Sciences, v. 73, no. 1, p. 65–77.
- Ángeles-Moreno, E., 2018, Evolución tectónica cenozoica de las sierras de Guanajuato y Codornices, México. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. Tesis de doctorado, 193 pp.
- Aranda-Gómez, J.J., Dávila-Harris, P., Vassallo-Morales, L.F., Godchaux, M., Bonnichsen, B., Martínez-Reyes, J., Aguirre-Díaz, G.J., and Ortega-Rivera, M.A., 2012, Geology and tectonics of the southeastern portion of the Sierra de Guanajuato, in Aranda-Gómez, J.J., Tolson, G., and Molina-Garza, R.S., eds.,: Geological Society of America Field Guide 25, p.136.
- Beare, M., Sostre, M., 2008, NI-43-101 Technical Report for the Guanajuato Mines Project, Guanajuato State, Mexico: SRK Consulting (U.K.) Ltd., 75p.
- Blanco-Mendoza., J.A., 2014, Exploracion minera en Mesa de la Virgen, sierra de Arperos, León Guanajuato: Instituto Politecnico Nacional, Escuela Superior de Ingenieria y Arquitectura, Ciencias de la Tierra, Unidad Ticoman, p.16.

Botero-Santa, P.A., Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., López Martínez, M., Levresse, G., Xu, S.-S., Ortega-Obregón, C., 2015, Origen y desarrollo de la cuenca El Bajío en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana: Revista Mexicana Ciencias de Ciencias Geológicas, 32, 84-98. [http://satori.geociencias.unam.mx/32-1/\(08\)BoteroSanta.pdf](http://satori.geociencias.unam.mx/32-1/(08)BoteroSanta.pdf).

Cerca-Martínez, L.M., Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 2000, The geologic evolution of the southern Sierra de Guanajuato, Mexico: A documented example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: International Geology Review, 42, 131–151. DOI:10.1080/00206810009465073.

Clark, F.N., Piza-Salas, G., Cubillas-Estrada., R., 2009, Geología Económica de México. Servicio Geológico Mexicano, Asociacion de Ingenieros de Minas Metalurgiatas y Geólogos de México A.C. p.617.

Compton, R.R., 1985, Geology in the field. John Wiley and Sons, E.U.A., p. 398.

Del Pilar-Martínez, A., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Alvarez, S.A., Angeles-Moreno, E., 2020, Geology of the southern Mesa Central of Mexico: recording the beginning of a polymodal fault system, Journal of Maps, 16:2, 199-211, DOI: 10.1080/17445647.2020.1719911

Echegoyén-Sánchez, J., Romero-Martínez, S., Velázquez-Silva, S., 1970, Geología y yacimientos minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato: Guanajuato, Gto., México, Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Informe técnico, 5-47 p.

Fossen, H., 2010, Structural geology. Primera ed. United States of America: Cambridge.

Guerra-Peña, F., 1980, Fotogeología. Facultad de Ingeniería. UNAM, México, 337p.

Gross, W. H., 1975, New ore discovery and source of silver-gold veins, Guanajuato, Mexico: Economic Geology, 70, 1175-1189.

Martínez-Reyes,J.,Mitre-Salazar,L.M.,Moctezuma-Martínez,M., 2012, Las rocas máficas oligocénicas de la Sierra de Guanajuato y los altos de Jalisco: ¿Volcanismo de tipo intra-placa en la parte central de México?, Cartel Geos, Vol. 32, No. 1. Centro de geociencias, UNAM ,Universidad de Guanajuato, 78p.

Martinez-Reyes,J.,1992, Mapa geologico de la sierra de guanajuto con resumen de la geologia de la Sierra de Guanajuato: Universidad Autonoma de Mexico, Instituto de Geologia, Cartas geologicas y minerales, p10.

McClay, K.R., 1987. The mapping of geological structures. Geological Society of London Handbook. John Wiley and Sons. 161p.

Michelangelo Martini, Laura Mori, Luigi Solari, Centeno-García, E., 2011. Sandstone provenance of the arperos basin (Sierra de Guanajuato, central Mexico): Late jurassic–early cretaceous back-arc spreading as the foundation of the guerrero terrane: by the university of chicago, Universidad Nacional Autónoma De México, Instituto De Geología. Centro de geociencias, The Journal of Geology, 2011, volume 119, p 602.

Nieto-Samaniego A.F., Aguirre-Maese, Garcia-Dobarganes., 1992. Interpretación estructural de los rasgos geomorfológicos principales de la Sierra de Guanajuato; Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto De Geología. revista, volumen 10, número 1, 5p.

Nieto-Samaniego A.F., Gilles-Levresse, Alaniz-Alvarez; 2015. New stratigraphic, geochronological, and structural data from the southern Guanajuato mining district, Mexico: Implications for the caldera hypothesis, 10p.

Nieto-Samaniego A.F., 1990. Fallamiento y estratigrafía cenozoica en la parte sudoriental de la Sierra de Guanajuato; Universidad Nacional autónoma de México, Instituto de Geología. Revista, Vol 9, num 2, p 48,49.

Nieto-Samaniego, A.F., 1992, Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la parte sudoriental de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional autónoma de México, Instituto de Geología. Revista, Vol 9, num 2, p146.

Nieto-Samaniego, A. F., Consuelo-Macías, R., Alaniz-Álvarez, S., 1996, Nuevas Edades Isotópicas de la Cubierta Volcánica Cenozoica de la Parte Meridional de la Mesa Central, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 13(1), p 117.

Nieto-Samaniego, A. F., Consuelo-Macías, R., Alaniz-Álvarez, S., 1996, Nuevas Edades Isotópicas de la Cubierta Volcánica Cenozoica de la Parte Meridional de la Mesa Central, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 13(1), p 122.

Nieto-Samaniego A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Camprubí í Cano A., 2005, La Mesa Central de México: Estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana TOMO LVII, NÚM. 3., 318 p.

Nieto-Samaniego A. F., Ojeda-García, A. C., Alaniz-Álvarez, S. A., Xu, S.-S., 2012, Geología de la región de Salamanca, Guanajuato, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 64 (3), p 411.

Nieto-Samaniego, A.F., Báez-López, J.A., Levresse, G., Alaniz-Alvarez, S.A., Ortega-Obregón, C., López-Martínez, M., Noguez-Alcántara, B., Solé-Viñas, J., 2015. New stratigraphic, geochronological, and structural data from the southern Guanajuato Mining District, México: implications for the caldera hypothesis. *International Geology Review*, 58 (2), 246-262. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2015.1072745>.

Puy-Alquiza, M.J., Miranda-Aviles, R., Cruz-Cruz, M., Pérez-Arbizu, O., Vega-González, M., Ana-Zanor, G., 2014, Geochemistry and depositional environment of the Losero Formation in the Mesa Central, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 66(3), 413-430.

Ramos-Arrollo, Y.R., Prol-Ledesma, R.M., Siebe-Grabach, C., 2004. Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros; *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, V. 21, Núm. 2, 2004, p272.

Randall, J.A., Saldaña, A., Clark, K.F., 1994, Exploration in a volcano-plutonic center at Guanajuato, Mexico: *Economic Geology*, 89(8), 1722–1751.

Rio-Vera, P., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Alvarez, S.A., Ángeles-Moreno, E., Escalona-Alcázar, F.J., Pilar-Martínez, A., 2020. Geología estructural de la sierra de Guanajuato y Codornices, Mesa central, México: Boletín de la sociedad geológica mexicana, vol 72, p20.

Ruiz-Gonzalez, F.J., 2015. Estudio de las vetas de turmalina que se registran en la historia de exhumación del granito comanja, sierra de Guanajuato, México: UNAM, Programa de Posgrados en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, p35.

Silva-Romo, G., Mendoza-Rosales, C.C., Campos-Madrugal, E., 2001, Elementos de cartografía geológica, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2001, 292p.

Máxima-Uriarte, J., "Investigación Documental: Características.co. edición: 9 de marzo de 2020. Disponible en: <https://www.caracteristicas.co/investigacion-documental/>. Consultado: 25 de abril de 2020

Wankel, Martínez-Reyes, J., 1928. *Economy geology. The Guanajuato mining district, Guanajuato, Mexico.*: Society of Economic Geologists, Inc., Vol. 23, p15.

Wittich, Ernest. 1909. Las especies minerales de la sierra de Guanajuato. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo 6, p195.

Zimmermann, J.L., Stein, G., Lapierre, Henriette, Vidal, Raul, Campa, M. F., y Monod, Oliver 1990. „Données géochronologiques nouvelles sur les granites laramiens du centro et de l'ouest du Mexique (Guerrero et Guanajuato): Société Géologique de France, Réunion des Sciences de la Terre, 13, Grenoble, Francia, p127.

ANEXOS

Anexo 1. Datos obtenidos en campo ordenados por tipo de estructura.

1.1 Fallas

Secuencia	Punto	Este	Norte	Elevación	Tipo de Roca	Rumbo Az	Echado	Dirección echado	Pitch	Dirección pitch	Cinemática (Tipo de falla)	FECHAS
5	T-1	259209	2337505	2250	Andesita	295	12	SW			Normal	26/02/2020
19	T-4	259153	2337433	2252	Andesita	57	85	NW			Lateral derecha	26/02/2020
33	T-7	259248	2337370	2241	Andesita	168	54	NE	80	NW	Normal	26/02/2020
34	T-7	259248	2337370	2241	Andesita	286	90				Normal	26/02/2020
35	T-7	259248	2337370	2241	Andesita	264	78	NW	25	SE	Normal	26/02/2020
36	T-7	259248	2337370	2241	Andesita	152	38	NE	0		Lateral derecha	26/02/2020
42	T-7	259248	2337370	2241	Andesita	37	76	SE	68	SW	Lateral derecha	26/02/2020
43	T-7	259248	2337370	2241	Andesita	37	28	SE	72	SW	Lateral derecha	26/02/2020
49	T-8	259253	2337326	2270	Andesita	14	11	SE	86	NE	Normal bajo angulo	26/02/2020
50	T-8	259253	2337326	2270	Andesita	14	11	SE	64	SW	Normal bajo angulo	26/02/2020
51	T-8	259253	2337326	2270	Andesita	325	21	SW	90		Normal	26/02/2020
52	T-8	259253	2337326	2270	Andesita	326	26	SW	90		Normal	26/02/2020
54	T-9	259221	2337275	2278	Andesita	62	64	SE	70	NE	Normal	26/02/2020
106	T-36	258945	2337152	2391	Sedimentos volcanicos retrabajados	62	53	SE	65	W	Normal	26/02/2020
107	T-42	259250	2338014	2356	Ceniza volcanica retrabajada	295	73	SW			Normal	07/07/2020
111	T-49	259126	3338498	2448	Capas de travertrino y silice	335	84	SW	30	S	Lateral derecha	07/07/2020
112	T-49	259126	3338498	2448	Capas de travertrino y silice	226	68	SE	90		Normal	07/07/2020
113	T-49	259126	3338498	2448	Capas de travertrino y silice	255	80	SE	40	SE	Normal izquierda	07/07/2020
114	T-49	259126	3338498	2448	Capas de travertrino y silice	245	55	SW	0		Lateral izquierda	07/07/2020
115	T-49	259126	3338498	2448	Capas de travertrino y silice	290	24	SW	47		Normal	07/07/2020
116	T-49	259126	3338498	2448	Capas de travertrino y silice	210	35	SE	90		Normal	07/07/2020
117	T-49	259126	3338498	2448	Capas de travertrino y silice	65	42	SE	80	E	Normal	07/07/2020
118	T-49	259126	3338498	2448	Capas de travertrino y silice	62	70	SE	20	NW	Lateral derecha	07/07/2020
120	T-55	258764	2338513	2441	Brechas	15	62	SE	60	SW	Normal izquierda	07/07/2020
121	T-55	258764	2338513	2441	Brechas	24	65	SE	30	SW	Normal izquierda	07/07/2020
122	T-56	258737	2338436	2422	Brechas (PIROCLASTICA)	333	70	SW	45	SW	Normal izquierda	07/07/2020
123	T-57	258731	2338378	2400	Andesita	61	55	SE	30	s	Normal derecha	07/07/2020
124	T-59	258664	2337653	2305	Andesita	20	30	SE	40	SW	Normal derecha	07/07/2020
127	T-61	258730	2337949	2309	Andesita	0	40	E	55	E	Normal izquierda	07/07/2020

128	T-62	258860	2337894	2287	Andesita	25	50	SE	15	S	Lateral izquierda	07/07/2020
129	T-62	258860	2337894	2287	Andesita	6	73	SE	20	N	Normal izquierda	07/07/2020
130	T-63	258860	2337894	2287	Andesita	138	58	SW	0		Lateral izquierda	07/07/2020
131	T-63	259650	2337747	2280	Andesita	152	78	SW	20	N	Lateral izquierda	07/07/2020
132	T-66	259261	2338132	2364	Andesita	32	45	SE	85	SE	Normal	07/07/2020
133	T-66	259261	2338132	2364	Andesita	35	46	SE	25	S	Lateral derecha	07/07/2020
134	T-66	259261	2338132	2364	Andesita	32	50	SE	75		Lateral izquierda	07/07/2020
135	T-66	259261	2338132	2364	Andesita	30	47	SE	137	0	Lateral izquierda	07/07/2020
136	T-66	259261	2338132	2364	Andesita	27	43	SE	35	NE	Normal izquierda	07/07/2020
139	T-68	259226	2338546	2343	Riolia-Ignimbrita	25	52	NW	15	NE	Lateral izquierda	07/07/2020
147	T-74	258094	2338130	2475	Dacita-Andesita	50	68	NW	60	SW	Normal izquierda	07/07/2020
148	T-74	258094	2338130	2475	Dacita-Andesita	40	78	NW	65	W	Normal izquierda	07/07/2020
149	T-75	258211	2337915	2471	Dacita-Andesita (piroclastica)	48	70	SE	15	NE	Normal izquierda	07/07/2020
150	T-76	258281	2337851	2455	Andesita/Piroclastica (CONTACTO)	10	75	NW				07/07/2020
151	T-77	258395	2337596	2434	Riodacita	55	35	SE				07/07/2020
152	T-78	258550	2337426	2395	Brechas (PIROCLASTICA)	20	70	NW	30	SW	Lateral izquierda	07/07/2020
153	T-78	258550	2337426	2395	Brechas (PIROCLASTICA)	210	70	NW	30	SW	Lateral izquierda	07/07/2020
154	T-78	258550	2337426	2395	Brechas (PIROCLASTICA)	25	84	SE	40	E	Normal izquierda	07/07/2020
155	T-78	258550	2337426	2395	Brechas (PIROCLASTICA)	15	75	SE	50	E	Normal izquierda	07/07/2020
156	T-78	258550	2337426	2395	Brechas (PIROCLASTICA)	15	65	SE	65	SE	Normal izquierda	07/07/2020
157	T-78	258550	2337426	2395	Brechas (PIROCLASTICA)	20	70	SE	30	S	Lateral izquierda	07/07/2020
160	T-79	258756	2337470	2375	Brechas (PIROCLASTICA)	40	90	SE	35	SW	Lateral izquierda	07/07/2020
161	T-79	258756	2337470	2375	Brechas (PIROCLASTICA)	38	87	NW	20	SW	Lateral izquierda	07/07/2020
166	T-79	258756	2337470	2375	Brechas (PIROCLASTICA)	270	50	N	90			07/07/2020
171	T-80	259833	2338089		Andesita El Gigante	313	20	NE	0		lateral derecha	01/05/2020
176	T-81	259691	2337815		Andesita El Gigante	0	80	W	0		lateral derecha	01/05/2020
181	T-82	259589	2337568		Andesita El Gigante	60	16	SE			falla inversa	01/05/2020
186	T-83	259496	2337478		Andesita El Gigante	32	68	SE	0		lateral derecha	01/05/2020
191	T-84	259619	2337370		Andesita El Gigante	300	30	SW			inversa	01/05/2020
196	T-85	259726	2337255		Andesita El Gigante	35	65	NW	0		lateral derecha	01/05/2020
201	T-86	259724	2337171		Andesita El Gigante	170	85	NE	0		lateral derecha	01/05/2020
206	T-87	259990	2336199		Andesita El Gigante	37	70	NW	90		normal	01/05/2020
211	T-88	259928	2336265		Andesita El Gigante	336	80	SW	0		lateral izquierda	01/05/2020
216	T-89	259420	2336389		Andesita El Gigante	20	85	NW	0		lateral izquierda	01/05/2020
221	T-90	259228	2336222		Andesita El Gigante	295	85	SW	20	W	lateral derecha	01/05/2020
226	T-91	259189	2336042		Andesita El Gigante	25	60	NW	90		normal	01/05/2020
231	T-92	259189	2335902		Andesita El Gigante	335	90		0		lateral izquierda	01/05/2020
236	T-93	259127	2335848		Andesita El Gigante	50	86	NW	90		normal	01/05/2020
241	T-94	259055	2335780		Andesita El Gigante	0	70	W	0		lateral derecha	01/05/2020
246	T-95	258986	2335416		Andesita El Gigante	25	70	NW	0		lateral izquierda	01/05/2020

251	T-96	258800	2335432		Andesita El Gigante	340	56	SW	90		normal	01/05/2020
256	T-97	258621	2335585		Andesita El Gigante	24	90		0		lateral derecha	01/05/2020
261	T-98	259606	2337013		Andesita El Gigante	4	70	NW	5	S	lateral derecha	01/05/2020
266	T-99	259728	2337139		Andesita El Gigante	353	85	NE	0		lateral derecha	01/05/2020
271	T-100	259725	2337253		Andesita El Gigante	30	65	NW	0		lateral derecha	01/05/2020
276	T-101	259618	2337372		Andesita El Gigante	65	30	SW			inversa	01/05/2020
281	T-102	259346	2337371		Andesita El Gigante	290	33	SW			inversa	01/05/2020
286	T-103	259496	2337479		Andesita El Gigante	32	68	SE	0		lateral derecha	01/05/2020
291	T-104	259588	2337569		Andesita El Gigante	60	16	SE			inversa	01/05/2020
296	T-105	259098	2337630		Andesita El Gigante	292	30	SW			inversa	01/05/2020
301	T-106	259011	2337678		Andesita El Gigante	342	80	NE	0		lateral izquierda	01/05/2020
306	T-107	258955	2337829		Andesita El Gigante	60	50	SE	90		normal	01/05/2020
311	T-108	258278	2337851		Andesita El Terrero	15	70	NW	90		normal	01/05/2020
316	T-109	257727	2338351		Andesita El Terrero	300	55	SW	60	S	normal izquierda	01/05/2020
321	T-110	259763	2337320		Andesita El Gigante	35	65	NW	0		lateral derecha	01/05/2020
326	T-111	259726	2337160		Andesita El Gigante	353	85	NE	0		lateral derecha	01/05/2020

Tabla A1. Datos de fallas para los estereogramas y rosetas área del terrero y alrededores .

1.2 Fracturas

Secuencia	Punto	Este	Norte	Elevación	Tipo de Roca	Rumbo Az	Rumbo cuad Echado	Dirección e	FECHAS	
2	T-1	259209	2337505	2250	Andesita	241	S 61 W	85	NW	02/05/2020
3	T-1	259209	2337505	2250	Andesita	231	S 51 W	87	SE	02/05/2020
4	T-1	259209	2337505	2250	Andesita	322	N 38 W	85	NE	02/05/2020
6	T-1	259209	2337505	2250	Andesita	248	S 68 W	80	NW	02/05/2020
8	T-2	259203	2337842	2249	Andesita	7	N 7 E	80	NW	02/05/2020
9	T-2	259203	2337842	2249	Andesita	12	N 12 E	78	NW	02/05/2020
10	T-2	259203	2337842	2249	Andesita	13	N 13 E	87	SW	02/05/2020
11	T-2	259203	2337842	2249	Andesita	253	S 73 W	82	NW	02/05/2020
12	T-2	259203	2337842	2249	Andesita	260	S 80 W	87	NW	02/05/2020
13	T-3	259183	2337462	2254	Andesita	246	S 66 W	88	SE	02/05/2020
14	T-3	259183	2337462	2254	Andesita	74	N 74 E	78	SW	02/05/2020
15	T-3	259183	2337462	2254	Andesita	309	N 51 W	86	SW	02/05/2020
16	T-3	259183	2337462	2254	Andesita	324	N 36 W	72	SW	02/05/2020
17	T-3	259183	2337462	2254	Andesita	33	N 33 E	89	SE	02/05/2020
18	T-3	259183	2337462	2254	Andesita	334	N 26 W	61	SW	02/05/2020
20	T-4	259153	2337433	2252	Andesita	274	N 86 W	85	SW	02/05/2020
22	T-5	259214	2337435	2261	Andesita	339	N 21 W	60	NE	02/05/2020
23	T-5	259214	2337435	2261	Andesita	336	N 24 W	71	NE	02/05/2020
24	T-5	259214	2337435	2261	Andesita	345	N 15 W	77	NE	02/05/2020
25	T-6	259261	2337396	2265	Andesita	338	N 22 W	33	NE	02/05/2020
26	T-6	259261	2337396	2265	Andesita	335	N 25 W	26	NE	02/05/2020
27	T-6	259261	2337396	2265	Andesita	325	N 35 W	22	NE	02/05/2020
28	T-6	259261	2337396	2265	Andesita	340	N 20 W	87	SW	02/05/2020
29	T-6	259261	2337396	2265	Andesita	220	S 40 W	86	SE	02/05/2020
30	T-6	259261	2337396	2265	Andesita	175	S 5 E	67	SW	02/05/2020
31	T-6	259261	2337396	2265	Andesita	165	S 15 E	65	SW	02/05/2020
32	T-6	259261	2337396	2265	Andesita	175	S 5 E	78	SW	02/05/2020
38	T-7	259248	2337370	2241	Andesita	14	N 14 E	84	SE	02/07/2020
39	T-7	259248	2337370	2241	Andesita	16	N 16 E	90		02/07/2020
40	T-7	259248	2337370	2241	Andesita	11	N 11 E	83	SE	02/07/2020
41	T-7	259248	2337370	2241	Andesita	330	N 30 W	61	SW	02/07/2020
44	T-8	259253	2337326	2270	Andesita	226	S 46 W	87	NW	02/07/2020
45	T-8	259253	2337326	2270	Andesita	246	S 66 W	80	NW	02/07/2020
85	T-23	258993	2337289	2328	Brechas	55	N 55 E	80	SE	26/02/2020
87	T-25	258995	2337174	2337	Travertino	122	S 58 E	83	SW	26/02/2020
88	T-25	258995	2337174	2337	Travertino	312	N 48 W	85	SW	26/02/2020
99	T-32	258881	2337409	2356	arenas y limmos con gravas dispersa	36	N 36 E	12	SE	26/02/2020

100	T-32	258881	2337409	2356	arenas y limmos con gravas dispersa	280	N 80 W	55	NE	26/02/2020
101	T-32	258881	2337409	2356	arenas y limmos con gravas dispersa	278	N 82 W	73	NE	26/02/2020
102	T-33	258878	2337389	2358	Brechas	357	N 3 W	80	NE	26/02/2020
103	T-33	258813	2337363	2389	Brechas	355	N 5 W	75	NE	26/02/2020
104	T-35	258930	2337104	2354	Capas de travertrino y silice	352	N 8 W	70	NE	26/02/2020
105	T-35	258930	2337104	2354	Capas de travertrino y silice	353	N 7 W	71	NE	26/02/2020
125	T-60	258715	2337980	2305	Brechas (PIROCLASTICA)	20	N 20 E	67	SE	07/07/2020
168	T-81	259848	2338232		Andesita El Gigante	74	N74E	80	SE	
169	T-82	259792	2337936		Andesita El Gigante	350	N10W	80	SW	
170	T-83	259741	2337936		Andesita El Gigante	5	N5E	80	SE	
174	T-87	259582	2337441		Andesita El Gigante	30	N30E	80	NW	
176	T-89	259672	2337310		Andesita El Gigante	30	N30E	80	NW	
179	T-92	259844	2337123		Andesita El Gigante	10	N10E	84	SE	
180	T-93	259893	2337039		Andesita El Gigante	20	N20E	80	SE	
181	T-94	260046	2336950		Andesita El Gigante	327	N33W	80	SW	
182	T-95	260081	2337010		Andesita El Gigante	330	N30W	80	NE	
183	T-96	260044	2336888		Andesita El Gigante	305	N55W	68	SW	
184	T-97	260229	2337051		Andesita El Gigante	60	N60E	68	SE	
185	T-98	260278	2337078		Andesita El Gigante	300	N60W	60	SW	
186	T-99	260365	2337046		Andesita El Gigante	52	N52E	65	SE	
187	T-100	260382	2337030		Andesita El Gigante	82	N82E	80	SE	
188	T-101	260560	2336989		Andesita El Gigante	340	N20W	70	NE	
189	T-102	260600	2337006		Andesita El Gigante	45	N45E	60	NW	
192	T-105	259618	2336661		Andesita El Gigante	100	S80E	78	SW	
193	T-106	259568	2336682		Andesita El Gigante	105	S75E	70	SW	
194	T-107	259576	2336691		Andesita El Gigante	0	N-S	80	E	
195	T-108	259546	2336693		Andesita El Gigante	25	N25E	80	SE	
196	T-109	259639	2336517		Andesita El Gigante	22	N22E	80	NW	
197	T-110	259568	2336483		Andesita El Gigante	340	N20W	80	NE	
198	T-111	259569	2336291		Andesita El Gigante	18	N18E	80	SE	
199	T-112	259520	2336341		Andesita El Gigante	10	N10E	90		
202	T-115	259240	2336243		Andesita El Gigante	310	N50W	80	NE	
203	T-116	259218	2336320		Andesita El Gigante	294	N66W	85	NE	
204	T-117	259257	2336376		Andesita El Gigante	18	N18E	65	NW	
205	T-118	259253	2336094		Andesita El Gigante	23	N23E	67	SE	

211	T-124	258916	2335529	Andesita El Gigante	346	N14W	57	SW
212	T-125	258931	2335647	Andesita El Gigante	350	N10W	70	NE
213	T-126	258786	2335663	Andesita El Gigante	0	N-S	75	W
214	T-127	258786	2335468	Andesita El Gigante	60	N60E	58	SE
217	T-130	258786	2335663	Andesita El Gigante	0	N-S	75	W
218	T-131	258831	2335844	Andesita El Gigante	350	N10W	38	SW
219	T-132	258931	2336216	Andesita El Gigante	345	N15W	55	NE
220	T-133	259045	2336177	Andesita El Gigante	0	N-S	40	W
221	T-134	259035	2336655	El Terrero-Travertinos	320	N40W	70	NE
222	T-135	259097	2336695	El Terrero-Travertinos	320	N40W	60	NE
225	T-138	259840	2337092	Andesita El Gigante	10	N10E	84	SE
227	T-140	259683	2337336	Andesita El Gigante	20	N20E	80	NW
228	T-141	259453	2337264	Andesita El Gigante	40	N40E	88	SE
230	T-143	259389	2337320	Andesita El Gigante	55	N55E	80	SE
232	T-145	259332	2337395	Andesita El Gigante	288	N72W	76	NE
234	T-147	259581	2337444	Andesita El Gigante	30	N30E	80	NW
236	T-149	259139	2337603	Andesita El Gigante	280	N80W	31	NE
237	T-150	259089	2337583	Andesita El Gigante	37	N37E	70	SE
238	T-151	259093	2337564	Andesita El Gigante	90	E-W	70	S
241	T-154	258984	2337623	Andesita El Gigante	53	N53E	80	NW
242	T-155	259029	2337707	Andesita El Gigante	285	N75W	60SW	SW
243	T-156	258455	2337603	Andesita Basaltica	325	N35W	80	NE
244	T-157	258924	2337731	Andesita El Gigante	280	N80W	80	SW
245	T-158	258977	2337766	Andesita El Gigante	34	N34E	89	SE
247	T-160	259138	2337798	Andesita El Gigante	347	N13W	85	SW
248	T-161	259163	2337737	Andesita El Gigante	10	N10E	68	NW
250	T-163	258339	2337815	Andesita El Terrero	20	N20E	88	NW
251	T-164	258318	2337677	Andesita El Terrero	42	N42E	52	NW
252	T-165	258341	2337660	Andesita El Terrero	45	N45E	80	NW
253	T-166	258139	2338015	Andesita El Terrero	14	N14E	90	
254	T-167	257673	2337933	Andesita El Terrero	338	N22W	70	NE

256	T-169	258099	2338481		Andesita El Terrero	28	N28E	70	SE
259	T-172	258274	2338344		Andesita El Terrero	18	N18E	80	NW
261	T-174	258184	2338528		Andesita El Terrero	0	N-S	70	E
262	T-175	258068	2339022		Andesita El Terrero	0	N-S	66	E
263	T-176	258298	2338835		Andesita El Terrero	5	N5E	80	NW
264	T-177	258388	2338851		Andesita El Terrero	55	N55E	70	NW
265	T-178	258477	2338845		Andesita El Terrero	30	N30E	70	NW
266	T-179	258150	2339077		Andesita El Terrero	0	N-S	70	W
267	T-180	258866	2337937		Andesita El Gigante	257	N73W	90	
268	T-181	258914	2337998		Andesita El Gigante	335	N25W	90	
269	T-182	258937	2337980		Andesita El Gigante	325	N35W	60	SW
270	T-183	258976	2337948		Andesita El Gigante	5	N5E	80	SE

Tabla A1.2. Datos de fracturas para los estereogramas y rosetas área del terrero y alrededores

1.3 Bandeamiento, estratificación y foliación magmática.

Secuencia	Punto	Este	Norte	Elevación	Tipo de Roca	Rumbo Az	Echado	Dirección echado	FECHAS
62	T-13	259265	2337080	2285	Riolita-Dacita	159	57	SW	26/02/2020
63	T-13	259265	2337080	2285	Riolita-Dacita	130	37	SW	26/02/2020
64	T-13	259265	2337080	2285	Riolita-Dacita	148	36	SW	26/02/2020
65	T-14	259231	2337090	2290	Ignimbrita	125	50	SW	26/02/2020
66	T-15	259104	2337097	2309	Ignimbrita	348	24	SE	26/02/2020
67	T-15	259104	2337097	2309	Riolita-Ignimbrita	198	68	NW	26/02/2020
67	T-15	259104	2337097	2309	Riolita-Ignimbrita	70	40	SE	26/02/2020
68	T-15	259088	2337104	2302	Riolita-Ignimbrita	177	35	NW	26/02/2020
69	T-16	259088	2337104	2302	Riolita-Ignimbrita	300	36	SW	26/02/2020
70	T-16	259088	2337104	2302	Riolita-Ignimbrita	148	64	SW	26/02/2020
71	T-16	259075	2337116	2315	Riolita-Ignimbrita	0	47	SE	26/02/2020
72	T-17	259075	2337116	2315	Riolita-Ignimbrita	17	70	SE	26/02/2020
73	T-17	259038	2337204	2321	Riolita-Ignimbrita	112	3	SW	26/02/2020
74	T-18	258967	2337166	2336	Ceniza volcanica retrabajada	280	25	NE	26/02/2020
79	T-20	258967	2337166	2336	Ceniza volcanica retrabajada	6	85	NW	26/02/2020
80	T-20	258967	2337166	2336	Ceniza volcanica retrabajada	5	85	NW	26/02/2020
81	T-20	258985	2337174	2325	Arcilla, limolitas, arena fina	68	12	SE	26/02/2020
82	T-21	258985	2337174	2325	Sedimento , carbonato	346	47	NE	26/02/2020
83	T-21	259028	2337238	2318	Arcilla, carbonato, travertino	0	28	E	26/02/2020
84	T-22	258985	2337300	2328	Travertino	45	30	SE	26/02/2020
86	T-24	258995	2337174	2337	Carbonato, silice	288	10	SW	26/02/2020
89	T-25	258972	2337334	2329	Carbonato, travertino	50	20	SE	26/02/2020
91	T-26	258965	2337348	2332	Carbonato, travertino	338	43	NE	26/02/2020
92	T-27	258952	2337384	2333	Carbonato, travertino	356	18	NE	26/02/2020
93	T-28	258944	2337398	2335	Carbonato, travertino	58	34	SE	26/02/2020
94	T-29	258932	2337412	2339	Carbonato, travertino	58	30	SE	26/02/2020
95	T-30	258932	2337412	2339	Carbonato, travertino	250	18	NW	26/02/2020
96	T-30	258887	2337499	2349	Pedernal, travertino	30	36	SE	26/02/2020
97	T-31	258887	2337499	2349	Pedernal, travertino	196	15	NW	26/02/2020

98	T-31	258930	2337104	2354	Capas de travertino y silice	352	70	NE	26/02/2020
104	T-35	258930	2337104	2354	Capas de travertino y silice	353	71	NE	26/02/2020
105	T-35	259191	2338248	2405	Capas de travertino y silice	330	50	SW	07/07/2020
109	T-45	259191	2338248	2405	Capas de travertino y silice	340	70	SW	07/07/2020
110	T-45	259191	2338248	2405	Capas de travertino y silice	275	85	NE	07/07/2020
119	T-55	258764	2338513	2441	Brechas	25	65	SE	07/07/2020
126	T-60	258715	2337980	2305	Brechas (PIROCLASTICA)	10	68	SE	07/07/2020
137	T-67	259269	2338548	2343	Dacita-Andesita (piroclastica)	23	35	NW	07/07/2020
138	T-67	259269	2338548	2343	Dacita-Andesita (piroclastica)	3	35	NW	07/07/2020
140	T-68	259210	2338546	2343	Riolita-Ignimbrita	30	32	SE	07/07/2020
141	T-69	258862	2338864	2493	Riodacita	45	78	SE	07/07/2020
142	T-70	258862	2338864	2493	Riodacita(Lineamiento)	55			07/07/2020
143	T-70	258862	2338864	2493	Riodacita	74			07/07/2020
144	T-70	258862	2338864	2493	Riodacita	22	65	SE	07/07/2020
146	T-74	258094	2338130	2475	Dacita-Andesita	45	60	SE	07/07/2020

Tabla A1.3. Datos de bandeamiento, estratificación y foliación magmática del área del Terrero y alrededores .

1.4 Diques

Secuencia	Punto	Este	Norte	Elevación	Tipo de estructura	Tipo de Roca	Rumbo Az	Echado	Dirección echado	Observaciones	FECHAS
37	T-7	259248	2337370	2241	Dique porfidico	Basico	275	89	NE	Dique basico con vetilalcedonialeo de clorita	02/07/2020
53	T-9	259221	2337275	2278	Dique porfidico	Basico	335	78	NE		02/07/2020
55	T-9	259221	2337275	2278	Dique porfidico	Mafico	310	78	NE	Vetillas con clorita y calcedonia	02/07/2020
56	T-9	259221	2337275	2278	Dique porfidico	Mafico	310	83	NE	Andesita porfidica con prx grandes	02/07/2020
57	T-9	259221	2337275	2278	Dique porfidico	Mafico	322	70	NE		02/07/2020
58	T-10	259274	2337174	2282	Dique porfidico	Mafico	190	73	NW	Hidrotermalismo Clorita/Silice -Travertino	02/07/2020
59	T-10	259274	2337174	2282	Dique porfidico	Mafico	312	79	SW		02/07/2020
257	T-170	258181	2338335		Dique	Dique basaltico	0	70	E		01/05/2020
258	T-171	258224	2338440		Dique	Dique basaltico	28	90			01/05/2020
260	T-173	258328	2338348		Dique	Dique basaltico	326	90			01/05/2020

Tabla A1.4. Datos de diques para los estereogramas y rosetas área del terrero y alrededores .

1.5 Eje de pliegues

Secuencia	Punto	Este	Norte	Elevación	Tipo de Roca	Rumbo Az	Echado	Dirección echado	Plunge	Dirección plunge	Observaciones	FECHAS
75	T-19	258983	2337173	2331	Sedimentos gris claro	308	23	NW			Silice con calcedonia amorfo, se ven marcas dedisolucion	26/02/2020
76	T-19	258983	2337173	2331	Sedimentos gris claro	298	8	NW			Silice con calcedonia amorfo, se ven marcas dedisolucion	26/02/2020
77	T-19	258983	2337173	2331	Sedimentos gris claro	300	13	NW			Silice con calcedonia amorfo, se ven marcas dedisolucion	26/02/2020
78	T-19	258983	2337173	2331	Sedimentos gris claro	295	12	NW			Silice con calcedonia amorfo, se ven marcas dedisolucion	26/02/2020
90	T-25	258995	2337174	2337	Carbonato, silice	270	14	S				26/02/2020
158	T-78	258550	2337426	2395	Brechas (PIROCLASTICA)	147			0			07/07/2020
159	T-78	258550	2337426	2395	Brechas (PIROCLASTICA)	148			0			07/07/2020
162	T-79	258756	2337470	2375	Brechas (PIROCLASTICA)	140		SW	14	SE		07/07/2020
163	T-79	258756	2337470	2375	Brechas (PIROCLASTICA)	138		SW	14	SE		07/07/2020
164	T-79	258756	2337470	2375	Brechas (PIROCLASTICA)	137		SW	10	SE		07/07/2020
165	T-79	258756	2337470	2375	Brechas (PIROCLASTICA)	194		SE	5	SW		07/07/2020

Tabla A1.5. Datos de ejes de pliegue del área del terrero y alrededores .

1.6Foliaciones

Secuencia	Punto	Este	Norte	Elevación	Tipo de Roca	Rumbo Az	Echado	Dirección echado	Pitch	Dirección pitch	FECHAS
1	T-1	259209	2337505	2250	Andesita	310	16	SW			02/05/2020
7	T-2	259203	2337842	2249	Andesita	303	38	SW			02/05/2020
21	T-4	259153	2337433	2252	Andesita	295	29	SW	15	NE	02/05/2020
46	T-8	259253	2337326	2270	Andesita	242	4	NW			02/07/2020

Anexo 2. Mapa geológico-estructural del área de El Terrero y alrededores.

