



## **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
CENTRO DE GEOCIENCIAS  
GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA

### **EDAD, CINEMÁTICA Y FASES DE ACTIVIDAD DEL SEMIGRABEN DE MATANCILLAS, OJUELOS, JAL., MÉXICO**

## **TESIS**

PARA OPTAR AL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

### **PRESENTA**

ANA MILENA SUÁREZ ARIAS

### **TUTOR**

DR. ANGEL FRANCISCO NIETO SAMANIEGO  
CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM

### **MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR**

DR. RAÚL MIRANDA AVILÉS, UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO  
DR. LUCA FERRARI, CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM  
DRA. ELISA FITZ DÍAZ, INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM  
DR. RAMÓN TORRES HERNÁNDEZ, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

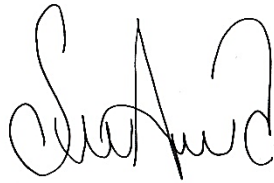
**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Declaración de ética académica**

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al alcance que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecerá debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”.



---

**Ana Milena Suárez Arias**

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo con mucho cariño a mis padres Ana Cely Arias Gamboa y William Suárez Uribe, a mis hermanas Silvia Marcela y María Fernanda, a mi esposo Carlos Quiroz y a mi sobrino Jerónimo. Gracias por todo su apoyo, todos mis logros para ustedes.

## **Agradecimientos**

Un especial agradecimiento a México y a la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrir sus puertas a estudiantes extranjeros y brindarnos la oportunidad de formarnos profesionalmente.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM dentro del proyecto IN 105417 y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por los recursos económicos que recibí para el desarrollo de mi investigación y la manutención durante los dos años de maestría.

Quiero agradecer de manera especial a mi asesor, el Dr. Angel Francisco Nieto Samaniego quien fue parte esencial en este proyecto de investigación. Gracias por su constante apoyo académico y por regalarme de su tiempo cuando lo necesité. Me siento muy orgullosa de ser parte de su equipo de trabajo.

Agradezco a mi comité sinodal, el Dr. Ramón Torres Hernández, Dr. Raúl Miranda Avilés, Dr. Luca Ferrari y la Dra. Elisa Fitz Díaz, por la revisión de la tesis y el gran aporte científico de cada uno de sus comentarios.

A Carlos Quiroz por motivarme para siempre dar lo mejor de mí. Gracias por los consejos académicos y brindarme tanto cariño.

A mi comité tutorial el Dr. Luis Mariano Cerca Martínez y el Dr. Carlos Ortega Obregón. Agradezco sus preguntas y críticas constructivas que fueron de gran ayuda en el desarrollo del proyecto.

A mi equipo de trabajo: Alexis Del Pilar, Paulina Olmos, Alberto Vásquez, Paola Del Rio y Lluvia Landaverde. Agradezco sus valiosas opiniones científicas, su constante ayuda en este proceso y su amistad.

A Alexis Del Pilar Martínez por transmitirme sus conocimientos desde el inicio de la maestría y por siempre tener una buena disposición para enseñarme.

A la Dra. Susana Alaniz por darme la oportunidad de conocer acerca de lo importante que es la divulgación científica.

A las personas que me acompañaron al campo: Alexis, David, Juancho y Alberto.

A toda mi familia Suárez y Arias en quienes siempre encontré palabras reconfortantes para continuar con mi maestría.

A Ricardo Milián de la Cruz por sus sugerencias académicas y por brindarme su amistad de manera incondicional.

A mis buenos amigos Leidy Lu, Rick, David y August. Mi experiencia en México no hubiese sido igual sin ustedes.

A todas las bonitas personas que conocí en el CGEO y que estuvieron a lo largo de este proceso: Janeth, Ángeles, Pepe, Juancho, Fanis, Walter, Gio, Emma, Cesar, Andrea, Mariana, Blanca y Armando.

A los laboratorios que utilicé en mi proyecto y a sus encargados: Taller de Laminación (Técnico Juan Tomás Vázquez y Oscar), Taller de Molienda (Técnico Manuel Albarrán) y Laboratorio de Estudios Isotópicos (Dr. Carlos Ortega).

## Índice

Índice de figuras

Resumen

Abstract

1. Generalidades .....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos .....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Hipótesis .....	4
2. Metodología.....	5
2.1 Recopilación y análisis de la información existente .....	5
2.2 Trabajo de campo .....	5
2.3 Análisis petrográfico.....	6
2.4 Fechamientos Isotópicos .....	6
2.5 Geología estructural.....	7
3. Marco geológico regional .....	8
3.1 Estratigrafía regional.....	9
3.2 Sistemas estructurales regionales .....	10
4. Estratigrafía y geocronología del semigraben .....	13
4.1 Mesozoico.....	13
4.1.1 Rocas cretácicas ( <i>Ksc</i> ) .....	13
4.2 Cenozoico .....	16
4.2.1 Conglomerado Pinos ( <i>Epc</i> ).....	16
4.2.2 Riolita El Gallo ( <i>Ogr</i> ).....	18
4.2.3 Ignimbrita Rincón de Ortega ( <i>Oroi</i> ) .....	19
4.2.4 Riolita Chichíndaro ( <i>Ocr</i> ) .....	22
4.2.5 Ignimbrita Cantera ( <i>Ocai</i> ).....	24
4.2.6 Ignimbrita Cuatralba ( <i>Ocu</i> ).....	25
4.2.7 Grava Las Pilas ( <i>Opg</i> ) .....	27
4.2.8 Basalto Cabras ( <i>Mcb</i> ) .....	29
4.2.9 Piroclástico Las Pilas ( <i>Qpp</i> ).....	30

5. Geología estructural del semigraben.....	32
5.1 Falla El Rayo.....	33
5.2 Falla Chinampas .....	34
5.3 Falla Los Palos.....	37
5.4 Falla El Espía .....	39
5.5 Sistema de fallas en <i>échelon</i> .....	41
5.6 Sistemas de fallas del Complejo Volcánico de Pinos.....	43
5.7 Graben de Matanzas.....	46
6. Discusión.....	47
6.1 Evolución del semigraben de Matancillas .....	47
6.2 Eventos de deformación .....	50
6.3 Significado tectónico .....	53
7. Conclusiones.....	56

## Anexos

Anexo 1 Petrografía

Anexo 2 Datos isotópicos U-Pb



## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Configuración estructural del sur de la Sierra Madre Occidental (SMOc), Mesa Central (MC) y del sector centro - oeste de la Faja Volcánica Transmexicana. ....	1
<b>Figura 2.</b> Mapa geológico de la Mesa Central. ....	10
<b>Figura 3.</b> Estructuras mayores que delimitan la Mesa Central. . ....	11
<b>Figura 4.</b> a) Secuencia sedimentaria del Mesozoico donde se evidencia la deformación por acortamiento. b) secuencia rítmica de estratos de areniscas y lutitas. ....	13
<b>Figura 5.</b> Mapa geológico de semigraben de Matancillas. En la tabla se presentan las edades U-Pb de las unidades litoestratigráficas. Secciones geológicas: <b>A-A´, B-B´, C-C´, D-D´ y E-E´</b> . Segmentos de la falla El Rayo: Segmento norte (SN), segmento centro (SC), segmento sur (SS) y segmento Pinos (SP). ....	14
<b>Figura 6.</b> Secciones geológicas A-A´, B-B´, C-C´, D-D´ y E-E´ del área de estudio. ....	15
<b>Figura 7.</b> Columna estratigráfica del área de estudio. Se presentan nuevas edades U-Pb (azul) y se agregan las edades documentadas en estudios previos. Las líneas curvas de color rojo representan discordancias. ....	16
<b>Figura 8.</b> Conglomerado Pinos (CP). ....	17
<b>Figura 9.</b> Fotomicrografías de la riolita El Gallo. ....	18
<b>Figura 10.</b> Fechamientos isotópicos U-Pb en circón con método LA-ICPMS de la Riolita El Gallo (GM-56). . ....	19
<b>Figura 11.</b> Ignimbrita Rincón de Ortega ( <i>Oroí</i> ). ....	20
<b>Figura 12.</b> Fotomicrografías de la ignimbrita Rincón de Ortega. ....	21
<b>Figura 13.</b> Fechamientos isotópicos U-Pb en zircón con método LA-ICPMS de la Ignimbrita Rincón de Ortega. ....	21
<b>Figura 14.</b> Panorámica del Complejo Volcánico de Pinos, Zacatecas. ....	22
<b>Figura 15.</b> Fotomicrografías de la riolita Chichíndaro. ....	23
<b>Figura 16.</b> Fechamientos isotópicos U-Pb en zircón con método LA-ICPMS de la Riolita Chichíndaro (GM-24). ....	24
<b>Figura 17.</b> Fotomicrografías de la ignimbrita Cantera. ....	25
<b>Figura 18.</b> Fechamientos isotópicos U-Pb en zircón con método LA-ICPMS de la Ignimbrita Cantera. ....	25
<b>Figura 19.</b> Ignimbrita Cuatralba. ....	26
<b>Figura 20.</b> Fotomicrografías de la ignimbrita Cuatralba. ....	27
<b>Figura 21.</b> Fechamientos isotópicos U-Pb en zircón con método LA-ICPMS de la Ignimbrita Cuatralba. ....	28
<b>Figura 22.</b> Fotomicrografías del basalto Cabras. ....	29
<b>Figura 23.</b> Piroclástico Las Pilas. ....	30
<b>Figura 24.</b> Fotomicrografías del piroclástico Las Pilas. ....	31

<b>Figura 25.</b> Esquema estructural de los segmentos de la falla El Rayo del semigraben de Matancillas. Segmento norte (SN), segmento centro (SC), segmento sur (SS) y segmento Pinos (SP).....	33
<b>Figura 26.</b> Falla normal de Chinampas.....	34
<b>Figura 27.</b> Mapa estructural que muestra los ejes principales de distorsión para cada falla encontrada en el campo. ....	35
<b>Figura 28.</b> Mapa estructural que muestra los ejes principales de esfuerzo para cada falla. ....	36
<b>Figura 29.</b> Inversión de datos de estría de la falla de Chinampas. ....	37
<b>Figura 30.</b> Falla normal Los Palos. ....	38
<b>Figura 31.</b> Inversión de datos de estría de la falla Los Palos. ....	39
<b>Figura 32.</b> Falla normal El Espía. ....	40
<b>Figura 33.</b> Inversión de datos de estría de la falla El Espía. ....	41
<b>Figura 34.</b> Falla normal del sistema de fallas en <i>échelon</i> . ....	42
<b>Figura 35.</b> Inversión de datos de estría de las fallas en <i>échelon</i> . ....	43
<b>Figura 36.</b> a) Falla normal en Pinos afectando a la riolita Chichíndaro (Ocr) y al Conglomerado de Pinos (Epc) basculado hacia el NE.....	45
<b>Figura 37.</b> Inversión de datos de estría de las fallas medidas en el CVP. ....	46
<b>Figura 38.</b> Modelos esquemáticos de las etapas de actividad de la falla El Rayo del semigraben de Matancillas. Segmento Norte (SN), segmento Centro (SC), segmento Sur (SS), segmento Pinos (SP), Falla 1 (F1) y Falla 2 (F2).....	48
<b>Figura 39.</b> Etapas de crecimiento y propagación de la falla El Rayo. ....	49
<b>Figura 40.</b> Columna estratigráfica y eventos de deformación del área de estudio. ....	50
<b>Figura 41.</b> Mapa estructural del sur de la Sierra Madre Occidental (SMOc), Mesa Central (MC) y del sector centro - oeste de la Faja Volcánica Transmexicana. ....	56

## Resumen

En el centro de México existe un conjunto de fallas normales que corta en dirección ~N-S a las provincias fisiográficas Mesa Central (MC) y Faja Volcánica Transmexicana (FVT), a ese sistema de fallas aquí se lo denomina graben Penjamillo – Pinos (GPP). Dicho sistema está constituido por fosas tectónicas que se extienden 250 km desde Pinos, Zacatecas, hasta Penjamillo, Michoacán. Los principales rasgos morfológicos del GPP son tres grandes sectores: en la parte norte el semigraben de Matancillas, en la parte central un conjunto de grábenes y semigrábenes que se extienden desde Lagos de Moreno, Jalisco, hasta Cd. Manuel Doblado y al sur, el graben de Penjamillo. Este trabajo se enfoca en el semigraben de Matancillas ubicado en la porción sur de la Mesa Central.

El estudio del semigraben de Matancillas consistió en la cartografía de unidades litoestratigráficas y en el análisis estructural de las fallas principales. En el área de estudio fueron identificadas diez unidades litoestratigráficas con edades del Mesozoico al Cuaternario, de las cuales se fecharon cinco por el método U-Pb en circón: riolita El Gallo ( $34.61 \pm 0.15$  Ma), ignimbrita Rincón de Ortega ( $30.63 \pm 0.62$  Ma), riolita Chichíndaro ( $29.53 \pm 0.21$  Ma), ignimbrita Cantera ( $29.24 \pm 0.32$  Ma;  $29.80 \pm 0.26$ ) e ignimbrita Cuatralba ( $27.68 \pm 0.38$  Ma;  $28.81 \pm 0.39$  Ma;  $27.96 \pm 0.58$  Ma;  $28.83 \pm 0.51$  Ma). Considerando las relaciones estratigráficas de las unidades de roca y las relaciones de corte de las fallas principales se pudieron reconocer cuatro eventos de deformación: El primer evento (D1) se registra en las rocas cretácicas, las cuales presentan estructuras de acortamiento asociadas a la deformación Laramide. El segundo evento de deformación (D2) fue extensional y es inferido a partir del depósito del conglomerado Pinos. El tercer evento (D3) ocurrió a ca. 30 Ma, representado por una discordancia angular producida por fallas NW-SE con arreglo de tipo dominó. El cuarto evento de deformación (D4), que comprende dos fases de actividad (D4F1 y D4F2), ocurrió a finales del Oligoceno tardío. D4F1 generó el semigraben de Matancillas de orientación NNE y D4F2, de menor magnitud, produjo fallas normales con componente lateral y rumbo NE-SW;

estas fallas se encuentran desplazando a las estructuras formadas durante la primera fase de este evento.

El semigraben de Matancillas tiene una gran similitud en longitud y orientación con el patrón de estructuras de la Sierra Madre Occidental (grábenes Calvillo, Juchipila, Tlaltenango y Bolaños), diferenciándose del conjunto de fallas de la MC. De acuerdo a las edades de deformación reportadas de los grábenes Juchipila ( $< 28$  Ma), Aguascalientes ( $< 28$  Ma) y Villa de Reyes ( $< 30$  Ma  $> 27$  Ma), y dado que el registro de actividad más antiguo del semigraben de Matancillas es de  $< 28$  Ma, se propone que esta estructura se formó durante las primeras fases de deformación extensional que afectó al centro de México y que culminó con la apertura del Golfo de California.

## Abstract

In central Mexico there is a ~N-S normal faults set that cuts the Mesa Central (MC) and Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB) physiographic provinces; this system of faults here is called as whole, the Penjamillo – Pinos graben (GPP). The structure extends for ca. 250 km from Pinos, Zacatecas, to Penjamillo, Michoacán. The main morphological characteristics of the GPP are three large sectors that are: Matancillas half graben (MHG) in the north, a set of grabens and half grabens in the centre, and Penjamillo graben in the south. This work focuses on the Matancillas semigraben located in the southern portion of the MC.

The study of Matancillas half graben consisted in the lithostratigraphic units cartography and structural data analysis of principal faults. Ten Mesozoic to Quaternary lithostratigraphic units were identified in the studied region. For five of these units, new U-Pb ages are presented: El Gallo rhyolite ( $34.61 \pm 0.15$  Ma), Rincón de Ortega ignimbrite ( $30.63 \pm 0.62$  Ma), Chichíndaro rhyolite ( $29.53 \pm 0.21$  Ma), Cantera Ignimbrite ( $29.24 \pm 0.32$  Ma;  $29.80 \pm 0.26$ ) and Cuatralba ignimbrite ( $27.68 \pm 0.38$  Ma;  $28.81 \pm 0.39$  Ma;  $27.96 \pm 0.58$  Ma;  $28.83 \pm 0.51$  Ma). Considering the stratigraphic relationships of the rock units and the cross cutting relation of the main faults, four deformation events are recognized: The first event (D1) is recorded in the cretaceous rocks, which present shortening structures associated with the Laramide deformation. The second deformation event (D2) was extensional and is inferred from the Pinos conglomerate deposit. The third event (D3) occurred at ca. 30 Ma, established by an angular unconformity produced by NW-SE domino-style faults. The four event (D4) has two deformational phases (D4F1 and D4F2) that occurred in the late Oligocene. D4F1 generated NS to NNE-SSW normal faults (MHG), and D4F2, of lesser magnitude, produced NE-SW normal faults with lateral component; This faults displaced the structures formed during the first phase of this event.

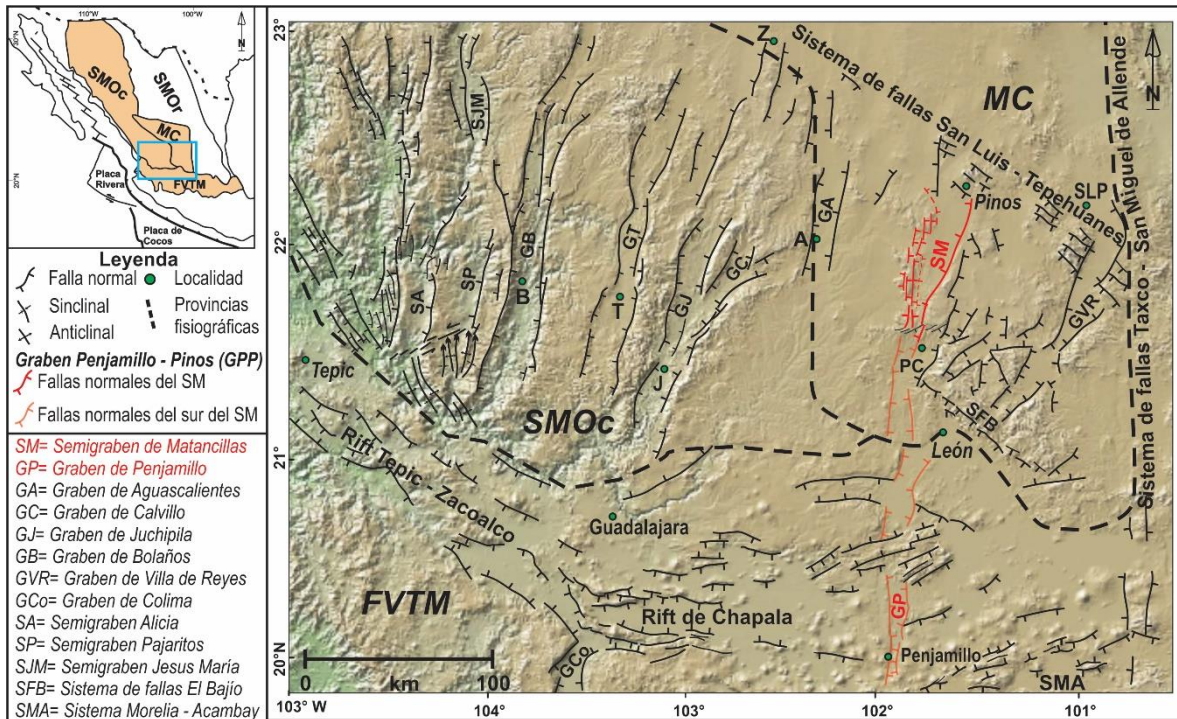
The Matancillas half graben shows similarity in longitude and orientation with the Sierra Madre Occidental structures pattern, differentiating from the set of faults of the MC. According to the ages reported for extensional faulting of Juchipila ( $< 28$

Ma), Aguascalientes (< 28 Ma) y Villa de Reyes (< 30 Ma > 27 Ma) grabens, and the older fault activity of the Matancillas half graben (< 28 Ma), we propose that this structure was formed during the first phases of extensional deformation that affected the center of Mexico, and culminated with the opening of the Gulf of California.

# 1. Generalidades

## 1.1 Introducción

En el centro de México se localizan las provincias fisiográficas Sierra Madre Occidental (SMOc), Mesa Central (MC) y Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). La historia geológica de cada provincia fisiográfica registra configuraciones estructurales propias y muy contrastantes entre ellas (Figura 1).



**Figura 1.** Configuración estructural del sur de la Sierra Madre Occidental (SMOc), Mesa Central (MC) y del sector centro - oeste de la Faja Volcánica Transmexicana. Figura basada en Nieto-Samaniego *et al.* (1999); Ferrari (2000) y Del Pilar-Martínez *et al.* (2019). Localidades: PC: Paso de Cuarenta, SLP: San Luis Potosí, A: Aguascalientes, J: Juchipila, T: Tlaltenango, B: Bolaños, Z: Zacatecas.

En la parte sur de la SMOc las estructuras son fosas tectónicas subparalelas, con más de un ciento de kilómetro de longitud, y con orientación preferencial N-S a NNE-SSW. Las fosas tectónicas y las edades de su actividad principal, enlistadas de este a oeste son: grábenes de Calvillo y Juchipila (< 28 Ma), Tlaltenango (22 - 20 Ma), Bolaños (25 - 23 Ma), los cuales cortan a ignimbritas del Oligoceno tardío - Mioceno temprano (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Ferrari *et al.*, 2002; Ferrari *et al.*, 2005;

Ramos-Rosique, 2012), y los semigrábenes de Alicia, Pajaritos y Jesús María (<21 Ma) que cortan a ignimbritas del Mioceno temprano (Ferrari *et al.*, 2005).

La región sur de la MC está limitada por estructuras mayores: al norte por el Sistema de Fallas San Luis – Tepehuanes, al oeste por el Graben de Aguascalientes (Loza-Aguirre *et al.*, 2008; Nieto-Samaniego *et al.*, 2007), al este por el Sistema de Fallas Taxco – San Miguel de Allende (Alaniz- Álvarez *et al.*, 2002; Alaniz- Álvarez *et al.*, 2005) y al sur por el Sistema de Fallas El Bajío (Aranda *et al.*, 1989; Botero *et al.*, 2015). Dentro de esa región, se encuentra un conjunto de fallas normales y grábenes que se intersectan unos a otros con orientaciones NW-SE, NE-SW, E-W y N-S, cortando unidades estratigráficas del Cenozoico (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Nieto-Samaniego *et al.*, 2007). Del Pilar-Martínez *et al.* (2019) reportan para el sur de la MC una discordancia angular, la cual interpretan como el cambio en el estilo de deformación ocurrido a ca. 30.5 Ma. Se pasó de un estilo rotacional de fallas NW-SE con arreglo de tipo dominó, a uno no rotacional donde se desarrolló un sistema polimodal de fallas.

La orientación de las estructuras en el sector centro y occidente de la FVTM son NE-SW, WSW-ENE, E-W y excepcionalmente N-S (Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Ferrari *et al.*, 2012). Dentro de estos sectores, se encuentran grandes sistemas de fallas como el Rift Tepic-Zacoalco, graben de Colima, rift de Chapala y el Sistema de fallas Morelia-Acambay (Ferrari *et al.*, 2012). Estas estructuras cortan a unidades estratigráficas del Mioceno tardío al Cuaternario.

Existe un sistema de fallas normales formando grábenes y semigrábenes con dirección ~N-S (Figura 1: Fallas normales en color rojo), el cual se extiende 250 km desde Pinos, Zacatecas, hasta Penjamillo, Michoacán y se intercepta con las estructuras mayores de la MC y de la FVT. Ese sistema de fallas se denominará aquí graben Penjamillo – Pinos (GPP).

El rasgo más meridional del GPP es el Graben de Penjamillo (GP), localizado en el poblado de Penjamillo de Degollado, Michoacán (Figura 1). Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego (1990) describen a esta estructura como una depresión tectónica de ~25 km de longitud caracterizada por su notable orientación N-S, que contrasta con



la tendencia general de las fallas E-W de la FVT. Las fallas normales que delimitan al GP afectan a rocas volcánicas del Mioceno y del Cuaternario y generan un desnivel topográfico de hasta 150 m. En su parte media, el GPP está constituido por un sistema de fallas y fosas tectónicas con dirección N-S a NNE-SSW. Ese sistema de fallas es cortado por estructuras E-W, pero también se observa que las fallas NS y NNE cortan a fallas E-W y NW-SE. Las estructuras de la parte media del GPP afectan a rocas con edades del Oligoceno hasta el Cuaternario. La parte norte del GPP lo constituye el graben de Matancillas con orientación ~N-S, el cual fue reportado por Aranda-Gómez *et al.* (1989), siendo el objeto de este estudio, y que es renombrado aquí como semigraben de Matancillas (SM).

En el SM se observa una gran similitud en longitud y orientación con el patrón de estructuras de la SMOc, diferenciándose del conjunto de fallas de la MC (Figura 1). El estado de erosión del semigraben de Matancillas es avanzado (relieve bajo con lomeríos suaves) y sus fallas cortan a rocas de ~28 Ma, esto sugiere fuertemente que sus primeras primeras fases de actividad fueron de edad similar a los grábenes de Juchipila y Calvillo (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; Ferrari *et al.*, 2018).

Este trabajo de investigación consiste en el estudio del semigraben de Matancillas (SM), el cual se extiende 90 km desde Pinos, Zacatecas, hasta Paso de Cuarenta, Jalisco. Integrando la cartografía geológica de unidades litoestratigráficas, petrografía, fechamientos isotópicos U-Pb, secciones geológicas y el reconocimiento y análisis estructural de las fallas principales, en este trabajo se propone la edad, cinemática y las fases de actividad del semigraben de Matancillas.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Establecer la edad, cinemática y las fases de actividad del semigraben de Matancillas, Ojuelos, Jal., México.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Definir la geometría del sistema semigraben de Matancillas en planta y sección.
- Determinar las direcciones principales de deformación en los segmentos mayores del semigraben.
- Determinar la edad de las fases de actividad del semigraben

## **1.3 Hipótesis**

El semigraben de Matancillas es una estructura regional ~N-S del Oligoceno tardío, formada durante las primeras fases de la extensión que afectó al centro de México. Sus primeras fases de actividad fueron contemporáneas con los grábenes de Calvillo y Juchipila.

## 2. Metodología

### 2.1 Recopilación y análisis de la información existente

En esta etapa se realizó la revisión de la información existente del área de estudio. Se utilizaron los mapas geológicos y topográficos a escala 1:250 000 y 1:50 000 (Tabla 1) proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Servicio Geológico Mexicano (SGM). Además de esto, se consultaron artículos científicos, libros e informes técnicos.

Título	Clave	Escala
San Luis Potosí	F14-4	1:250 000
Guanajuato	F14-7	1:250 000
Palo Alto	F14-C11	1:50 000
Ojuelos	F14-C12	1:50 000
Licenciado Primo Verdad	F14-C21	1:50 000
Sierra de Jacales	F14-C22	1:50 000
Loreto	F14-A71	1:50 000
Pinos	F14-A72	1:50 000
Villa Garcia	F14-A81	1:50 000
El Obraje	F14-A82	1:50 000

**Tabla 1.** Cartas topográficas y geológicas del INEGI y del SGM usadas en este trabajo.

### 2.2 Trabajo de campo

El trabajo de campo se apoyó en el análisis de la información existente, y la fotointerpretación de imágenes de Google Earth, permitiendo planear la visita a puntos GPS de interés (e. g. contactos geológicos, fallas, discordancias) como ayuda en el levantamiento cartográfico a escala 1:50 000 del área de estudio.

En el campo se realizaron levantamientos y toma de muestras de secciones estratigráficas, para el control litológico. Adicionalmente, se recopilaron los datos estructurales de fallas, fracturas y pseudoestratificación. Mediante las

observaciones y datos obtenidos en campo se obtuvo como resultado el mapa geológico del área de estudio.

### **2.3 Análisis petrográfico**

El estudio microscópico se realizó en láminas delgadas de las unidades estratigráficas cartografiadas en el campo. Para este análisis fueron establecidas diferentes características petrográficas como textura, estructura, porcentaje de abundancia de cristales y la composición mineralógica.

Las láminas delgadas se elaboraron en el Taller de Laminación del Centro de Geociencias y su posterior descripción microscópica, se llevó a cabo en el Laboratorio de Geofluidos del Centro de Geociencias, empleando el microscopio Olympus BX51. Las abreviaturas de los minerales que se usaron fueron las propuestas por Whitney y Evans (2010).

### **2.4 Fechamientos Isotópicos**

Considerando las relaciones estratigráficas encontradas en el campo, y el estudio petrográfico, se eligieron las muestras GM-15, GM-24, GM-31, GM-52, GM-54, GM-56, GM-62, GM-64 y GM-65, para las dataciones isotópicas por el método U-Pb, mediante la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS), en el laboratorio de estudios isotópicos (LEI) del Centro de Geociencias, UNAM.

El procedimiento para la preparación de cada muestra antes del análisis isotópico consistió en: (1) trituración de la muestra, (2) separación de los minerales pesados por medio de la batea, (3) separación del circón bajo lente binocular, (4) montura de los circones, (5) encapsulamiento en resina epóxica en una probeta, (6) pulido de la probeta y (7) obtención de imágenes de catodoluminiscencia (IC) de los circones. En las imágenes IC, se eligieron los puntos a ablacionar en la superficie de cristales que no tuvieran inclusiones ni fracturas. La metodología usada para los fechamientos U-Pb fue la descrita por Solari *et al.* (2010).

## 2.5 Geología estructural

Las relaciones de corte de las fallas observadas en el campo, junto con el análisis estructural, permiten comprender y reconstruir la evolución tectónica de una región específica. El análisis de los datos de falla para el caso de una deformación bidimensional responde al criterio de fractura de Coulomb-Navier, el cual postula que las fallas se desarrollan siguiendo los planos donde los esfuerzos de cizalla son iguales a la fricción interna del material multiplicada por el esfuerzo normal.

Diferentes métodos de inversión de estrías son usados para determinar los ejes principales de los tensores de distorsión y esfuerzo. En este trabajo se calcularon los ejes principales de distorsión mediante el método de distribución “Linked Bingham”. Este método resuelve los ejes de elongación ( $\epsilon_i$ ; el alargamiento se consideró positivo). Para el cálculo de los ejes principales de esfuerzo se utilizó el método de los diedros rectos, que asume que el vector de desplazamiento es paralelo al esfuerzo máximo de cizalla resuelto sobre el plano de falla, obteniendo las orientaciones de los esfuerzos  $\sigma_i$  (Angelier y Mecheler, 1977).

Los datos estructurales recolectados en el campo fueron analizados para cada estación, se obtuvieron como resultado los diagramas de contornos de concentraciones de polos, que fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior, utilizando el software Stereonet 10.0. Con la inversión de datos de estría de falla se obtuvieron los ejes de distorsión, por el método “Linked Bingham” usando el software FaultKin 8.0 de Richard Allmendiger, y los ejes principales de esfuerzo se determinaron a partir de la metodología de diedros rectos usando el software Wintensor 5.8.8 de Delvaux y Sperner (2003).

### 3. Marco geológico regional

La Mesa Central (MC) es una planicie elevada que se localiza en la parte central de México, ha sido considerada como la parte sur de la provincia extensional de cuencas y sierras de México (Aranda Gómez *et al.*, 1998; Aranda Gómez *et al.*, 2000). La provincia fisiográfica Mesa Central fue reconocida por Raisz (1959) atendiendo principalmente a la orografía. Posteriormente, Nieto-Samaniego *et al.* (2005) redefine los límites de esta provincia fisiográfica mediante características orográficas y geológicas, logrando diferenciarla de las regiones aledañas.

La MC está limitada al norte y oriente por la Sierra Madre Oriental, al occidente por la Sierra Madre Occidental y al sur con la Faja Volcánica Transmexicana. El espesor cortical de la MC es de ca. 32 km, lo que contrasta con los espesores corticales de la SMO<sub>r</sub> y SMO<sub>c</sub> que tienen ca. 37 y 40 km, respectivamente (Kerdan, 1992; Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Se infiere la presencia de cuerpos parcialmente fundidos de material mantélico atrapados en la zona adelgazada de la corteza de la MC, sugiriendo que la adición de materiales fundidos en la base de la corteza produjo el levantamiento y calentamiento de la parte inferior y media de la corteza (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

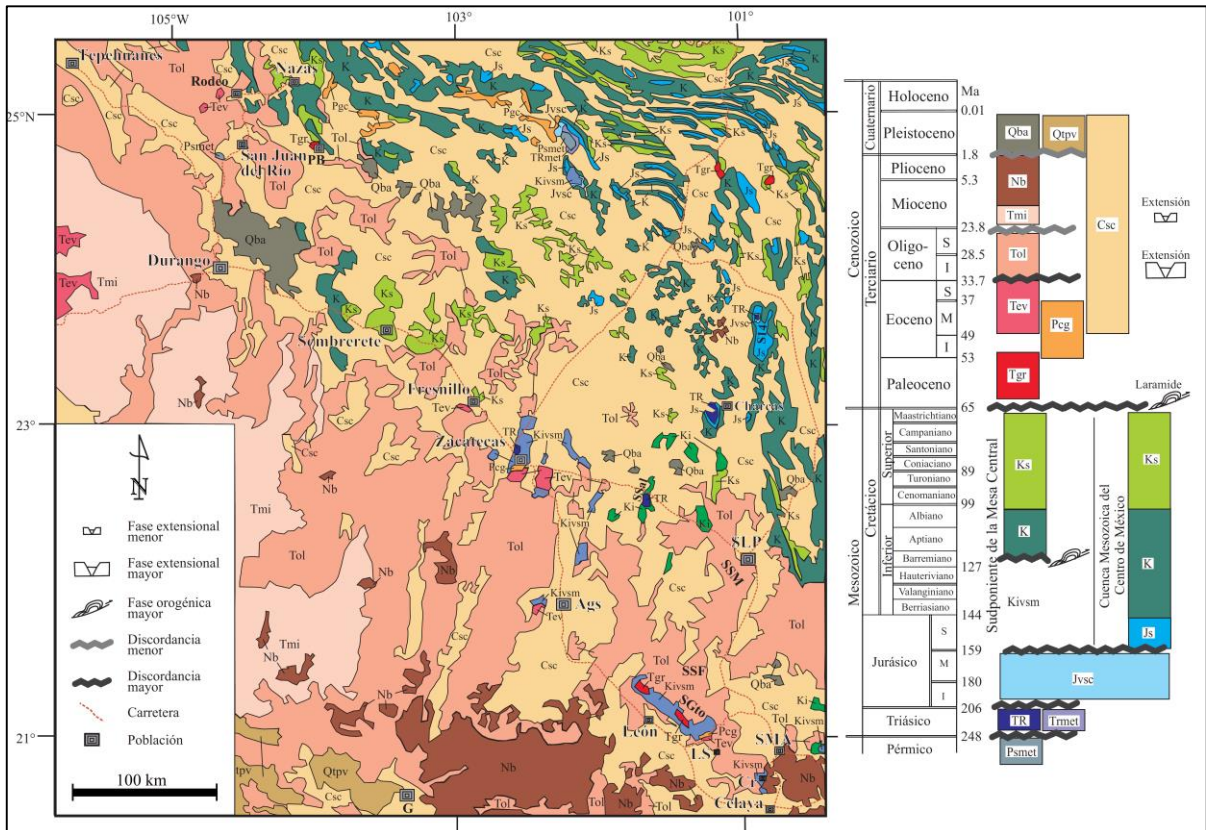
En la MC se definieron dos regiones (norte y sur) limitadas por un sistema de fallas normales de edad cenozoica, denominado Sistema de fallas San Luis –Tepehuanes (Nieto-Samaniego *et al.*, 2007). La región norte es la de mayor tamaño y presenta cotas por debajo de 2000 msnm; esta región tiene grandes cuencas continentales rellenas de sedimentos aluviales y lacustres. La región sur es una región montañosa y presenta cotas por encima de los 2000 msnm; esta región presenta una cubierta volcánica cenozoica en su mayoría (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005), que hace parte de la extensa cubierta volcánica de composición félsica de la Sierra Madre Occidental (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999).

### 3.1 Estratigrafía regional

En el registro estratigráfico de la MC (Figura 2) no hay afloramientos reportados de rocas paleozoicas; las rocas más antiguas son de la base del Triásico (~252 Ma) y consisten de un solo afloramiento de esquistos, reportando en Iriondo *et al.* (2003). Más abundantes son los depósitos del Triásico Superior y consisten de sedimentos marinos. La distribución de facies permite establecer la existencia de un margen continental en la MC, con el océano ubicado en el occidente. A esta secuencia de rocas triásicas le sobreyacen rocas de carácter continental volcanosedimentarias del Jurásico Medio, que evidencian un cambio en el ambiente geológico, y la instauración de un arco volcánico continental. Sobreyaciendo discordantemente a las rocas del Jurásico Medio se reportan rocas de una secuencia marina del Jurásico Tardío, en las que no aparecen componentes volcánicos, indicando una transgresión marina (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Las rocas del Cretácico son evidencia de la continuación de sedimentación marina que inició en el Jurásico Tardío. Se identifican tres ambientes marinos: (1) Plataforma Valles-San Luis Potosí (PVSLP) en el borde oriental de la MC; (2) Cuenca Mesozoica del Centro de México localizada hacia el occidente de la PVSLP y ocupando casi la totalidad de la MC, que consiste en un paquete muy grueso de sedimentos marinos y (3) Secuencia volcanosedimentaria marina, formada por un apilamiento grueso de basalto almohadillado, derrames, y cuerpos intrusivos de diabasa, que se encuentran intercalados con capas de toba, arenisca, pizarra y pedernal (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Estas unidades del mesozoico experimentaron deformación por acortamiento durante la orogenia Laramide, que en el centro de México es progresiva hacia el oriente entre *ca.* 94-79 Ma, y su término está limitado por cuerpos ígneos intrusivos no deformados (Cuéllar-Cárdenas *et al.*, 2012).

El cenozoico en la MC representa el cambio de medio marino a continental, en el que predominan rocas continentales, sedimentarias y volcánicas, y se han identificado tres discordancias regionales: a) discordancia del Mesozoico-Cenozoico, que representa el *hiatus* sedimentario durante la fase orogénica Laramídica; b) discordancia del Eoceno medio; se caracteriza por discordancias litológicas y en ocasiones de tipo angular, que en el sector sur, centro y oeste de la

MC, se ubica en la parte superior del Eoceno medio; sin embargo, en las localidades donde los sedimentos del Paleoceno-Eoceno están ausentes se une con la discordancia del Mesozoico-Cenozoico; c) discordancia del Eoceno superior-Oligoceno, representa un *hiatus* en la actividad volcánica, ya que pasa del volcanismo eocénico que presenta composición andesítica y riolítica, a un volcanismo riolítico en el Oligoceno (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).



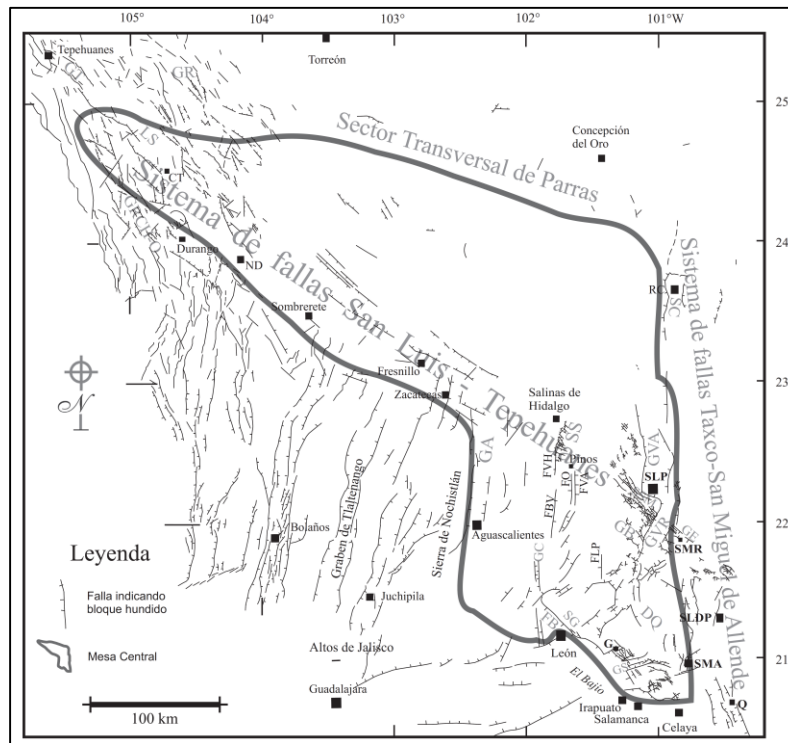
**Figura 2.** Mapa geológico de la Mesa Central. Ags: Aguascalientes, Cr: Corrales, G: Guadalajara, PB: Peñón Blanco, S14: Sierra de Catorce, SGTO: Sierra de Guanajuato, SLP: San Luis Potosí, SMA: San Miguel de Allende, SSM: Sierra de San Miguelito, SSF: Sierra de San Felipe, SSal: Sierra de Salinas (tomado de Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

### 3.2 Sistemas estructurales regionales

La MC está limitada por varias estructuras mayores que forman los límites entre las provincias circundantes (Figura 3). Al norte, el Sector Transversal de Parras; al este, el Sistema de fallas Taxco - San Miguel de Allende; al oeste, el graben de Aguascalientes; al sur, el sistema de fallas El Bajío; y en la parte media de la MC se



encuentra el Sistema de fallas San Luis –Tepehuanes (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).



**Figura 3.** Estructuras mayores que delimitan la Mesa Central. GT: Graben de Tepehuanes, GR: Graben de Rodeo, LS: Laguna de Santiaguillo, GRCH-O: Graben Río Chico-Otinapa, GA: Graben de Aguascalientes, FVH: Falla Villa Hidalgo, FBV: Falla Buena Vista, FO: Falla El Obraje, FVA: Falla Villa de Arriaga, FLP: Falla Los Pájaros, GC: Graben El Cuarenta, FB: Falla del Bajío, GS: Graben de la Sauceda, GB: Graben de Bledos, GVR: Graben Villa de Reyes, GVA: Graben de Villa de Arista, GE: Graben de Enramadas, DQ: Depresión de La Quemada, SSM: Sierra de San Miguelito, SG: Sierra de Guanajuato, SC: Sierra de Catorce, SS: Sierra de Salinas, RC: Real de Catorce, G: Guanajuato, SLP: San Luis Potosí, SMR: Santa María del Río, SLDP: San Luis de la Paz, ND: Nombre de Dios, SMA: San Miguel de Allende, Q: Querétaro (tomado de Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

La falla El Bajío es el límite de las provincias fisiográficas Mesa Central y Faja Volcánica Transmexicana en su sector central. La falla El Bajío se considera como un sistema de fallas normales de edad cenozoica (Nieto-Samaniego, 1990; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Botero-Santa *et al.*, 2015). Las fallas se observan en las zonas donde está expuesto el basamento y cortan rocas oligocénicas (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001). La falla El Bajío está constituida por dos segmentos mayores, el más oriental se extiende desde Celaya hasta Irapuato, en el estado de Guanajuato, donde la zona de falla tiene dirección ~E-W, y el segundo

segmento forma el escarpe SW de la Sierra de Guanajuato, siendo esa sierra el bloque levantado de la falla. Ese segmento tiene 80 km de largo y se extiende desde Irapuato, hasta León, Guanajuato (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

El Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende es el límite entre la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental. Se trata de un sistema de fallas con dirección NNW-SSE (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001). El sistema de fallas se ha reconocido desde Taxco, Guerrero, hasta la Sierra de Catorce en San Luis Potosí. Además, este sistema de fallas coincide con el límite de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, localizada al este, y la Cuenca Mesozoica del Centro de México, localizada al oeste (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

El Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes se observa como un gran lineamiento que se extiende desde San Luis de la Paz, Gto., hasta Tepehuanes, Dgo., en su parte poniente limita a las provincias de la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central y en su parte este las regiones meridional y septentrional de la Mesa Central (Loza-Aguirre, 2008; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Este sistema tiene una longitud de ~600 km y está formado por fallas normales de rumbo NW-SE, con edades de actividad que van desde el Eoceno hasta el Cuaternario. (Alaniz-Álvarez y Nieto Samaniego, 2005; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Loza-Aguirre, 2008).

El Graben de Aguascalientes consiste en un sistema de fallas que forman un semigraben; es el límite entre la SMOc y la porción sur de la MC. La falla maestra del graben se extiende con dirección N-S por 150 km y principalmente desplaza a rocas volcánicas cenozoicas. Se extiende desde los Altos de Jalisco hasta su intersección con el Sistema de fallas San Luis Tepehuanes, cerca de Zacatecas (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Loza-Aguirre, 2008).

El Sector Transversal de Parras de la Sierra Madre Oriental es el límite norte de la MC, constituido por pliegues que forman un sistema montañoso de dirección ~E-W. Los pliegues tienen dirección N 70° W y se caracterizan por ser angostos y alargados, la mayoría de ellos presentan vergencias al NNE (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

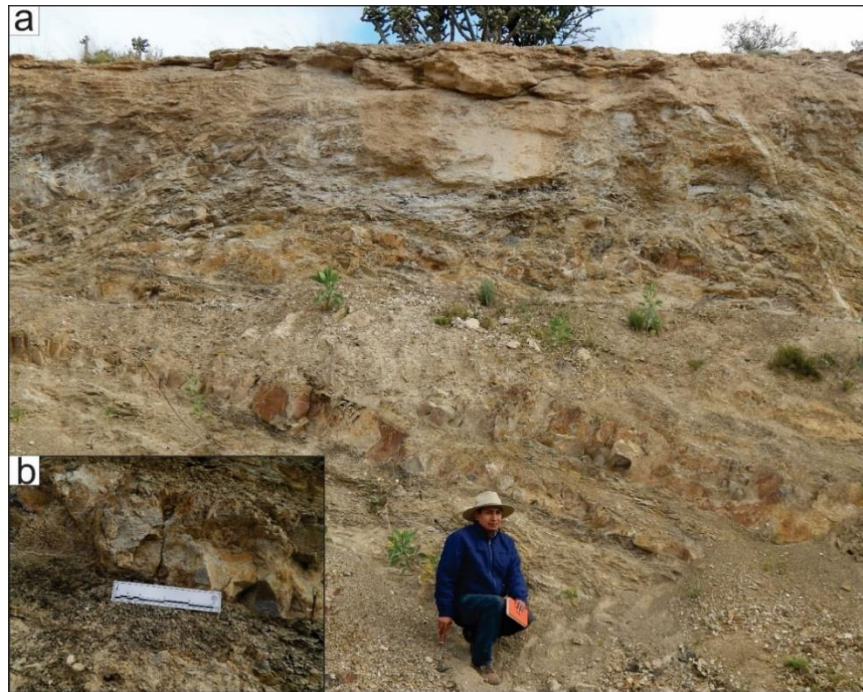
## 4. Estratigrafía y geocronología del semigraben

### 4.1 Mesozoico

#### 4.1.1 Rocas cretácicas (*Ksc*)

En el área de estudio Aguillón-Robles (1983) cartografió la Formación Indidura (Kelly 1936; Imlay, 1937) y la Formación Caracol (Imlay, 1937). Esta unidad se observó en la porción septentrional de la zona de estudio; sus mejores afloramientos están al poniente de Pinos y La Laborcilla, y al oriente de la localidad El Obraje (Figura 4).

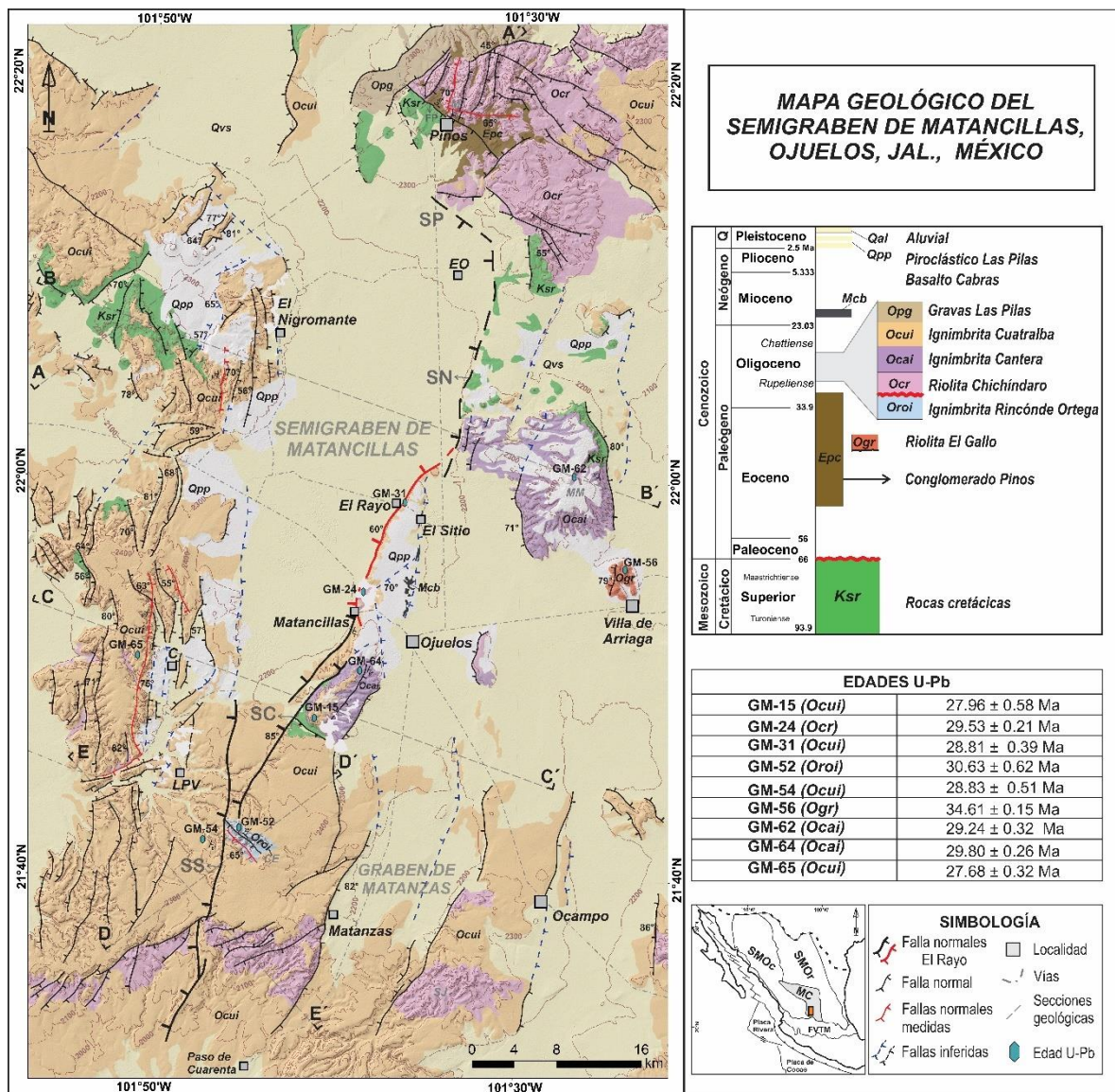
En las rocas cretácicas predominan calizas con nódulos de pedernal, que presentan vetillas de calcita (Formación Indidura). Además, se observa una secuencia rítmica de estratos delgados de lutitas físisles y areniscas de grano fino (Formación Caracol). Estas unidades tienen estructuras de acortamiento como pliegues, foliaciones y fallas inversas mostrando transporte tectónico al NE (Figura 4).



**Figura 4.** a) Secuencia sedimentaria del Mesozoico donde se evidencia la deformación por acortamiento. b) secuencia rítmica de estratos de areniscas y lutitas.

Estratigráficamente las rocas cretácicas yacen bajo el Conglomerado de Pinos, riolita Chichíndaro, ignimbrita Cantera e Ignimbrita Cuatralba. En conjunto, las rocas

cretácicas que afloran en el área de estudio tienen un rango de edad que va desde el Turoniano al Maestrichtiano (Figura 7) (Imlay, 1937; Aguilón-Robles, 1983).



**Figura 5.** Mapa geológico de semigraben de Matancillas. En la tabla se presentan las edades U-Pb de las unidades litoestratigráficas. Secciones geológicas: A-A', B-B', C-C', D-D' y E-E'. Segmentos de la falla El Rayo: Segmento norte (SN), segmento centro (SC), segmento sur (SS) y segmento Pinos (SP). MM: Mesa Morenos, CE: Cerro El Espía, M: Microondas, LPV: Licenciado Primo Verdad, EO: El Obraje, SJ: Sierra de Jacales.

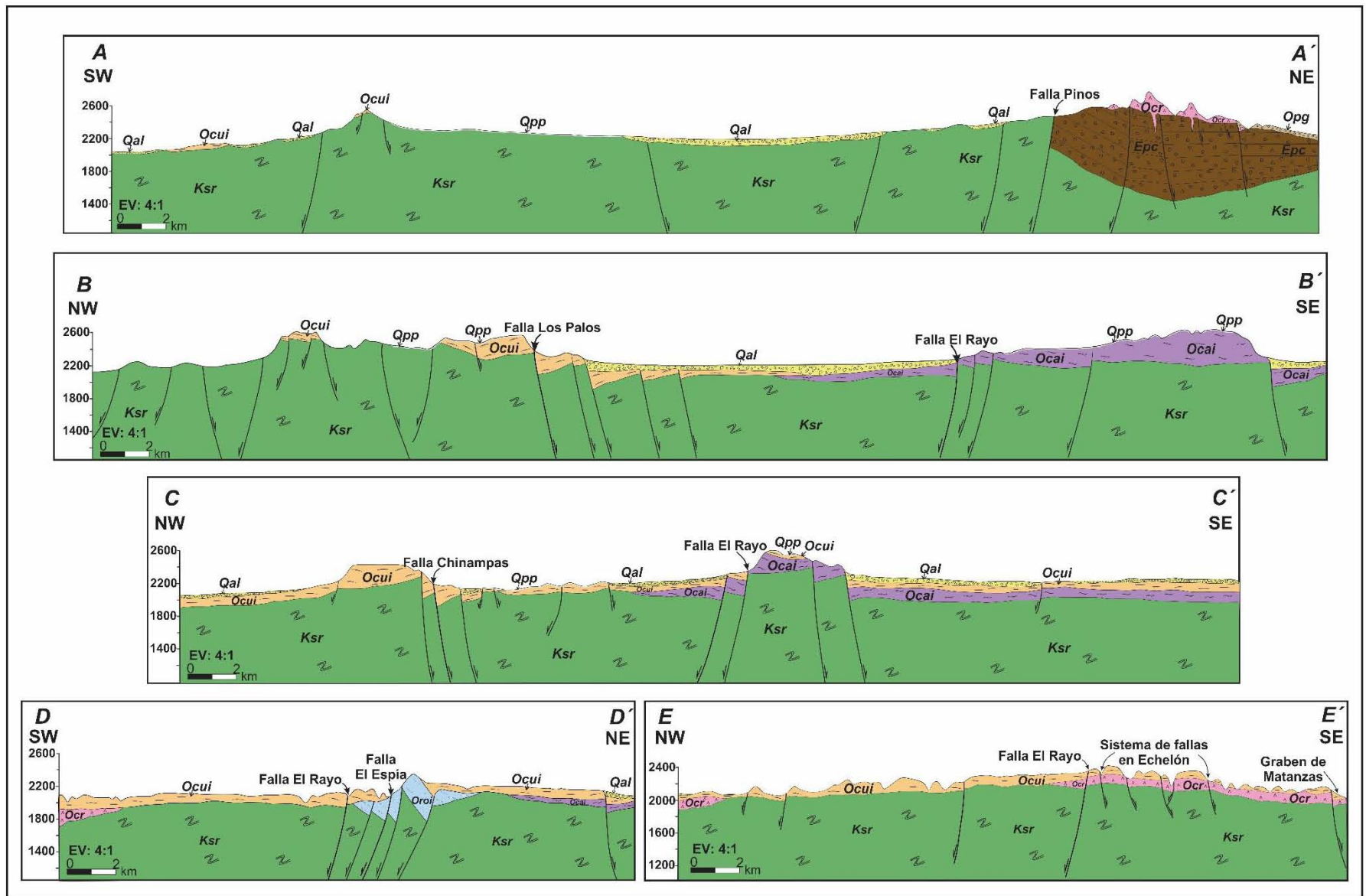
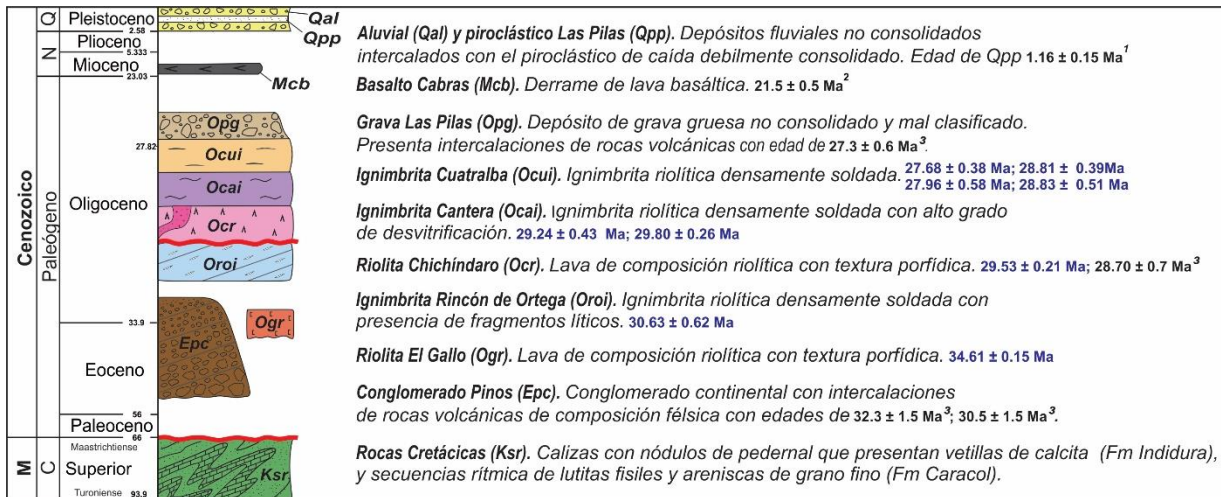


Figura 6. Secciones geológicas A-A', B-B', C-C', D-D' y E-E' del área de estudio. Los colores y siglas de las unidades estratigráficas son las mismas que las del mapa geológico de las Figuras 5 y 7.



**Figura 7.** Columna estratigráfica del área de estudio. Se presentan nuevas edades U-Pb (azul) y se agregan las edades documentadas en estudios previos. <sup>1</sup>Ángeles-Moreno, 2018, <sup>2</sup>Tristán-González *et al.*, (2009) y <sup>3</sup>Aranda Gómez *et al.*, 2007. Las líneas curvas de color rojo representan discordancias. Mesozoico (M), Cenozoico (C), Neógeno (N) y Cuaternario (Q).

## 4.2 Cenozoico

### 4.2.1 Conglomerado Pinos (Epc)

Esta unidad fue nombrada informalmente como sedimentos continentales (Aguillón-Robles *et al.*, 1994) y capas rojas de Pinos (Aranda-Gómez *et al.*, 2007), refiriéndose a los conglomerados que afloran en la localidad de Pinos, Zacatecas. Aquí se utiliza el término “conglomerado Pinos” atendiendo a que se ajusta mejor a lo establecido en el Artículo 18 del Código Estratigráfico Norteamericano.

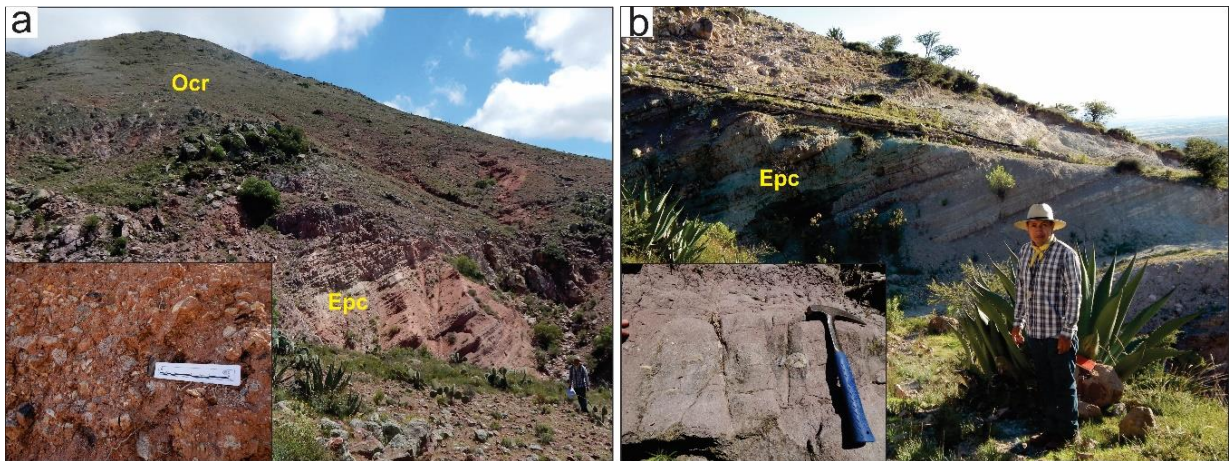
El conglomerado Pinos aflora al NE y NW de Pinos, Zacatecas. En este estudio, se encontraron afloramientos al norte de la localidad de Pinos, por el camino de terracería que va hacia el Microondas, y al NE del Cerrito la Ventilla (Figura 4).

El conglomerado Pinos está constituido por capas de arenisca conglomerática litificada y capas de conglomerado polimíctico soportado por matriz. Los clastos del conglomerado Pinos tienen las mismas litologías que las rocas mesozoicas (caliza, arenisca, lutita y lava andesítica), también hay clastos del granito Peñón Blanco (Aranda-Gómez *et al.*, 2007) y rocas volcánicas de composición félsica posiblemente de la riolita Chichindaro (Figura 8). Dentro del conglomerado se intercalan depósitos piroclásticos de caída, una ignimbrita densamente soldada y material piroclástico

retrabajado. Los ángulos de inclinación del conglomerado varían de 20° a 30°, y cerca de fallas mayores, la inclinación puede ser hasta de 70°. La estimación del espesor mínimo del conglomerado es de 900 m (Aranda-Gómez *et al.*, 2007).

El conglomerado Pinos sobreyace discordantemente a las rocas sedimentarias mesozoicas, y yace discordantemente bajo la riolita Chichíndaro, siendo el contacto una superficie erosional, otras veces es una discordancia angular y en otros sitios el contacto es por la intrusión de diques que fueron los conductos de la riolita Chichíndaro (Dávalos, 2011).

Atendiendo a su posición estratigráfica, Aguillón-Robles *et al.* (1994) le asignan un rango de edad del Eoceno al Oligoceno temprano. Sin embargo, Aranda Gómez *et al.*, (2007) realizaron fechamientos isotópicos del granito de Peñón Blanco en moscovita ( $50.94 \pm 0.47$ , Ar/Ar) y de una ignimbrita intercalada en el conglomerado ( $30.5 \pm 1.5$  K-Ar en roca entera y  $32.3 \pm 1.5$  K-Ar en sanidino). Estos datos permiten restringir la edad del depósito del conglomerado entre el Eoceno tardío y el Oligoceno temprano (Figura 7).



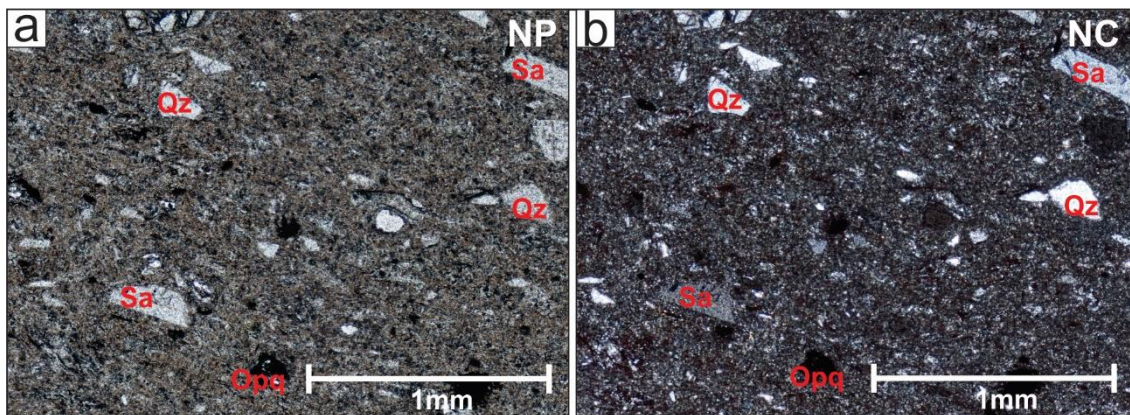
**Figura 8.** a) conglomerado Pinos (CP) basculado, en contacto discordante con la riolita Chichíndaro (Ocr). En el recuadro, se observan clastos de las rocas sedimentarias del Mesozoico y del granito de Peñón Blanco. b) areniscas conglomeráticas litificadas y basculadas del conglomerado Pinos. En el recuadro se observan clastos de las rocas lutitas y calizas presumiblemente provenientes de las rocas cretácicas.

El conglomerado Pinos se puede correlacionar con otros conglomerados reportados en la MC, agrupados como “sedimentos continentales del Paleoceno - Eoceno medio” por Nieto-Samaniego *et al.* (2005) y que corresponden a: La Formación Cenicera

(Labarthe-Hernández *et al.*, 1982), Conglomerado Zaragoza (Labarthe-Hernández., 1991), Conglomerado Duarte (Martínez-Reyes, 1992), Conglomerado Guanajuato (Edwards, 1955; Quintero-Legorreta, 1992,) y Conglomerado Zacatecas (Escalona-Alcázar *et al.*, 2016).

#### 4.2.2 Riolita El Gallo (*Ogr*)

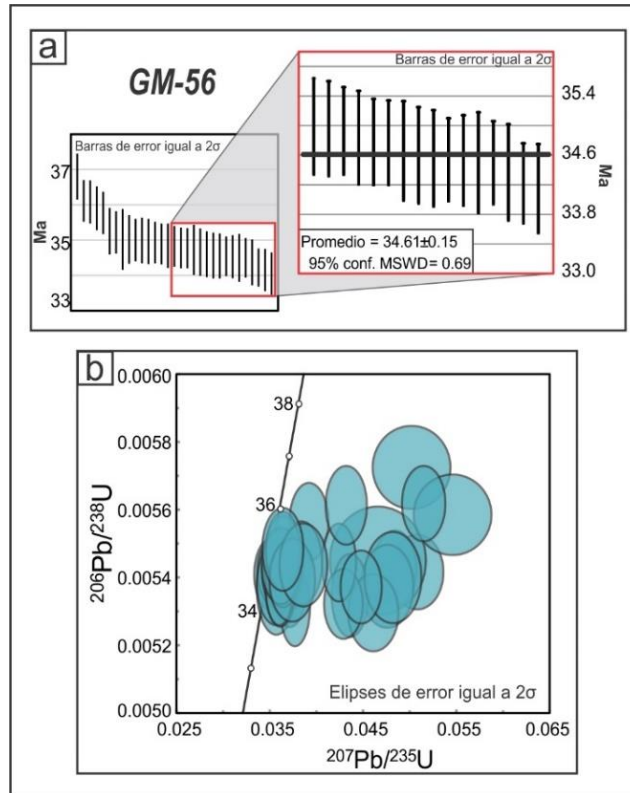
Se propone el nombre riolita El Gallo para referirse a lavas riolíticas que afloran en el Cerro El Gallo, ubicado al NW de la localidad de Villa de Arriaga. Macroscópicamente se observa como una roca con color lila, masiva, con textura porfídica y presencia de cristales de cuarzo, feldespato y biotita. Petrográficamente los fenocristales representan el 30% de la roca, con una asociación mineral de  $Qz \gg Sa \gg Bt > Pl + Opq$ , inmersos en una matriz felsítica de cuarzo y feldespato (Figura 9). El espesor de la Riolita El Gallo es ca. 200 m. En el campo sólo se observó que esta unidad yace bajo el piroclástico Las Pilas (Figura 5).



**Figura 9.** Fotomicrografías de la riolita El Gallo. En a) nícoles paralelos (NP) y en b) nícoles cruzados (NC). Se observa una textura porfídica y granofídica. Fenocristales de sanidino (Sa), cuarzo (Qz), biotita (Bt) y minerales opacos (Opq), inmersos en una matriz felsítica. Abreviaturas de minerales de Whitney y Evans (2010).

La muestra recolectada para el fechamiento isotópico (U-Pb en zircón LA-ICPMS) de esta unidad fue la GM-56, obteniendo una edad de  $34.61 \pm 0.15$  Ma (Figura 10). La Riolita El Gallo se puede correlacionar con la Dacita El Aguaje, ya que esta última tiene una edad de  $34.36 \pm 0.26$  Ma (Del Pilar Martínez *et al.*, 2019).



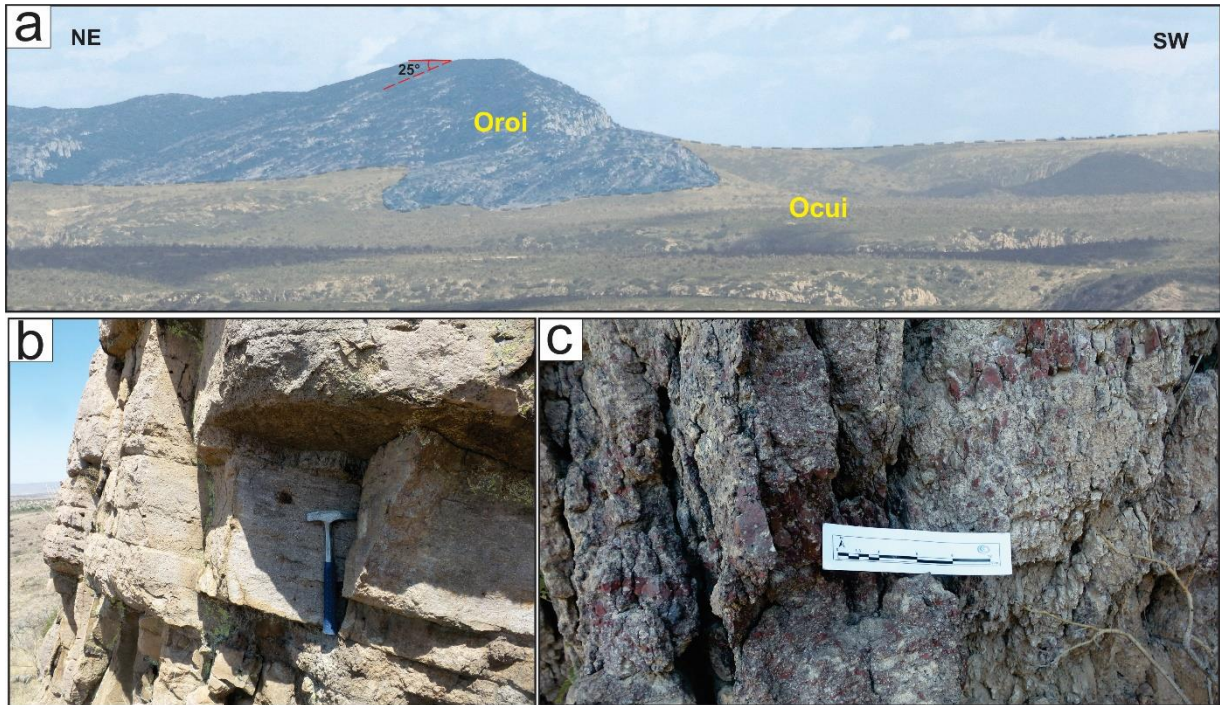


**Figura 10.** Fechamientos isotópicos U-Pb en circón con método LA-ICPMS de la Riolita El Gallo (GM-56). En a) se grafican las edades de los cirzones analizados y en el recuadro rojo se indica los que se usaron para el cálculo de la edad promedio ponderado. A la derecha un acercamiento de los cirzones usados en el cálculo de edad promedio ponderado. En b) se muestra el diagrama de concordia con todos los análisis. Se observa una nube de cirzones concordantes que fueron usados en la determinación de la edad de cristalización. Para la obtención de estas edades se utilizaron los cirzones concordantes más jóvenes, con confiabilidad estadística de 95% y un MSWD  $\leq 4$ . La edad isotópica U-Pb se interpreta como la edad de la última cristalización de circón en el magma.

#### 4.2.3 Ignimbrita Rincón de Ortega (Oroí)

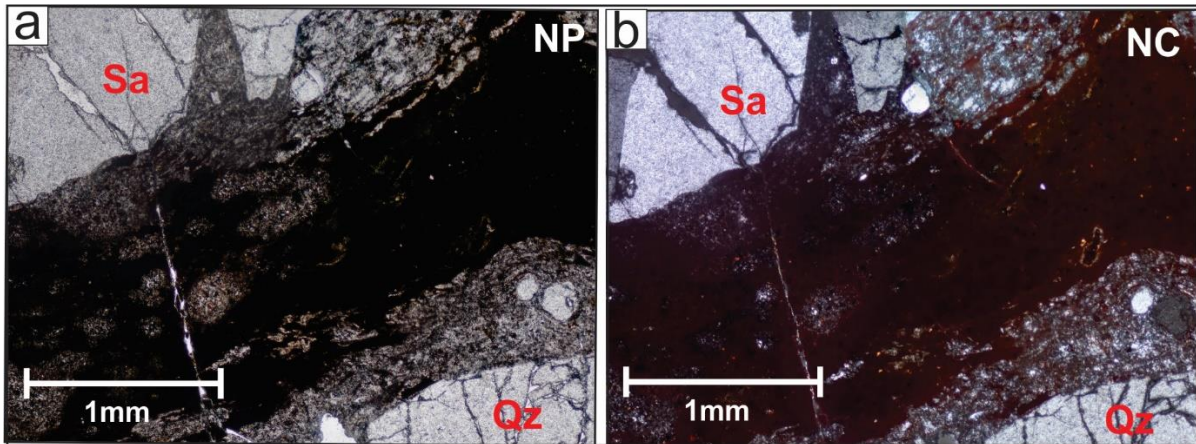
La ignimbrita Rincón de Ortega fue descrita por Del Pilar Martínez *et al.* (2019). Dichos autores describen a esta unidad como una ignimbrita de composición riolítica, masiva, densamente soldada y caracterizada por tener fragmentos líticos volcánicos (25% vol.). Petrográficamente se observa una textura porfídica con fenocristales de  $Qz \gg Sa \gg Bt > Pl + Zr$ , inmersos en una matriz oxidada y recrystalizada.

Dentro del área de estudio la ignimbrita Rincón de Ortega aflora en el Cerro El Espía, hacia el SE de Licenciado Primo Verdad (Figura 5). Se observa como un alto estructural formado por depósitos piroclásticos ignimbríticos con varias unidades de enfriamiento. La ignimbrita Rincón de Ortega tiene un espesor  $\sim 150$  m y se encuentra basculada  $\sim 25^\circ$  hacia el NE (Figura 11).



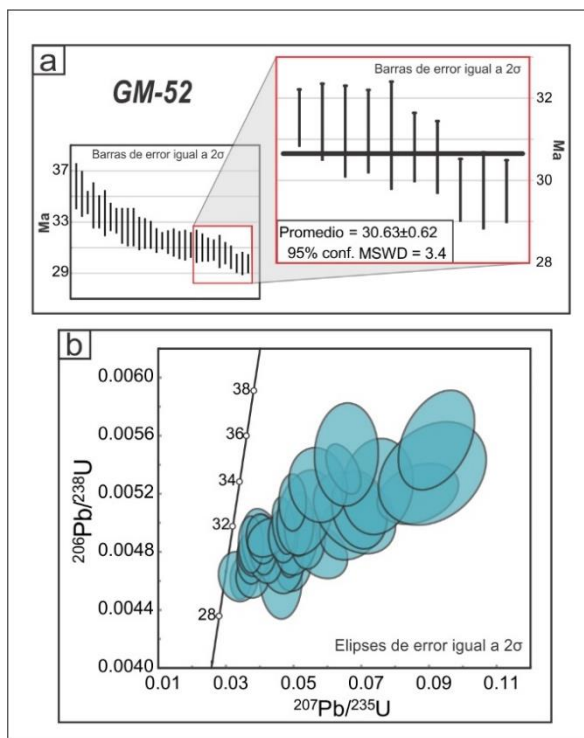
**Figura 11.** Ignimbrita Rincón de Ortega (*Oroi*). a) se observa a *Oroi* como un alto estructural, basculado hacia el NE. b) Pseudoestratificación de la ignimbrita con numerosas estructuras *fiamme* y c) un acercamiento de la ignimbrita Rincón de Ortega.

En el área de estudio la Ignimbrita Rincón de Ortega se observa como una roca masiva, densamente soldada, con pómez colapsadas y presencia de fragmentos líticos. Microscópicamente la ignimbrita presenta textura porfídica, eutaxítica, axiolítica y hialocristalina. Los fenocristales representan el 30% de la roca, con una asociación mineral  $Qz \gg Sa > Bt + Opq$ , inmersos en una matriz hialocristalina. El grado de desvitrificación es alto en la pómez colapsada y en la matriz (Figura 12). Estratigráficamente esta unidad subyace en discordancia angular a la ignimbrita Cuatralba.



**Figura 12.** Fotomicrografías de la ignimbrita Rincón de Ortega. En a) nícoles paralelos (NP) y en b) nícoles cruzados (NC). Se observa una textura porfídica con matriz hialocristalina. Fenocristales de sanidino (Sa) y cuarzo (Qz), inmersos en una matriz hialocristalina. Abreviaturas de minerales de Whitney y Evans (2010).

La muestra recolectada para el fechamiento isotópico (U-Pb en zircón LA-ICPMS) de esta unidad fue la GM-52, obteniendo una edad de  $30.63 \pm 0.62$  Ma (Figura 13). La ignimbrita Rincón de Ortega se correlaciona con la Ignimbrita Alfaro que aflora en la Sierra de Guanajuato, donde reportan edades de  $31.16 \pm 0.30$  Ma,  $31.20 \pm 0.23$  Ma,  $31.51 \pm 0.29$  Ma,  $31.56 \pm 0.25$  Ma (Ángeles-Moreno, 2019).

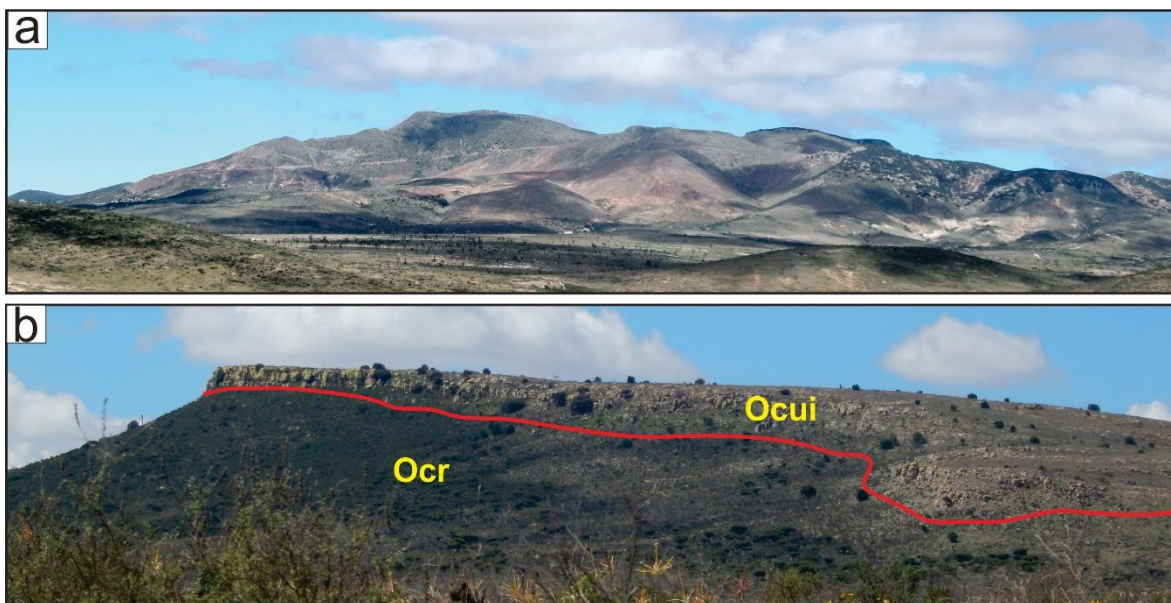


**Figura 13.** Fechamientos isotópicos U-Pb en zircón con método LA-ICPMS de la Ignimbrita Rincón de Ortega. En a) se grafican las edades de los circones analizados y en el recuadro rojo se indica los que se usaron para el cálculo de la edad promedio ponderado. A la derecha un acercamiento de los circones usados en el cálculo de edad promedio ponderado. En b) se muestra el diagrama de concordia con todos los análisis. Para la obtención de esta edad se utilizó el grupo de circones más jóvenes, con porcentaje de discordancia  $< 50\%$ ,  $MSWD \leq 4$  y con confiabilidad estadística de 95%. La edad isotópica U-Pb se interpreta como la edad de la última cristalización de zircón en el magma.

#### 4.2.4 Riolita Chichíndaro (Ocr)

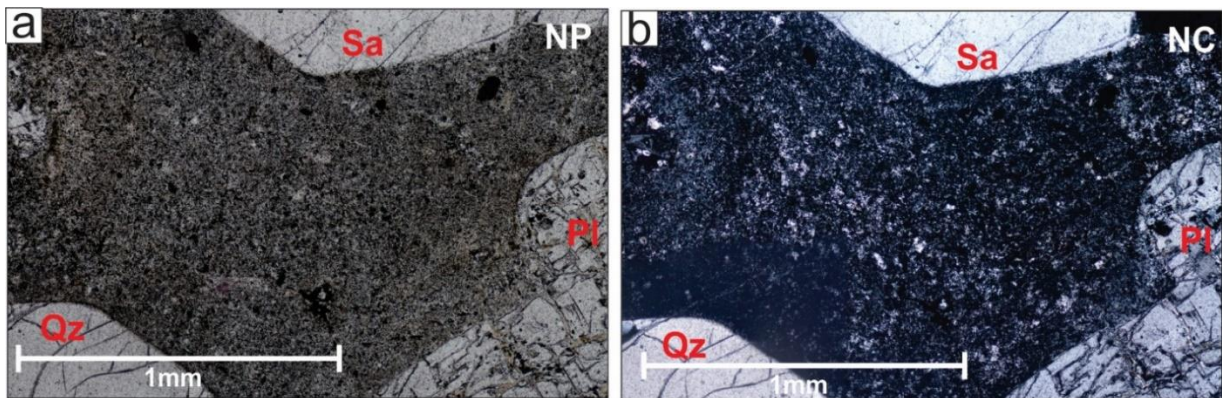
La riolita Chichíndaro fue definida por Echegoyen-Sánchez *et al.* (1970). La localidad tipo se encuentra en el Cerro Chichíndaro ubicado dentro del Distrito Minero de Guanajuato, ubicado 100 km al SW del área de estudio. La componen lavas riolíticas con capas de brecha y de tobas interestratificadas.

Esta unidad se encuentra distribuida en diferentes partes del área de estudio; al NE de Matancillas aflora como un domo; al norte de Paso de Cuarenta y poniente de Chinampas se presenta como derrames de lava y al NE y SE de Pinos aflora como complejos de domos (Figura 14). El análisis petrográfico del domo ubicado al NE de Matancillas presenta una foliación de flujo y textura porfídica. Microscópicamente los fenocristales representan el 30% de la roca, con una asociación mineral de Sa>>Qz>>Pl>Opq, inmersos en una matriz felsítica de cuarzo y feldespato (Figura 15). La Riolita Chichindaro sobreyace en discordancia angular a rocas sedimentarias del Mesozoico y al Conglomerado de Pinos, y yace bajo la Ignimbrita Cantera, Ignimbrita Cuatralba y el Piroclástico Las Pilas.



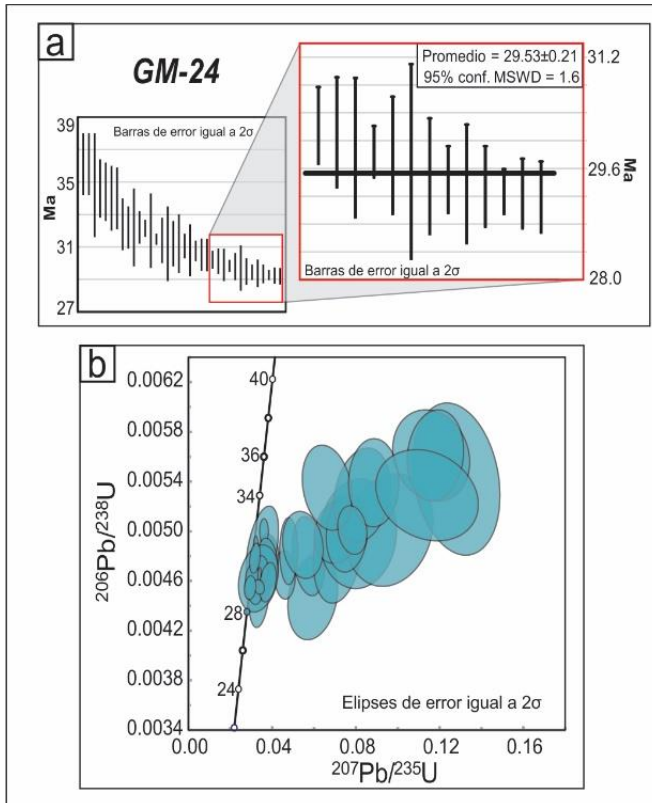
**Figura 14.** a) Panorámica del Complejo Volcánico de Pinos, Zacatecas. b) Relación estratigráfica entre la ignimbrita Cuatralba (Ocu) y la Riolita Chichíndaro (Ocr).

Las edades reportadas para la Riolita Chichíndaro en la porción meridional de la Mesa Central son de  $30.1 \pm 0.8$  Ma y  $30.8 \pm 0.8$  Ma en sanidino por K-Ar, las muestras que usaron para el análisis fueron recolectadas en los poblados de Santa Rosa, Guanajuato y La Saucedá, Guanajuato (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996), también es reportada una edad de  $30.36 \pm 0.4$  Ma en circón por U-Pb de una muestra colectada en la localidad tipo de la riolita Chichíndaro en la Sierra de Guanajuato (Nieto-Samaniego *et al.*, 2016). Aranda-Gómez *et al.*, (2007) presenta edades de  $28.7 \pm 0.7$  y  $28.7 \pm 0.9$  para el Complejo Volcánico de Pinos. En este estudio, se recolectó la muestra GM-24 para el fechamiento isotópico (U-Pb en zircón LA-ICPMS), obteniendo una edad de  $29.53 \pm 0.21$  Ma (Figura 16).



**Figura 15.** Fotomicrografías de la riolita Chichíndaro. En a) nícoles paralelos (NP) y en b) nícoles cruzados (NC). Se observa una textura porfídica con matriz hialocristalina. Fenocristales de sanidino (Sa), plagioclasa (Pl) y cuarzo (Qz), inmersos en una matriz hialocristalina. Abreviaturas de minerales de Whitney y Evans (2010).

La Riolita Chichíndaro se correlaciona con la Riolita San Miguelito, localizada en la porción centro-sur del estado de San Luis Potosí, donde aflora el Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP). Labarthe *et al.* (1982) reportan edades de  $30.0 \pm 1.5$  Ma obtenida por el método K-Ar en roca entera, y Tristán-González *et al.* (2009) proponen un rango de edades desde 32 Ma hasta 28 Ma, donde predomina la actividad efusiva que formó cadenas de domos en el CVSLP.



**Figura 16.** Fechamientos isotópicos U-Pb en zircon con método LA-ICPMS de la Riolita Chichíndaro (GM-24). En a) se grafican las edades de los zircons analizados y en el recuadro rojo se indica los que se usaron para el cálculo de la edad promedio ponderado. A la derecha un acercamiento de los zircons usados en el cálculo de la edad promedio ponderado. En b) se muestra el diagrama de concordia con todos los análisis; se observa una nube de zircons concordantes que fueron usados en la determinación de la edad de cristalización. Los criterios para la discriminación de zircons son los mismos de la Figura 10.

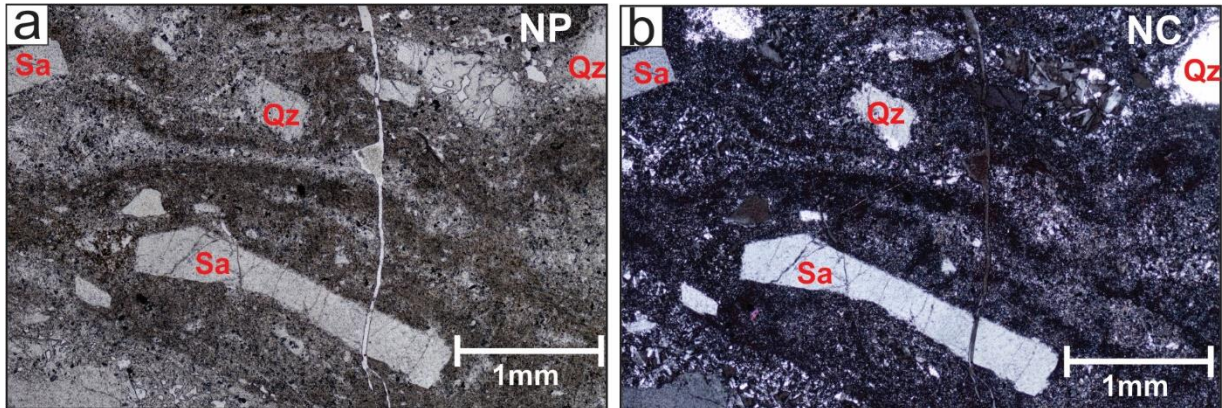
#### 4.2.5 Ignimbrita Cantera (Oca)

La ignimbrita Cantera fue descrita por Labarthe-Hernández *et al.* (1982). La localidad tipo se encuentra en el Arroyo de la Cantera, localizado al NE del poblado Los Arroyos, en el estado de San Luis Potosí. Allí consiste en un paquete de rocas que se agrupan en 4 miembros. El miembro 1, vitrificado lenticular o flujo de cenizas pobremente soldado; miembro 2, toba sin soldar; miembro 3, ignimbrita de color gris rosáceo con textura porfídica y eutaxítica; y el miembro 4, toba de caída de ceniza.

Esta unidad aflora hacia el este del área de estudio, en la Mesa Morenos, Mesa El Toro y el Cerro La Alberca. La Ignimbrita Cantera presenta una estructura fluidal, eutaxítica y alto grado de piroconsolidación. Su espesor máximo es de ca. 200 m en la Mesa Morenos.

Macroscópicamente se observa como una roca masiva, densamente soldada, con pómez colapsada y minerales de sanidino, cuarzo y óxidos, que se encuentran dentro de una matriz afanítica. Microscópicamente la ignimbrita presenta textura porfídica,

eutaxítica, axiolítica y vitroclástica (Figura 17). Los fenocristales representan el 30% de la roca, con una asociación mineral  $Sa \gg Qz > Bt > opq$ , inmersos en una matriz hialocristalina. La ignimbrita Cantera se encuentra sobreyaciendo la riolita Chichíndaro, y yace bajo la ignimbrita Cuatralba.



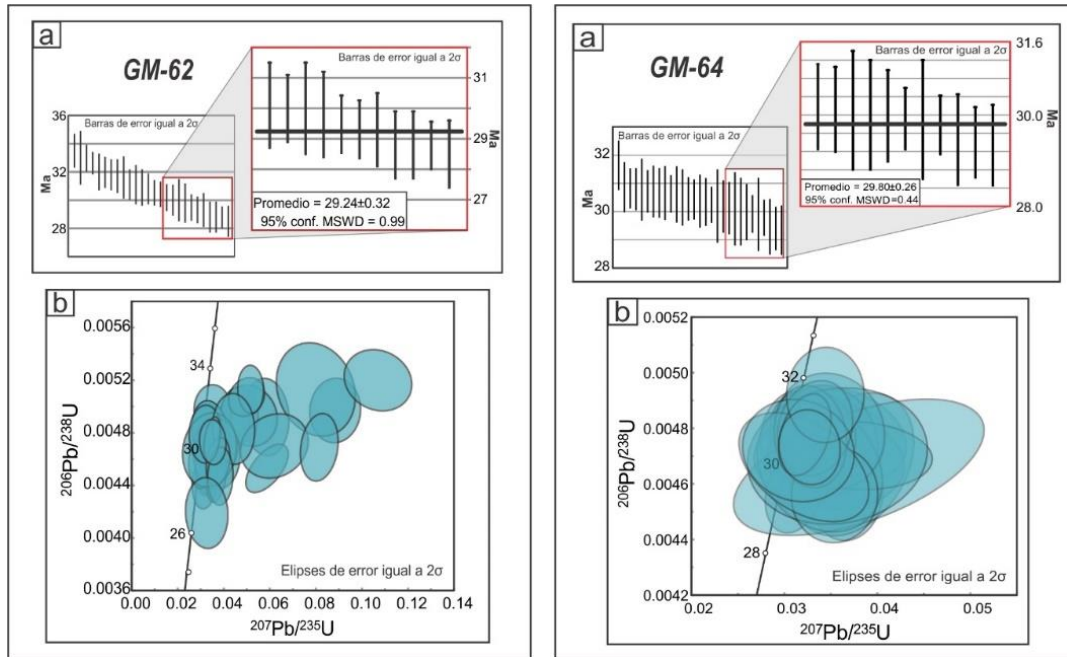
**Figura 17.** Fotomicrografías de la ignimbrita Cantera. En a) nícoles paralelos (NP) y en b) nícoles cruzados (NC). Se observa una textura porfídica eutaxítica y vitroclástica. Fenocristales de sanidino (Sa) y cuarzo (Qz), inmersos en una matriz hialocristalina. Abreviaturas de minerales de Whitney y Evans (2010).

Las muestras recolectadas para los fechamientos isotópicos (U-Pb en zircón LA-ICPMS) de esta unidad fueron la GM-62 y GM-64, obteniendo edades de  $29.24 \pm 0.32$  Ma y  $29.80 \pm 0.26$  Ma, respectivamente (Figura 18).

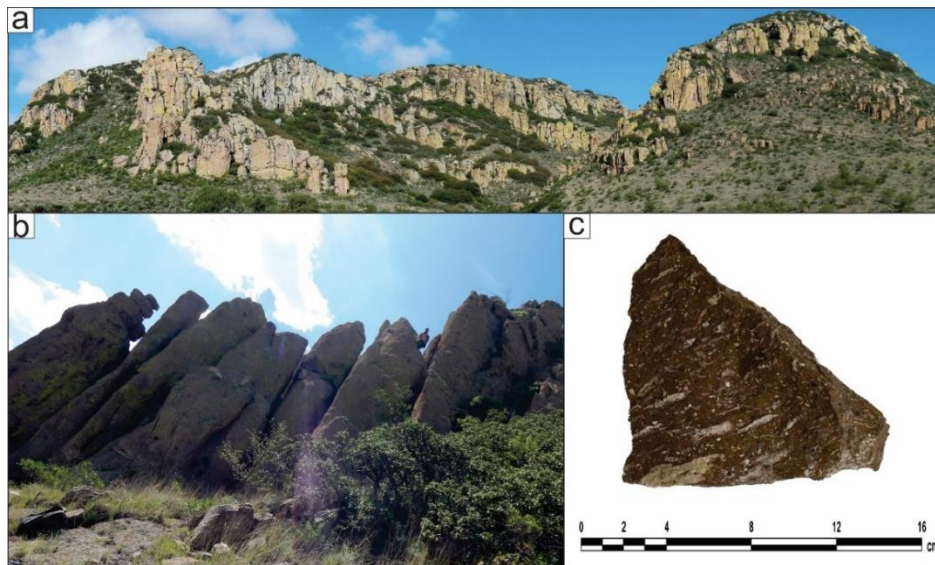
#### 4.2.6 Ignimbrita Cuatralba (*Ocuí*)

La ignimbrita Cuatralba fue definida por Quintero-Legorreta (1992). La localidad tipo se encuentra en la sierra Cuatralba, entre Comanja de Corona y Nuevo Valle de Moreno en la Sierra de Guanajuato. Dicho autor la describe como una ignimbrita riolítica que presenta variaciones en el grado de piroconsolidación y con textura vitroclástica y estructuras esferulítica y de flama (*fiamme*).

Esta unidad aflora en toda el área de estudio desde la localidad de Pinos hasta Paso de Cuarenta (Figura 5). Se observa como un depósito piroclástico que forma extensas mesetas, en ocasiones con diaclasas columnares (Figura 19). La Ignimbrita cuatralba tiene un espesor que varía de 40 m a 100 m y se encuentra basculada de  $5^\circ$  a  $8^\circ$ .



**Figura 18.** Fechamientos isotópicos U-Pb en zircón con método LA-ICPMS de la Ignimbrita Cantera. En a) se grafican las edades de los cirzones analizados y en el recuadro rojo se indica los que se usaron para el cálculo de la edad promedio ponderado. A la derecha un acercamiento de los cirzones usados en el cálculo de edad promedio ponderado. En b) se muestra el diagrama de concordia con todos los análisis. Los criterios para la discriminación de cirzones son los mismos de la Figura 10.

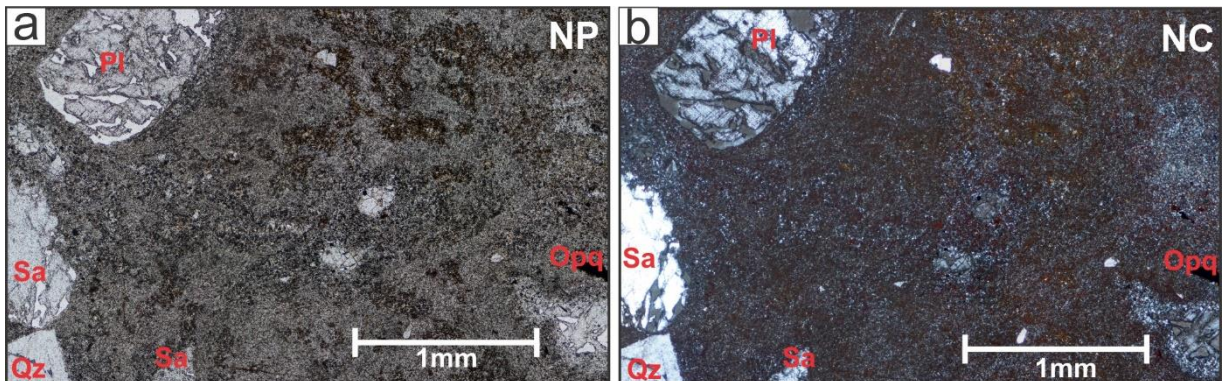


**Figura 19.** Ignimbrita Cuatralba. a) y b) son afloramientos de la Ignimbrita Cuatralba donde se observan las diaclasas columnares. c) Muestra de mano GM-31 donde se evidencian las pómez colapsadas y una matriz afanítica.

Macroscópicamente se observa como una roca masiva, densamente soldada, con pómez colapsada y fenocristales de sanidino, cuarzo y óxidos que se encuentran



dentro de una matriz afanítica. Microscópicamente la ignimbrita presenta textura porfídica, eutaxítica, axiolítica y vitroclástica (Figura 20). Los fenocristales representan el 5 % de la roca, con una asociación mineral de  $Qz \gg Sa > Pl > Bt + Opq$ , inmersos en una matriz hialocristalina. En el análisis petrográfico se observa que el grado de soldamiento y de desvitrificación varía para cada muestra (Anexo 1)



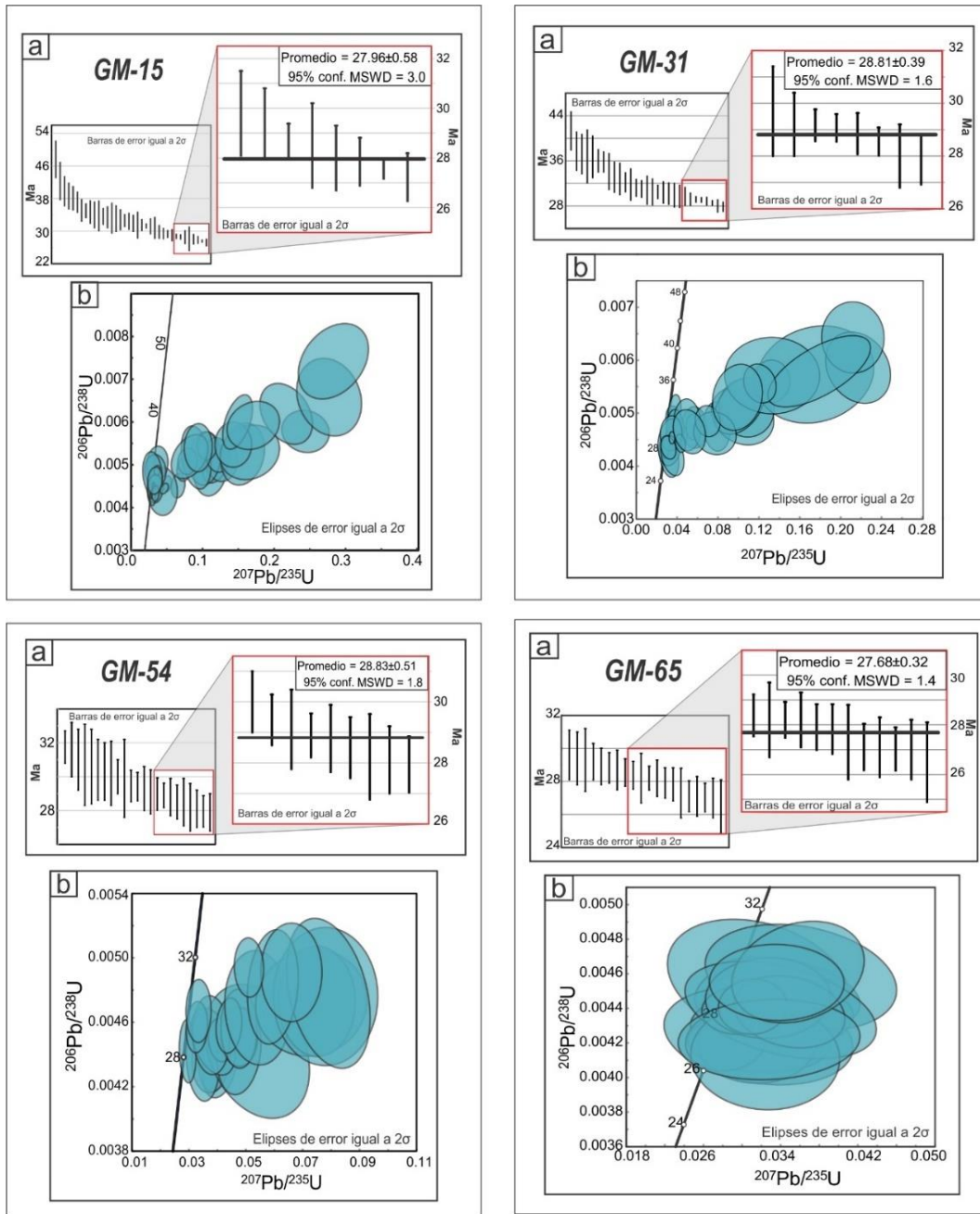
**Figura 20.** Fotomicrografías de la ignimbrita Cuatralba. En a) nícoles paralelos (NP) y en b) nícoles cruzados (NC). Se observa una textura porfídica eutaxítica y vitroclástica. Fenocristales de sanidino (Sa), plagioclasa (Pl), cuarzo (Qz) y minerales opacos (Opq), inmersos en una matriz hialocristalina. Abreviaturas de minerales de Whitney y Evans (2010).

La ignimbrita Cuatralba se encuentra sobreyaciendo a la Ignimbrita Cantera y a la riolita Chichíndaro, y en discordancia angular a la Ignimbrita Rincón de Ortega. Además de esto, yace bajo el basalto Cabras y el Piroclástico Las Pilas.

Las muestras recolectadas para los fechamientos isotópicos (U-Pb en zircón LA-ICPMS) de esta unidad fueron la GM-15, GM-31, GM-54 y GM-65 (Figura 5), obteniendo edades de  $27.96 \pm 0.58$  Ma,  $28.81 \pm 0.39$  Ma,  $28.83 \pm 0.51$  Ma y  $27.68 \pm 0.38$  Ma, respectivamente (Figura 21).

#### **4.2.7 Grava Las Pilas (Opg)**

El depósito de grava Las Pilas fue definido informalmente por Aranda-Gómez *et al.* (2007). Se encuentra bien expuesto a lo largo del arroyo Las Pilas, hacia el norte de Pinos, Zacatecas. Consiste en un depósito de grava gruesa no consolidado, con intercalación de horizontes volcánicos, incluyendo tobas de caída de ceniza y una toba de flujo de ceniza riolítica densamente soldada.



**Figura 21.** Fechamientos isotópicos U-Pb en zircón con método LA-ICPMS de la Ignimbrita Cuatralba. En a) se grafican las edades de los cirzones analizados y en el recuadro rojo se indica los que se usaron para el cálculo de la edad promedio ponderado. A la derecha un acercamiento de los cirzones usados en el cálculo de edad promedio ponderado. En b) se muestra el diagrama de concordia con todos los análisis. Los criterios para la discriminación de cirzones son los mismos de la Figura 10.

Esta unidad aflora al SE de Guadalupe de los Pozos, al norte de Pinos, Zacatecas. En este depósito se observó como un conglomerado no consolidado y mal clasificado, que contiene clastos de riolita (presumiblemente la Riolita Chichindaro), con tamaños que

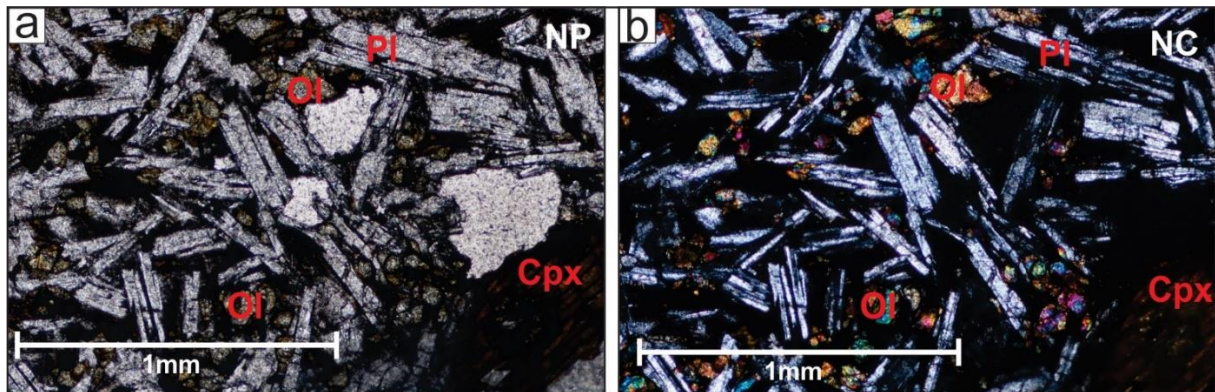
varían de 5 cm a 50 cm. El depósito de grava Las Pilas se encuentra basculado de 10° a 30° hacia el N y NW (Aranda-Gómez *et al.*, 2007).

Estratigráficamente el depósito de grava Las Pilas sobreyacen en discordancia angular a las rocas sedimentarias del Cretácico y al conglomerado Pinos. El contacto con la Riolita Chichíndaro es tectónico por falla normal.

Aranda-Gómez *et al.* (2007) realizaron un fechamiento isotópico por K-Ar en sanidino, de una ignimbrita intercalada con el depósito de grava Las Pilas, obteniendo una edad de  $27.3 \pm 0.6$  Ma, ubicando a la grava Las Pilas en el Oligoceno tardío.

#### 4.2.8 Basalto Cabras (Mcb)

El basalto Cabras fue descrito por Labarthe y Tristán (1980) en la Fosa de Bledos, en cercanías al poblado de Cabras, San Luís Potosí. Aguillón-Robles (1983) describen a esta unidad entre los poblados de Ojuelos, Jalisco y El Sitio, Zacatecas. Consisten en derrames de lava basáltica alineados de color negro y alterados. Petrográficamente se observan una textura porfídica y pilotaxítica con fenocristales de  $Pl \gg Ol \gg Cpx$  (Figura 22). Estratigráficamente sobreyace a la Ignimbrita Cuatralba, y yace bajo el piroclástico Las Pilas. El espesor máximo es de 40 m.



**Figura 22.** Fotomicrografías del basalto Cabras. En a) nícoles paralelos (NP) y en b) nícoles cruzados (NC). Se observa una textura porfídica y pilotaxítica. Fenocristales de sanidino (Sa), plagioclasa (Pl), olivinos (O) y clinopiroxeno (Cpx). Abreviaturas de minerales de Whitney y Evans (2010).

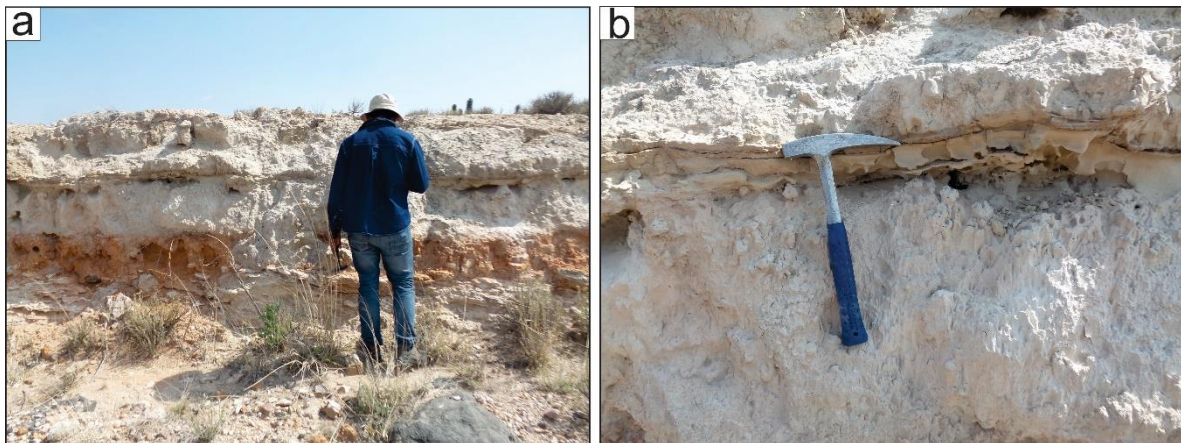
Tristán-González *et al.* (2009) reportan un fechamiento isotópico por el método K-Ar en roca entera de  $21.5 \pm 0.5$  Ma para el Basalto Cabras, en el Complejo Volcánico Sierra San Miguelito, ubicándolo en el Mioceno temprano. No obstante, ese

fechamiento no necesariamente representa la edad del basalto que aflora dentro del área de estudio.

#### 4.2.9 Piroclástico Las Pilas (Qpp)

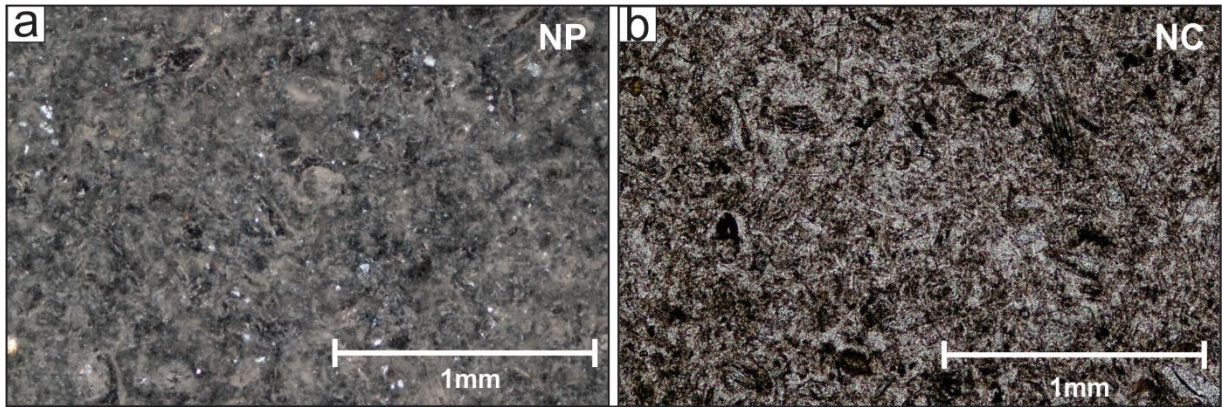
El piroclástico Las Pilas fue descrito por Ángeles-Moreno (2008) en el área de Duarte, en la Sierra Guanajuato. Consiste en un depósito de caída de color blanco y débil consolidación. Principalmente se compone de esquirlas de vidrio volcánico, con cuarzo y en menos cantidad feldespatos.

Esta unidad aflora en la porción centro-norte del área de estudio, entre las localidades de Ojuelos y La Laborcilla. Se observa como un depósito piroclástico de caída débilmente consolidado, que cubre algunas partes del relieve con espesores que varían de 0.5 m a 5 m (Figura 23).



**Figura 23.** En a) Afloramiento del Piroclástico Las Pilas y b) depósito de caída de color blanco débilmente consolidado.

Macroscópicamente se observa como una roca de color blanco, muy fina, bien clasificada y constituida principalmente por vidrio volcánico. Microscópicamente los fenocristales representan el 1 % de la roca, con una asociación mineral de  $Qz \gg Fp$ , inmersos en una matriz vitroclástica, constituida por fragmentos de pómez, algunos con formas de Y, tabulares o de cúspide (Figura 24). Estratigráficamente se encontró sobreyaciendo a la Ignimbrita Cuatralba e intercalada con depósitos fluviales.



**Figura 24.** Fotomicrografías del piroclástico Las Pilas. En a) nícoles paralelos (NP) y en b) nícoles cruzados (NC). Se observa una textura vitroclástica con fragmentos de pómez, algunos con formas de Y, tabulares o de cúspide.

En esta unidad, Ángeles-Moreno (2018) realizó un fechamiento isotópico por el método K-Ar en vidrio volcánico, obteniendo una edad de  $1.16 \pm 0.15$  Ma, ubicándola en el Pleistoceno.

El piroclástico Las Pilas se pueden correlacionar con la Pumicita El desierto que aflora en la Iglesia del desierto, San Luis Potosí (Tristán-González, 1979). También, aflora como parches en la Sierra de San Miguelito y entre los conglomerados de las cercanías del Cerro de San Pedro (Labarthe - Hernández *et al.*, 1982).

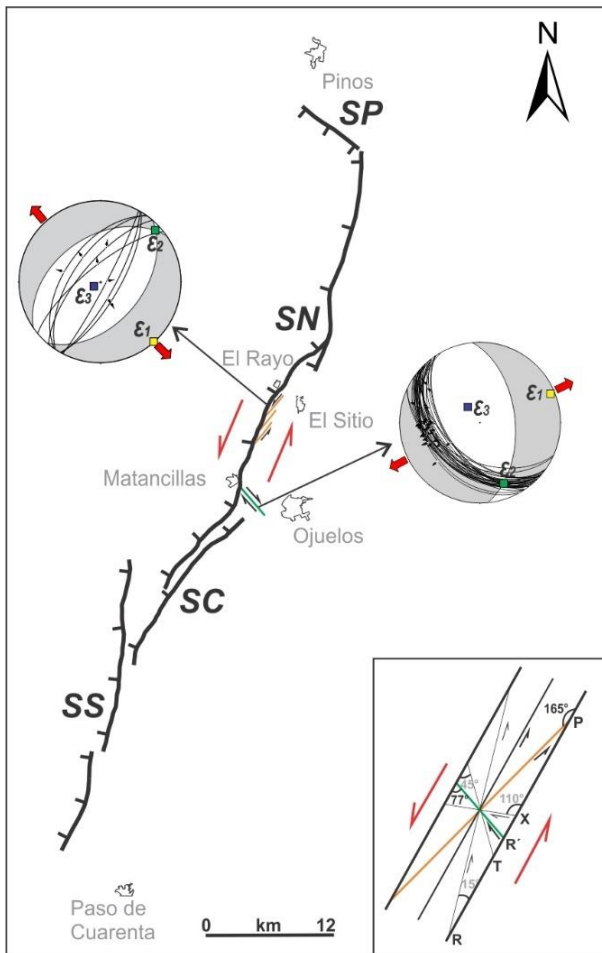
## 5. Geología estructural del semigraben

El semigraben de Matancillas se ubica en la parte sur de la provincia fisiográfica de la Mesa Central. Lo circundan los sistemas de fallas siguientes: al norte, lineamientos con dirección NW-SE definidos como el sistema de fallas San Luis - Tepehuanes (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005); al este, conjuntos de fallas normales, denominados Graben Matanzas, Graben Vergel-Cóporo, Graben Santo Domingo, Graben La Quemada y Graben de Villa de Reyes (Del Pilar-Martínez *et al.*, 2019; Nieto-Samaniego *et al.*, 2007; Aranda-Gómez *et al.* 1989); al oeste, el graben de Aguascalientes (Loza-Aguirre *et al.*, 2008; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005); y al sur, estructuras E-W de la Faja Volcánica Transmexicana.

La geometría del semigraben de Matancillas se puede apreciar en la Figura 5, allí se observa una falla principal denominada falla El Rayo, de rumbo preferencial NNE que limita el pilar tectónico del medio graben. En el bloque del alto de la falla se observa una amplia zona de acomodo de ~19 km de ancho, con fallas normales orientadas N-S, de longitudes entre 4 km y 10 km. La fosa producto del semigraben de Matancillas tiene un ancho de ~25 km, longitud de ~95 km y un desnivel topográfico máximo de 300 m. En las secciones geológicas (Figura 6) no se distingue la geometría de un semigraben debido a que las secciones no superan los dos kilómetros de profundidad y tanto la falla principal (El Rayo) como las fallas antitéticas alcanzan esa profundidad.

Se identificaron y se les dio nombre a las estructuras siguientes mediante observaciones de campo, modelos de elevación digital e imágenes de satélite: falla El Rayo, falla Chinampas, falla Los Palos, falla El Espía, sistema de fallas en *échelon*, sistema de fallas del Complejo Volcánico de Pinos y el Graben de Matanzas.

## 5.1 Falla El Rayo



**Figura 25.** Esquema estructural de los segmentos de la falla El Rayo del semigraben de Matancillas. Segmento norte (SN), segmento centro (SC), segmento sur (SS) y segmento Pinos (SP). Los estereogramas muestran planos de falla, estrías y ejes principales de distorsión. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior con el uso del software FaultKin 8.0 Richard W. Allmendinger © 2016-2019. En el recuadro se representa la interpretación cinemática de la falla principal del semigraben Matancillas (véase la explicación en el texto).

La falla El Rayo tiene un rumbo  $N30^{\circ}E$  con estrías al echado y una dirección de alargamiento NW-SE y la falla  $R'$  tiene un rumbo  $S46^{\circ}E$  con estrías al echado y oblicuas, la dirección de alargamiento es NE-SW y su cinemática es de tipo normal con una componente lateral menor. Los datos promedio de las fallas El Rayo y  $R'$  se calcularon mediante el vector de distribución de Fisher (Allmendinger *et al.*, 2012).

La falla principal del semigraben, denominada como falla El Rayo, se extiende desde Pinos hasta Paso de Cuarenta (Figura 25). La estructura tiene una longitud de aproximadamente 85 km, con rumbo NNE y echado al poniente. Esta estructura está formada por tres segmentos principales, segmento norte (SN), segmento centro (SC) y segmento sur (SS) delimitando el pilar tectónico del medio graben. Hay un cuarto segmento orientado NW-SE en Pinos (SP).

La traza del segmento norte tiene una longitud de 50 km y un desnivel topográfico entre 50 m y 130 m. En este segmento se reconocieron fallas subsidiarias que se ajustan a un sistema Riedel (fallas: El Rayo,  $R'$ , y P), que por sus relaciones angulares indican una componente menor lateral izquierda (Figura 25).

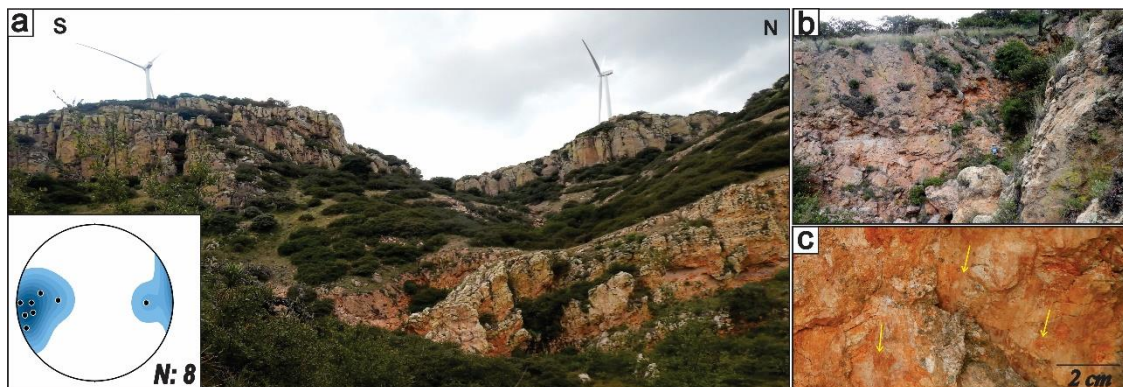
En la figura 25 se presentan los estereogramas de los planos de falla medidos en la falla El Rayo y la falla  $R'$ .

En el semigraben se observa que la falla El Rayo tiene al basamento Mesozoico en el bloque levantado. La unidad más joven afectada por esta estructura es la ignimbrita Cuatralba, basculándola 8° hacia el este. En algunos lugares se observó al piroclástico Las Pilas sepultando a la falla El Rayo (Figura 5).

Los segmentos centro y sur tienen longitudes de 20 km y 30 km, respectivamente. En el segmento centro, llama la atención el desnivel topográfico de 300 m evidenciado por el desplazamiento de la Ignimbrita Cuatralba. El segmento sur se encuentra desplazado por el Sistema de fallas en *échelon* (Figura 25).

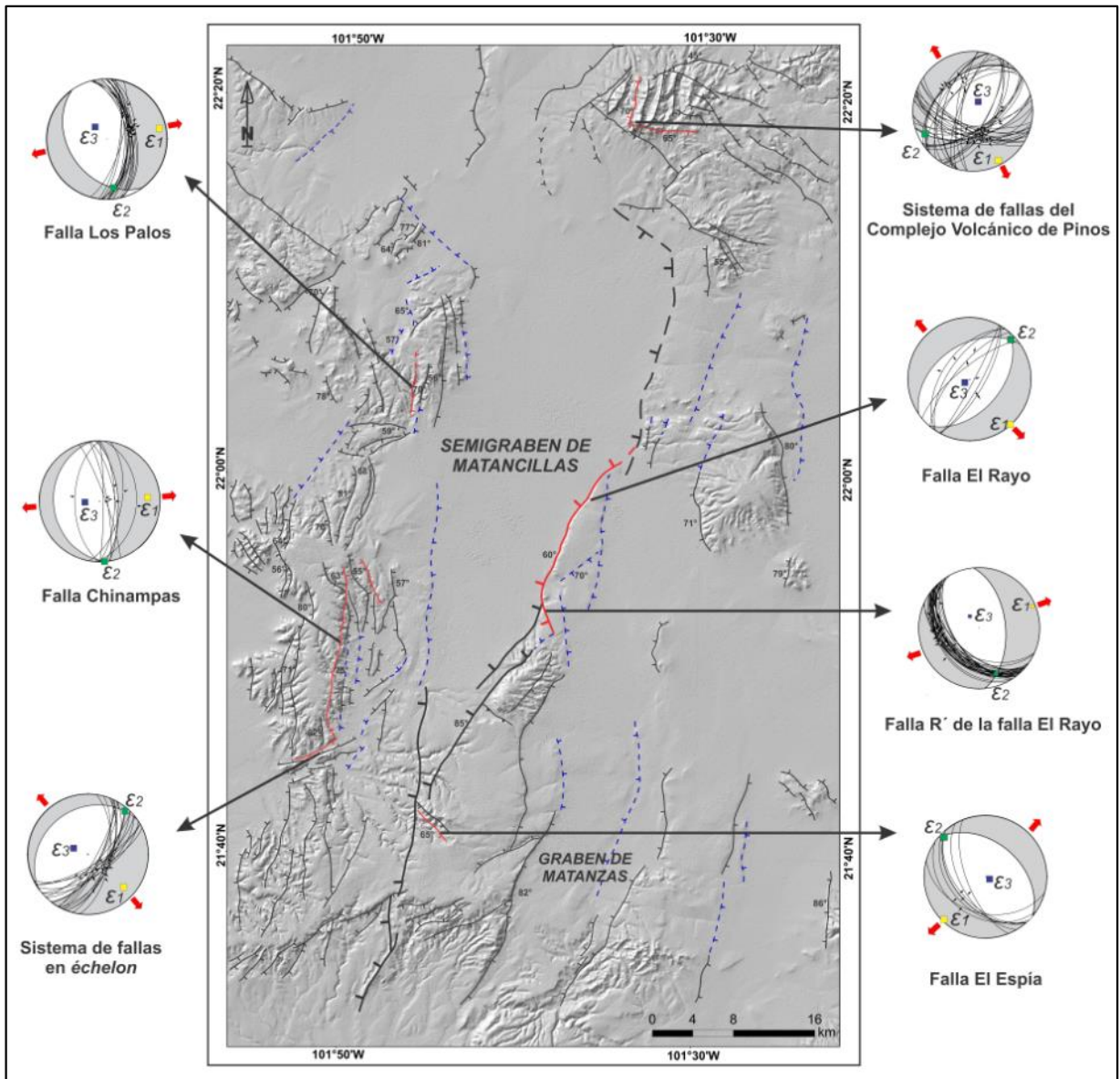
## 5.2 Falla Chinampas

La falla Chinampas, localizada al SW del poblado de Chinampas, es una falla de tipo normal y antitética respecto a la falla El Rayo. Su traza presenta una expresión superficial fuertemente lineal con longitud de ~18 km, orientada N-S e inclinada hacia el Este.

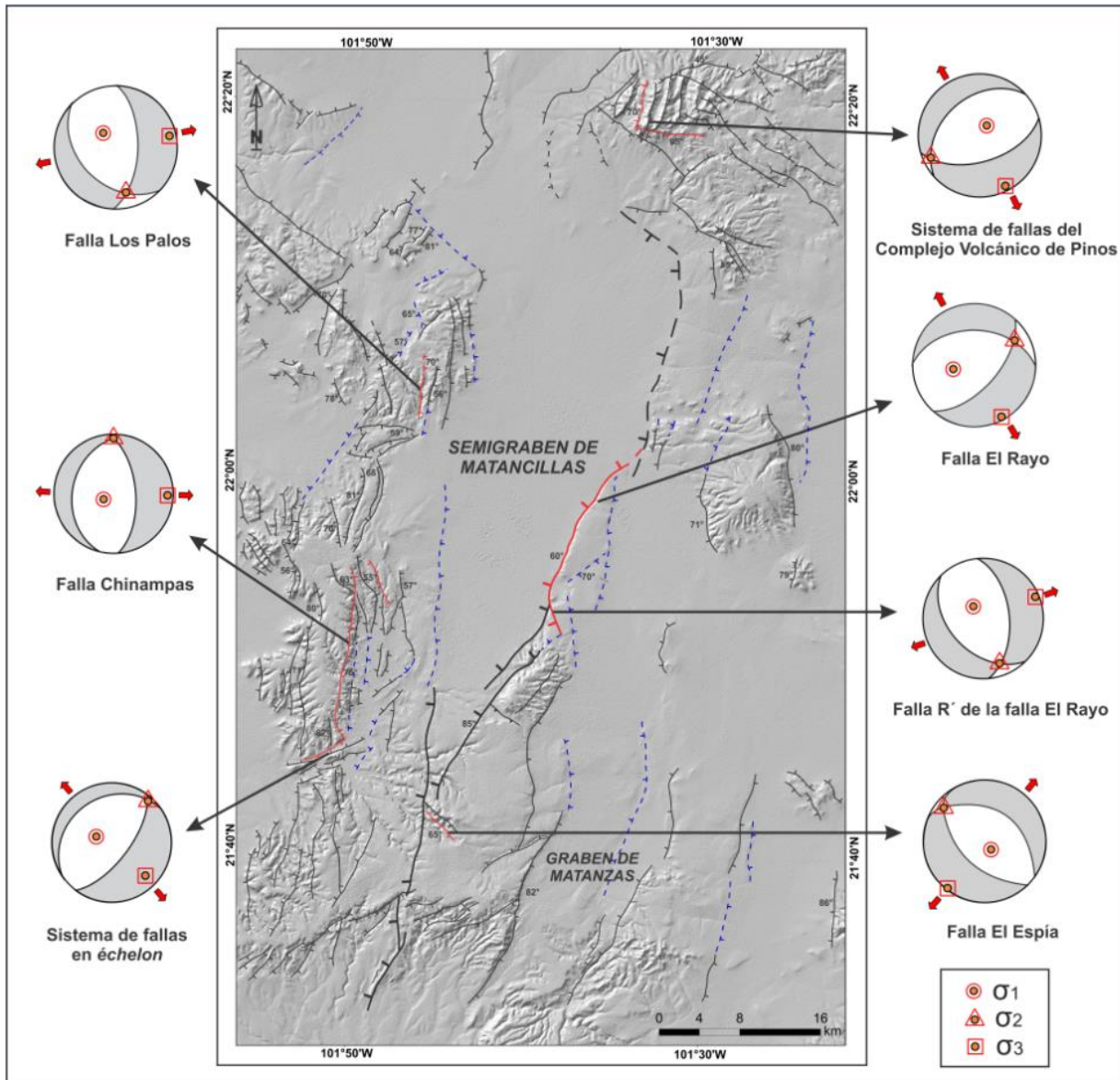


**Figura 26.** Falla normal de Chinampas a) Zona de falla donde se observa el núcleo de la falla silicificado y oxidado con dimensiones de ~10 m de ancho y ~50 m de largo. En esta zona se midieron 8 planos de falla representados en el diagrama de contornos de polos del recuadro; los datos muestran rumbos N-S con inclinaciones hacia el este y oeste. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior utilizando el software Stereonet 10.0. b) y c) Escarpes alineados donde se observaron los planos de fallas con estrías al echado y oblicuas.





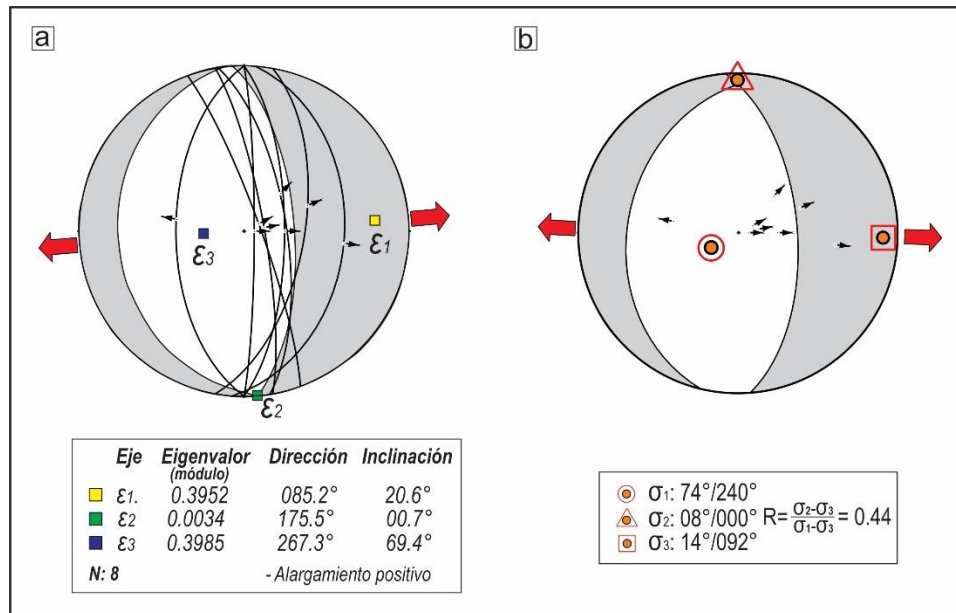
**Figura 27.** Mapa estructural que muestra los ejes principales de distorsión para cada falla encontrada en el campo. Las líneas rojas indican las fallas encontradas en el campo, las líneas negras indican fallas cartografiadas en éste y otros trabajos, y las líneas discontinuas de color azul son fallas inferidas. Las flechas rojas indican la dirección principal de alargamiento. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior. Se empleó el método vector “Linked Bingham” utilizando el software FaultKin 8.0 Richard W. Allmendiger © 2016-2019.



**Figura 28.** Mapa estructural que muestra los ejes principales de esfuerzo para cada falla. Las líneas rojas indican las fallas encontradas en el campo, las líneas negras indican fallas cartografiadas en éste y otros trabajos, y las líneas discontinuas de color azul son fallas inferidas. Las flechas rojas indican la dirección de extensión. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior. Se empleó la metodología de diedros rectos utilizando el software Wintensor 5.8.8 Delvaux y Sperner (2003).

La falla presenta un núcleo complejo de ~10 m de espesor, constituido por salbanda, zonas de alteración hidrotermal (silicificación) e intenso vetilleo. Se encuentran escarpes alineados con estrías al echado y oblicuas, donde se evidencian indicadores cinemáticos, como escalones, medias lunas y fibras de crecimiento, que definen su

cinemática de tipo normal. Además de esto, se presentan brechas cohesivas con un fuerte fracturamiento (Figura 26). La falla Chinampas corta a la Ignimbrita Cuatralba basculándolas 8° hacia el oeste. El desplazamiento vertical estimado es ca.100 m (Figura 6: sección C-C’).



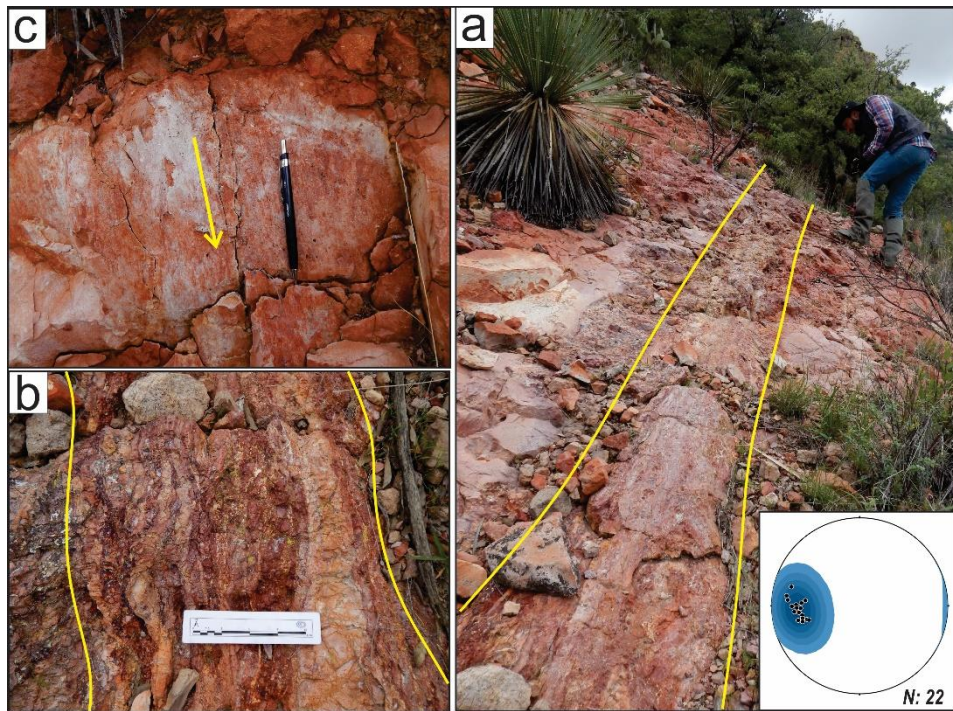
**Figura 29.** Inversión de datos de estría de la falla de Chinampas, en a) se muestran planos de falla, estrías y ejes principales de distorsión y en b) estrías y ejes principales de esfuerzo. Las flechas rojas indican la dirección principal de alargamiento. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior, en a se empleó el método vector “Linked Bingham” utilizando el software FaultKin 8.0 Richard W. Allmendiger © 2016-2019 y en b se empleó la metodología de diedros rectos utilizando el software Wintensor 5.8.8 Delvaux y Sperner (2003).

Los análisis de datos estructurales se realizaron en ocho fallas, obteniendo la solución cinemática y dinámica por inversión de estrías (Figuras 27 y 28). Los ejes de distorsión muestran que el acortamiento principal ( $\epsilon_3$ ) es aproximadamente vertical y el eje de alargamiento principal tiene dirección E-W ( $\epsilon_1$ ). Los datos de estrías medidos en la falla de Chinampas se ajustan al tensor de esfuerzos con  $\sigma_1$  orientado: 74/240,  $\sigma_2$  08/000,  $\sigma_3$  14/092 y una razón de esfuerzos R de 0.44 (Figura 29).

### 5.3 Falla Los Palos

La falla Los Palos aflora al SW de la localidad de La Laborcilla. La longitud de su traza es de ~ 8 km, orientada N-S e inclinada hacia el este. La estructura es de tipo normal y antitética en relación con la falla El Rayo. Esta estructura aparece cortando a la

Ignimbrita Cuatralba, basculándola 8° hacia el poniente. El desplazamiento vertical estimado es ca.100 m (Figura 6: sección B-B´).

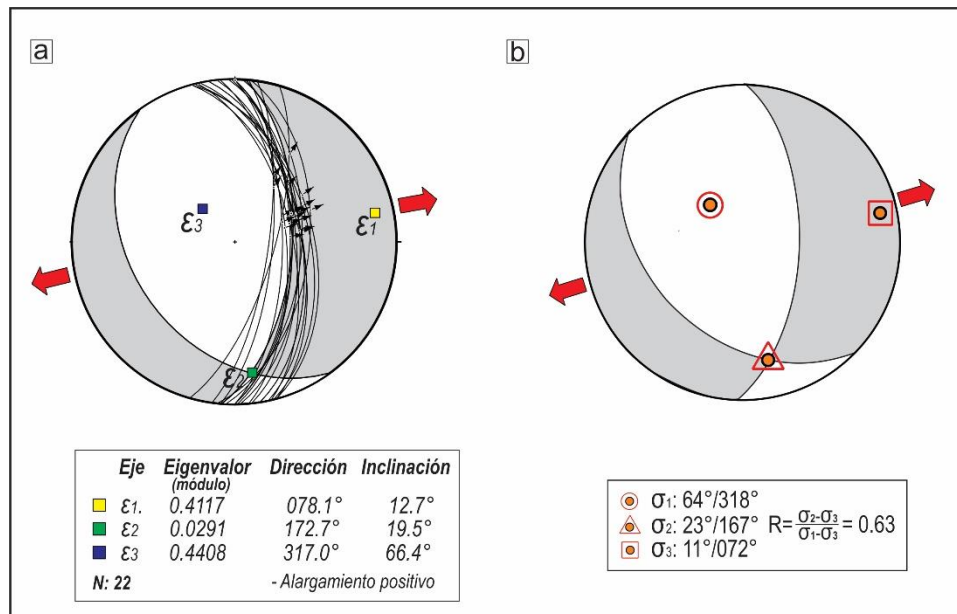


**Figura 30.** Falla normal Los Palos. a) Zona de falla donde se evidencia el núcleo de ~0.5 m delimitado por las líneas amarillas y adyacente al núcleo, se presenta la zona de daño. En esta zona se midieron 22 planos de falla representados en el diagrama de contornos de polos del recuadro; los datos muestran rumbos N-S con inclinación hacia el este. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior utilizando el software Stereonet 10.0. b) Estructuras anastomosadas presentes en el núcleo. c) Fallas con estrías evidenciando ángulos de pitch oblicuos.

En esta falla se observa el desarrollo del núcleo de falla, la zona de brecha y una zona de intenso fracturamiento (Figura 30). El ancho del núcleo es de 0.50 m donde se evidencian estructuras anastomosadas y alteración hidrotermal. La zona de brecha es cohesiva con fragmentos angulares de la Ignimbrita Cuatralba. En La zona de daño se evidencian planos con estrías, obteniendo ángulos de pitch al echado y oblicuos presentando una pequeña componente lateral izquierda.

Se analizaron 22 fallas, obteniendo la solución cinemática y dinámica por inversión de estrías (Figuras 27 y 28). Los ejes de distorsión muestran que el eje de acortamiento principal ( $\epsilon_3$ ) es aproximadamente vertical y el alargamiento principal tiene dirección NE-SW ( $\epsilon_1$ ). Los datos de estrías medidos en la falla Los Palos se ajustan a un tensor

de esfuerzos con  $\sigma_1$  orientado 64/318,  $\sigma_2$  23/167,  $\sigma_3$  11/072 y una razón de esfuerzos R de 0.63 (Figura 31).

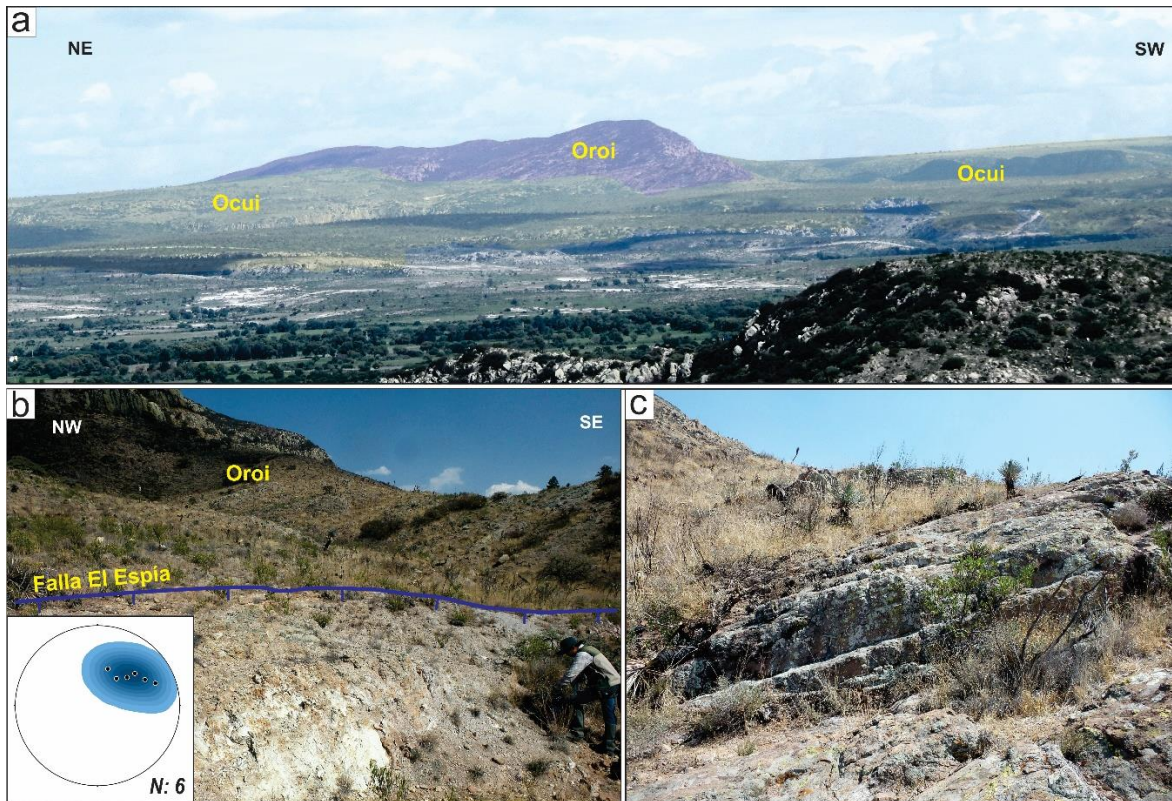


**Figura 31.** Inversión de datos de estría de la falla Los Palos, en a) se muestran planos de falla, estrías y ejes principales de distorsión y en b) estrías y ejes principales de esfuerzo. Las flechas rojas indican la dirección principal de alargamiento. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior, en a se empleó el método vector “Linked Bingjam” utilizando el software FaultKin 8.0 Richard W. Allmendiger © 2016-2019 y en b se empleó la metodología de diedros rectos utilizando el software Wintensor 5.8.8 Delvaux y Sperner (2003).

#### 5.4 Falla El Espía

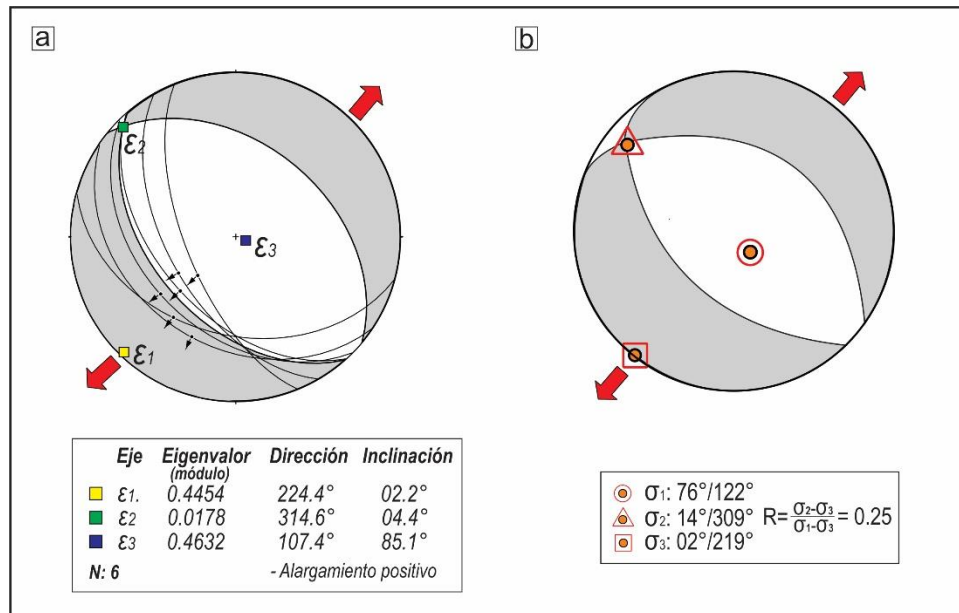
La Falla El Espía se localiza al SE de Licenciado Primo Verdad, en la base del Cerro El Espía. Esta estructura tiene una longitud de ~ 2 km, orientada NW-SE e inclinada hacia el SW. En la zona de falla se evidencia una brecha no cohesiva de 1.5 m de espesor, con fragmentos de la Ignimbrita Rincón de Ortega. También, se observan planos con estrías evidenciando ángulos de pitch al echado. La falla El Espía corta a la Ignimbrita Rincón de Ortega basculándola 25° hacia el NE (Figura 32).

En la sección geológica D-D’ se representa la falla El Espía dentro de un sistema de fallas normales sugiriendo una geometría tipo dominó, donde se observa que la rotación es simultánea entre las fallas y la ignimbrita Rincón de Ortega. El desplazamiento vertical de la falla El Espía es ca. 80 m Algunas de estas fallas, se encuentran cubiertas discordantemente por la Ignimbrita Cuatralba (Figura 6: sección D-D’).



**Figura 32.** Falla normal El Espía. a) Se observa la Ignimbrita Rincón de Ortega (Oroi) como un alto estructural con basculamiento hacia el NE. La Ignimbrita Cuatralba (Ocui) sobreyace a la IgRO en una relación de discordancia angular. b) Zona donde se midieron 6 datos de falla representados en el diagrama de contornos de polos del recuadro; los datos muestran un rumbo promedio S44°E con echado al SW; el promedio fue calculado mediante el vector de distribución de Fisher. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior utilizando el software Stereonet 10.0. c) En el bloque del bajo se encuentra la Ignimbrita Rincón de Ortega basculada entre 20° y 25° al NE.

Se analizaron 6 fallas, obteniendo la solución cinemática y dinámica por inversión de estrías (Figuras 27 y 28). Los ejes de distorsión muestran que el acortamiento principal ( $\epsilon_3$ ) es aproximadamente vertical y el alargamiento principal tiene dirección NE-SW ( $\epsilon_1$ ). Los datos de estrías medidos en la falla El Espía se ajustan al tensor de esfuerzos con  $\sigma_1$  orientado 76/122,  $\sigma_2$  14/309,  $\sigma_3$  02/219 y una razón de esfuerzos R de 0.25 (Figura 33).

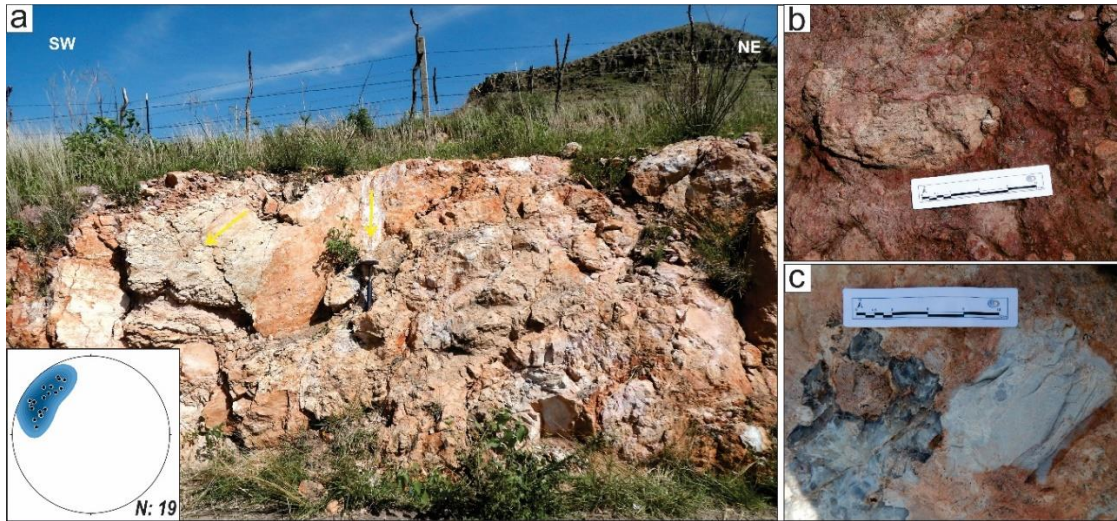


**Figura 33.** Inversión de datos de estría de la falla El Espía, en a) se muestran planos de falla, estrías y ejes principales de distorsión y en b) estrías y ejes principales de esfuerzo. Las flechas rojas indican la dirección principal de alargamiento. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior, en a se empleó el método vector “Linked Bingham” utilizando el software FaultKin 8.0 Richard W. Allmendiger © 2016-2019 y en b se empleó la metodología de diedros rectos utilizando el software Wintensor 5.8.8 Delvaux y Sperner (2003).

### 5.5 Sistema de fallas en *échelon*

El sistema de fallas en *échelon* se localiza al N de La Escondida y al NW de Licenciado Primo Verdad. Son estructuras de tipo normal, relativamente cortas y paralelas con longitudes entre 4 km y 8 km con orientación NE-SW. En el mapa se observan estructuras complejas formando pequeños grábenes y semigrábenes desarrollados por este sistema de fallas.

Al NW de la localidad de Licenciado Primo Verdad se reconoció una falla de este sistema, con longitud de 4.5 km, orientada NE-SW e inclinada hacia el SE. En la zona de falla (Figura 34) se encuentran planos con desplazamiento lateral y normal, evidenciados por las estrías de fallas con ángulos de pitch a rumbo y al echado. Además de esto, aparece una brecha cohesiva con fragmentos de riolita e ignimbrita y con zonas de alteración hidrotermal (silicificación).

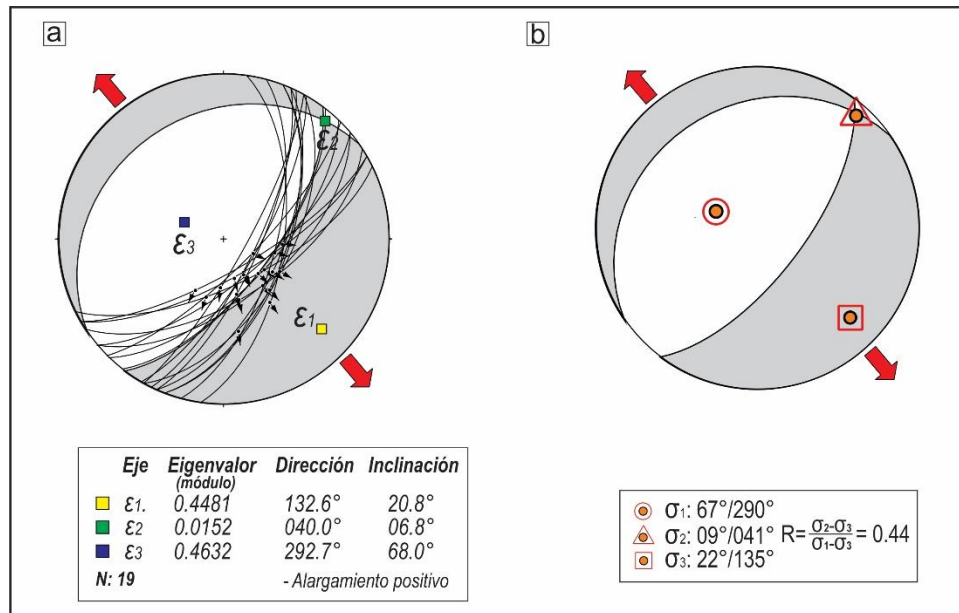


**Figura 34.** Falla normal del Sistema de fallas en *échelon*. a) Zona donde se midieron 19 planos de falla representados en el diagrama de contornos de polos del recuadro; los datos muestran rumbos NE-SW con inclinación hacia el SE. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior utilizando el software Stereonet 10.0. Las flechas amarillas indican las estrías al echado y a rumbo. b) brecha de la falla con fragmentos de la Ignimbrita Cuatralba y la riolita Chichindaro. c) Evidencia de silicificación en la brecha de falla.

El sistema de fallas en *échelon* se encuentra desplazando a las estructuras N-S del semigráben de Matancillas y cortan a la riolita Chichindaro y a la Ignimbrita Cuatralba. El desplazamiento vertical estimado es de 50 m (Figura 6: sección E-E').

Se analizaron 19 fallas, obteniendo la solución cinemática y dinámica por inversión de estrías (Figuras 27 y 28). Los ejes de distorsión muestran que el acortamiento principal ( $\epsilon_3$ ) es aproximadamente vertical y el alargamiento principal tiene dirección NW-SE ( $\epsilon_1$ ). Los datos de estrías medidos se ajustan al tensor de esfuerzos con  $\sigma_1$  orientado 67/290,  $\sigma_2$  09/041,  $\sigma_3$  22/135 y una razón de esfuerzos R de 0.44 (Figura 35).





**Figura 35.** Inversión de datos de estría de las fallas en *échelon*. En a) se muestran planos de falla, estrías y ejes principales de distorsión y en b) estrías y ejes principales de esfuerzo. Las flechas rojas indican la dirección principal de alargamiento. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior, en a se empleó el método vector “Linked Bingham” utilizando el software FaultKin 8.0 Richard W. Allmendiger © 2016-2019 y en b se empleó la metodología de diedros rectos utilizando el software Wintensor 5.8.8 Delvaux y Sperner (2003).

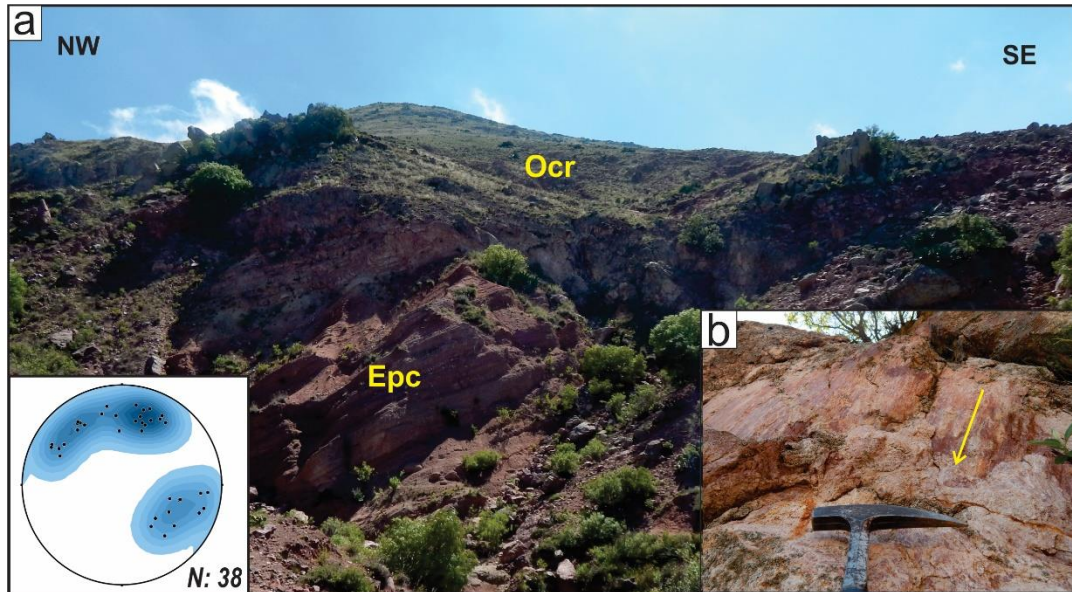
## 5.6 Sistemas de fallas del Complejo Volcánico de Pinos

La localidad de Pinos se ubica al SE del estado de Zacatecas donde aflora el Complejo Volcánico de Pinos (CVP) (Aranda-Gómez *et al.*, 2007; Tristán-González *et al.*, 2009; Dávalos, 2011). Al oeste del CVP aflora la Formación Indidura y la Formación Caracol del Cretácico Superior, que forman parte de la Cuenca Mesozoica del centro de México (Aguillón-Robles, 1983). Estas unidades tienen estructuras de acortamiento como pliegues, foliaciones y fallas inversas mostrando transporte tectónico al NE. El fallamiento normal en CVP se caracteriza por la intersección de un conjunto de fallas con orientación NE, NW y NS las cuales se intersectan unas a otras definiendo un sistema complejo, en donde las relaciones de corte entre las fallas son ambiguas (Aranda-Gómez *et al.*, 2007).

Las observaciones de campo confirman las orientaciones de las fallas normales reportadas previamente (Aranda-Gómez *et al.*, 2007; Tristán-González *et al.*, 2009; Dávalos, 2011). Las fallas que se midieron en el CVP se localizan al NE de poblado

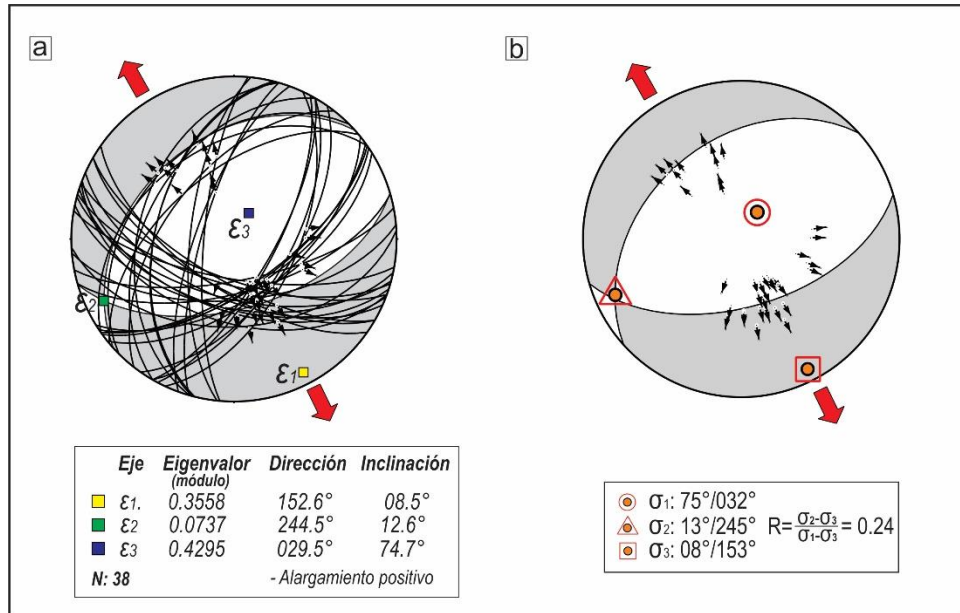
de Pinos, tienen rumbos NW y NE. Las estructuras NE presentan longitudes de ~6 km e inclinación hacia el NW y SE, además, se encuentra desplazadas por fallas NW. Las estructuras NW hacen parte del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes, tienen longitudes de ~10 km e inclinación hacia el SW. Las zonas de fallas de las estructuras mencionadas se presentan como planos con estrías con ángulos de pitch al echado y oblicuos. También se observaron brechas con fragmentos de la riolita Chichíndaro asociado a un intenso fracturamiento. La unidad más joven que cortan las estructuras NW y NE es la riolita Chichíndaro (Figura 5).

En la sección geológica A-A' (Figura 6) con rumbo general SW-NE se ilustra la falla Pinos que tiene un rumbo NW-SE e inclinación hacia el SW (Figura 5). Esa estructura pone en contacto a las rocas cretácicas (en el bloque SW) con el conglomerado de Pinos (Eoceno) que está basculado de 20° a 25° hacia el NE (en el bloque NE). Dicha falla fue interpretada como contemporánea y probablemente límite de la cuenca del conglomerado Pinos (Aranda-Gómez *et al.*, 2007; Dávalos, 2011), lo cual es congruente con la cartografía realizada en este trabajo, ya que no se encontraron afloramientos del conglomerado hacia el S y SW de Pinos. Considerando lo anterior, al llevar a la horizontal las capas del conglomerado Pinos junto con la falla Pinos, se infiere que originalmente se trató de una falla normal buzante hacia el NE, lo que es acorde con que las primeras fases de actividad de la falla Pinos fueron previas al depósito del conglomerado Pinos formando un límite de cuenca y que posteriormente fue rotada la falla junto con el conglomerado hacia el SW. Es por esa razón que aparece indicada con una cinemática de falla inversa en la sección geológica A-A' de la Figura 6.



**Figura 36.** a) Falla normal en Pinos afectando a la riolita Chichíndaro (Ocr) y al Conglomerado de Pinos (Epc) basculado hacia el NE. En esta zona se midieron 38 planos de falla representados en el diagrama de contornos de polos del recuadro; los datos muestran rumbos NE y NW. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior utilizando el software Stereonet 10.0. b) Estrías observadas en el escarpe de falla.

Se analizaron 38 fallas, obteniendo la solución cinemática y dinámica por inversión de estrías (Figuras 26 y 27). Los ejes de distorsión muestran que el acortamiento principal ( $\epsilon_3$ ) es aproximadamente vertical y el alargamiento principal tiene dirección NW-SE ( $\epsilon_1$ ). Los datos de estrías medidos se ajustan al tensor de esfuerzos con  $\sigma_1$  orientado 75/032,  $\sigma_2$  13/245,  $\sigma_3$  08/153 y una razón de esfuerzos R de 0.24 (Figura 37).



**Figura 37.** Inversión de datos de estría de las fallas medidas en el CVP, en a) se muestran planos de falla, estrías y ejes principales de distorsión y en b) estrías y ejes principales de esfuerzo. Las flechas rojas indican la dirección principal de alargamiento. Los datos fueron graficados en la falsilla Schmidt, hemisferio inferior, en a se empleó el método vector “Linked Bingham” utilizando el software FaultKin 8.0 Richard W. Allmendinger © 2016-2019 y en b se empleó la metodología de diedros rectos utilizando el software Wintensor 5.8.8 Delvaux y Sperner (2003).

## 5.7 Graben de Matanzas

El Graben de Matanzas es una fosa tectónica que está limitada al norte y al oeste por el semigraben de Matancillas, al este por la Sierra de Jacales (Figura 5) y al sur por el Sistema de fallas El Bajío. En el área de estudio, el graben de Matanzas presenta dos fallas principales bien definidas, orientadas al NNE y con longitudes de ~24 km cada una. Las estructuras principales aparecen afectando a la riolita Chichíndaro y a la Ignimbrita Cuatralba evidenciando un desnivel topográfico de ~200 m.

## 6. Discusión

### 6.1 Evolución del semigraben de Matancillas

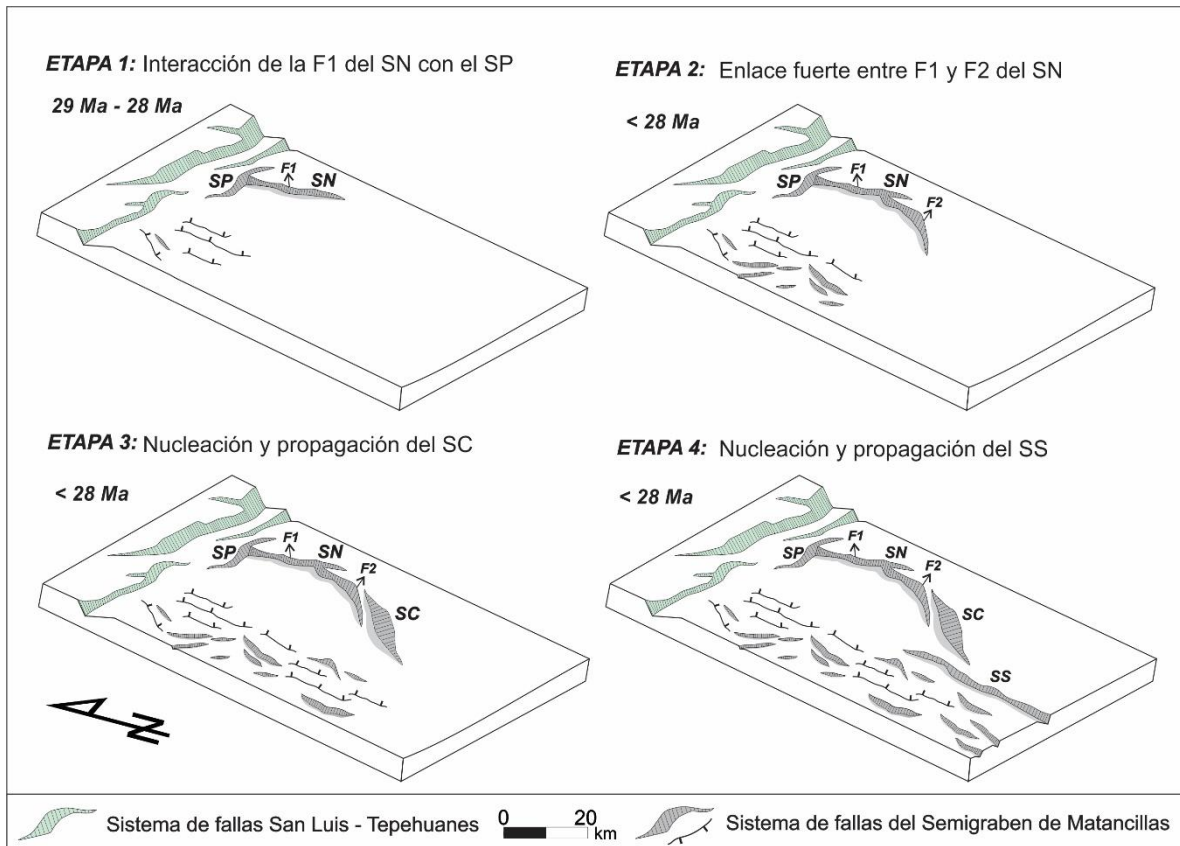
La evolución espacial y temporal del semigraben de Matancillas muestra distintas etapas de actividad de fallamiento. Cada etapa de actividad se caracteriza por la nucleación y el crecimiento lateral de segmentos de falla, que al propagarse interactúan unas con otras, desarrollando rampas de relevo que muestran diferentes estadios en su evolución: estado inmaduro, estado de interacción o enlace débil y estado de enlace o enlace fuerte (Hus *et al.*, 2005). La edad relativa de actividad de las fallas del semigraben fue inferida a partir de las relaciones de corte entre las fallas y las unidades litoestratigráficas afectadas.

El semigraben de Matancillas se caracteriza por el desarrollo de la falla principal El Rayo que delimita el pilar tectónico del medio graben. La falla El Rayo está conformada por un segmento norte (SN) con dos fallas enlazadas (F1 y F2), un segmento centro (SC) y un segmento sur (SS). En este trabajo reconocimos cuatro fases de actividad de la falla El Rayo (Figura 38), donde se observa que la migración de la deformación ocurrió de norte a sur en el semigraben. A continuación se describe cada etapa de actividad de fallamiento:

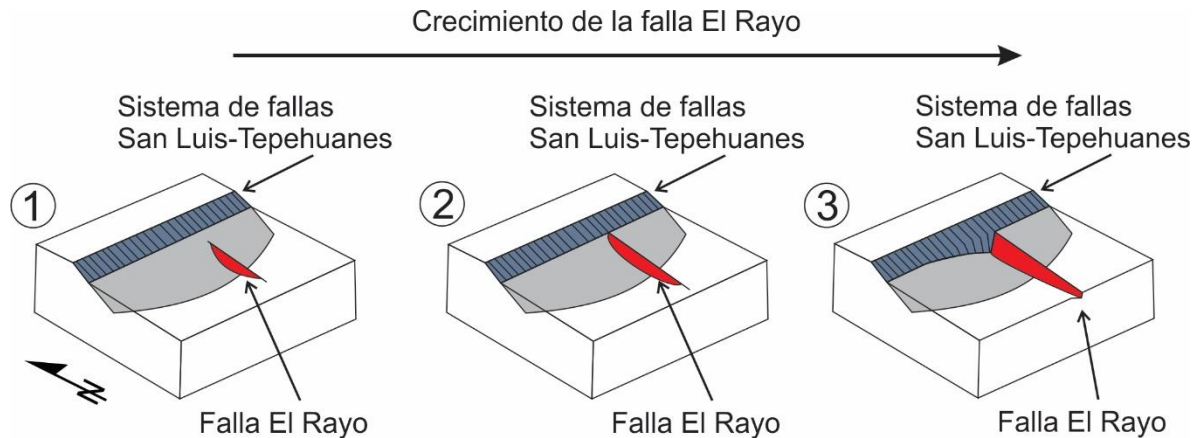
La primera etapa ocurrió con la formación de la falla F1 del segmento norte (SN), la cual se propagó lateralmente hasta interceptarse con estructuras preexistentes de orientación NW-SE del sistema de fallas San Luis - Tepehuanes (SFSLT). Según Nixon *et al.* (2014), una falla aislada que posteriormente se encuentra restringida por el bloque del alto de una falla preexistente, no continúa su propagación y genera una transferencia del desplazamiento provocando la reactivación local de la falla preexistente. En el caso del SN, en su primera etapa se observa que el crecimiento de F1 es restringido por el segmento Pinos, el cual tienen una orientación NW-SE y hace parte del SFSLT (Figura 39).

La edad de actividad de F1 se infiere a partir de la relación estratigráfica de la ignimbrita Cantera ( $29.24 \pm 0.32$  Ma y  $29.80 \pm 0.26$ ) y la ignimbrita Cuatralba ( $27.68 \pm 0.38$  Ma;  $28.81 \pm 0.39$  Ma;  $27.96 \pm 0.58$  Ma;  $28.83 \pm 0.51$  Ma). F1 se encuentra afectando a la

ignimbrita Cantera, generando un alto estructural basculado ligeramente al E. Posteriormente se emplazó la ignimbrita Cuatralba, la cual se encuentra rodeando al alto estructural producido por F1 (Figura 5). Por lo tanto, consideramos que esta etapa queda restringida entre ~29 Ma y ~28 Ma.



**Figura 38.** Modelos esquemáticos de las etapas de actividad de la falla El Rayo del semigraben de Matancillas. Segmento Norte (SN), segmento Centro (SC), segmento Sur (SS), segmento Pinos (SP), Falla 1 (F1) y Falla 2 (F2).



**Figura 39.** Etapas de crecimiento y propagación de la falla El Rayo. 1) Nucleación y propagación de la falla El Rayo. 2) Intersección de la falla El Rayo con el Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (SFSLT). 3) La Falla El Rayo no continúa su propagación y genera una transferencia del desplazamiento provocando la reactivación local de la falla del SFST. Tomado y modificado de Nixon *et al.* (2014).

En la segunda etapa del desarrollo del semigraben de Matancillas se generó la falla F2 del segmento norte. La propagación lateral de F2 generó la interacción con F1, desarrollándose un enlace fuerte entre ambas fallas (Figura 38). F2 afectó a la ignimbrita Cuatralba basculándola de 5° a 8° hacia el E, con un desplazamiento vertical estimado entre 50 m y 100 m. En el bloque del alto del segmento norte se empieza a formar una zona de acomodo, generando fallas sintéticas y antiéticas con orientación N-S y que también afectan a la ignimbrita Cuatralba. En este segmento se observa que el piroclástico las Pilas ( $1.16 \pm 0.15$  Ma; Ángeles-Moreno, 2018) se encuentra sepultando a F2 y a las estructuras generadas en el bloque del alto (Figura 5).

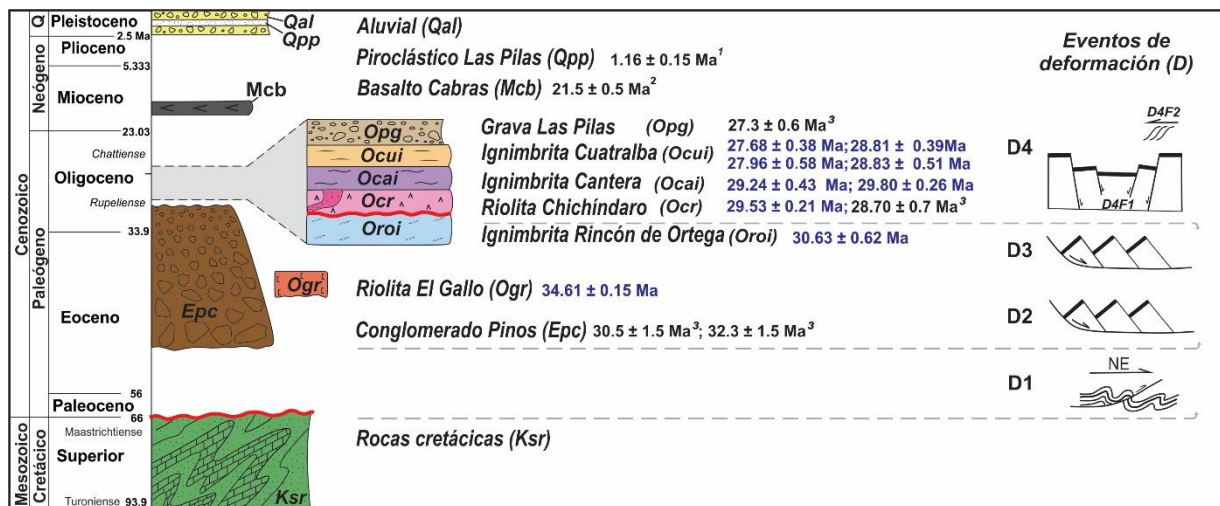
En la tercera etapa se formó el segmento centro. Durante esta etapa la actividad del segmento norte disminuye generando desplazamientos de menor magnitud ( $\sim 10$  m), y la deformación se focaliza en el segmento centro. Entre estos dos segmentos se genera un enlace débil. El segmento centro produjo la exhumación de las rocas cretácicas y un desplazamiento vertical de la ignimbrita Cuatralba de ca. 230 m. En el bloque del alto continúa el desarrollo de la zona de acomodo con la generación de fallas sintéticas y antiéticas al segmento centro (Figura 38). En esta etapa se evidencia que la migración de la deformación en el semigraben de Matancillas ocurrió de norte a sur, debido a que se observa a la ignimbrita Cuatralba afectada por el segmento centro, mientras que en la etapa 1, la ignimbrita Cuatralba se emplaza posteriormente a la actividad de la F1 del segmento norte.

En la última etapa se genera el segmento sur. Este segmento produjo desplazamientos de menor magnitud comparados con el segmento norte y centro. El segmento sur afecta a la ignimbrita Cuatralba generando un desplazamiento vertical ca. 50 m. Además de esto, se reconocieron fallas de tipo normal con rumbo NE-SW y con arreglo en *échelon*, que se encuentran desplazando al segmento sur.

El registro geológico-estructural del área de estudio nos permitió establecer que la actividad del semigraben de Matancillas inició entre los depósitos de la ignimbrita Cantera y la Ignimbrita Cuatralba y se extiende posiblemente todo el Oligoceno, sin que se pueda establecer con precisión el final de su actividad, pues solamente se observa que sus fallas son cubiertas por el depósito piroclástico Las Pilas.

## 6.2 Eventos de deformación

La cartografía realizada en el área de estudio permitió reconocer cuatro eventos de deformación (D1, D2, D3 Y D4), que están registrados en rocas con edades que van desde el Cretácico Tardío al Oligoceno temprano (Figura 40).



**Figura 40.** Columna estratigráfica y eventos de deformación del área de estudio. Se presentan nuevas edades U-Pb (azul) y se agregan las edades documentadas en estudios previos: <sup>1</sup>Ángeles-Moreno, 2018, <sup>2</sup>Tristán-González *et al.* (2009) y <sup>3</sup>Aranda Gómez *et al.*, 2007. D1, D2, D3 y D4 son los eventos de deformación registrados en las unidades litoestratigráficas. Las líneas curvas representan discordancias.

Las rocas más antiguas que afloran en el área de estudio son rocas cretácicas, que se componen por las formaciones Indidura y Caracol del Cretácico Tardío (Aguillón-



Robles, 1983). En este conjunto litológico se registra una deformación por acortamiento que corresponde al evento D1, y que genera estructuras como pliegues, foliaciones, estructuras S-C y fallas inversas. Este evento de deformación D1 coincide con el evento compresivo de la Orogenia Laramide que afectó al centro y norte de México, generando estructuras de acortamiento con una dirección de transporte tectónico hacia el NE (Nieto- Samaniego *et al.*, 2005; Fitz-Díaz *et al.*, 2018; Ángeles-Moreno *et al.*, 2017). Cuellar-Cárdenas *et al.* (2012) propone la edad de deformación de este evento desde el Cretácico Temprano (ca. 105 Ma) en el poniente hasta el Paleoceno (ca. 55 Ma) en el oriente del país.

Sobre las rocas cretácicas se encuentra el conglomerado Pinos (Eoceno tardío - Oligoceno temprano; Aranda Gómez *et al.*, 2007), el cual no presenta evidencia de deformación por acortamiento. Su relación estratigráfica es una discordancia angular que marca el final del evento D1. Aranda Gómez *et al.* (2007) infieren un evento de deformación extensional a partir del depósito del conglomerado Pinos, que en este trabajo corresponde al evento D2. A nivel regional, este evento es referido como el causante del levantamiento, fallamiento de bloques, volcanismo y depósito de conglomerados (e.g. conglomerado Duarte; Miranda-Avilés *et al.*, 2016, conglomerado Zacatecas; Escalona-Alcázar *et al.*, 2016), que fue posterior al cese de la Orogenia Laramide (Edwards, 1955; Aranda Gómez *et al.*, 2007).

En el área de estudio la actividad volcánica de composición riolítica inició en el límite Eoceno-Oligoceno, con la riolita El Gallo ( $34.61 \pm 0.15$  Ma). Posteriormente se emplazó la ignimbrita Rincón de Ortega ( $30.63 \pm 0.62$  Ma), la cual se encuentra afectada por fallas normales con orientación NW-SE (falla El Espía), que basculan a esta unidad  $\sim 25^\circ$  hacia el NE. La formación de esas estructuras corresponde al evento D3, el cual generó una discordancia angular entre la ignimbrita Rincón de Ortega y la ignimbrita Cuatralba ( $\sim 28$  Ma) (Figura 11).

En distintas localidades del sur de la Mesa Central se han reportado fallas con dirección NW-SE que afectan a rocas volcánicas oligocénicas inclinándolas hacia el NE, y que yacen en discordancia angular bajo rocas más jóvenes. En el sector Duarte al oriente de León, Guanajuato, aflora la ignimbrita Alfaro ( $\sim 31$  Ma) que se encuentra

basculada de 10° a 40° hacia el noreste, y yace en discordancia angular bajo la ignimbrita Media Luna (~ 24 Ma) (Ángeles-Moreno, 2018 y Botero-Santa *et al.*, 2015). En las localidades Los Juanes, Santo Domingo y El Rincón aflora la ignimbrita Rincón de Ortega (31.12 ± 0.16 Ma) y la ignimbrita Los Juanes (30.6 Ma) que se encuentran inclinadas de 35° a 40° hacia el NE, y son cortadas por diques de la riolita Chichíndaro (~30 Ma) (Del Pilar-Martínez *et al.*, 2019). En la Sierra de San Miguelito en San Luis Potosí (SLP) aflora la ignimbrita Cantera con edad de 29 ± 1.5 Ma que está bascula hacia el NE y se encuentra yaciendo en discordancia angular bajo la ignimbrita Panalillo (26.8 ± 1.3) (Labarthe-Hernández y Jiménez-López, 1992; Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; Xu *et al.*, 2004). Considerando las edades reportadas en las localidades mencionadas, se observa que la deformación producida por fallas NW-SE es más antigua al sur que al norte de la Mesa Central, por lo cual, Del Pilar-Martínez *et al.* (2013) proponen un evento extensional rotacional y diacrónico, siendo más antiguo en la región de León, Guanajuato, con respecto a la región de San Luis Potosí, S.L.P.

Posterior a la Ignimbrita Rincón de Ortega se emplazaron la riolita Chichíndaro (29.53 ± 0.21 Ma), la ignimbrita Cantera (29.24 ± 0.32 Ma y 29.80 ± 0.26) y la ignimbrita Cuatralba (27.96 ± 0.58 Ma, 28.81 ± 0.39 Ma, 28.83 ± 0.51 Ma y 27.68 ± 0.38 Ma), las cuales tienen edades del Rupeliense. Estas unidades se encuentran afectadas por el último evento de deformación extensional D4, el cual comprende al menos dos fases de actividad D4F1 y D4F2.

En D4F1 predominan fallas con rumbo NS y NNE-SSW, que forman al semigraben de Matancillas. Esta estructura es un graben asimétrico delimitado por la falla El Rayo que tiene una cinemática normal con una pequeña componente lateral izquierda. La actividad del semigraben fue posterior al emplazamiento de la ignimbrita Cuatralba y anterior al depósito piroclástico Las Pilas (1.16 ± 0.15 Ma; Ángeles-Moreno, 2018).

La fase D4F1 se correlaciona con el evento extensional que ocurrió durante el Oligoceno-Mioceno temprano (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; Henry y Aranda, 2002; Ferrari *et al.*, 2005). Este evento se evidencia por la formación de grábenes y semigrábenes con orientación NS, NNE-SSW y NNW-SSE que se encuentran en la porción meridional de la Mesa Central (grieten de Villa de Reyes y grieten de

Aguascalientes) y al sur de la Sierra Madre Occidental (graben de Calvillo, graben de Juchipila, graben Tlaltenango, graben de Bolaños, semigraben Pajaritos, semigraben Alicia y semigraben Jesús María) (Figura 2). La edad de actividad del semigraben de Matancillas (< 28 Ma) coincide con las edades reportadas en el graben Aguascalientes (< 28 Ma; Loza-Aguirre *et al.*, 2008) y graben de Juchipila (< 28 Ma; Ferrari *et al.*, 2018), y es un poco más joven que el graben de Villa de Reyes (30 – 28 Ma; Del Pilar-Martínez *et al.*, 2019) por lo que se considera que el semigraben de Matancillas hizo parte de este evento de deformación extensional que ocurrió en el límite Oligoceno temprano - Oligoceno tardío en la parte sur de la Mesa Central y la Sierra Madre Occidental.

La fase de actividad del D4F2 no ha sido documentada con anterioridad, esta fase se caracteriza, dentro del área de estudio, por el desarrollo de fallas normales paralelas y de poca longitud (Sistema de fallas en *échelon*). D4F2 es de menor magnitud y se encuentra desplazando a las fallas NS y NNE-SSW generadas en D4F1.

Existe un *hiatus* entre los eventos de deformación extensional D3 y D4 de ~2Ma, que está evidenciado por una gran discordancia angular (Figura 32) entre rocas con edades de ca. 31 Ma (ignimbrita Rincón de Ortega) y 28 Ma (ignimbrita Cuatralba). Las fallas del evento D3 son rotacionales y el alargamiento principal tiene una dirección NE-SW, mientras que en D4 las fallas son irrotacionales y presentan una dirección de alargamiento principal E-W (Figura 27 y 28), lo que sugiere un cambio en el régimen de deformación y esfuerzo. Edades similares para este *hiatus* han sido establecidas por Del Pilar-Martínez *et al.* (2019) al sur de la Mesa Central.

### **6.3 Significado tectónico**

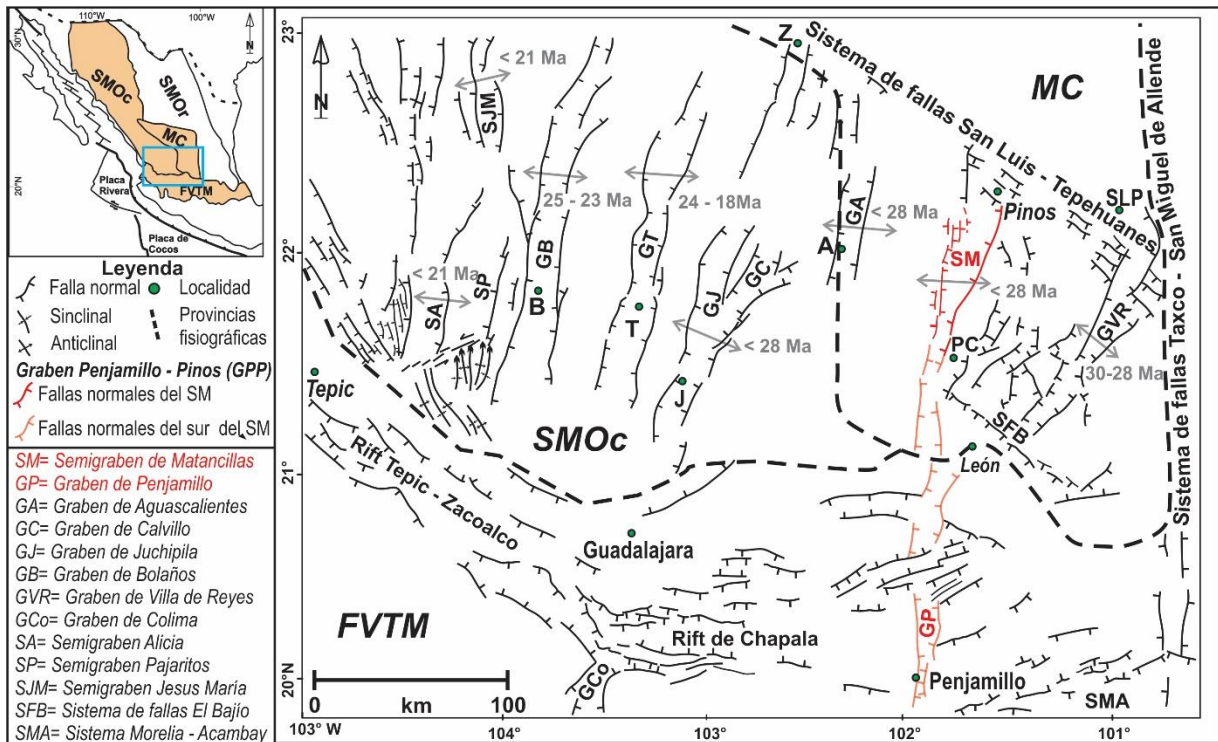
Durante la parte media y tardía del Cenozoico, los eventos geológicos más importantes en el centro y occidente de México han sido: el evento magmático silícico que formó las coberturas de la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central, y fallamiento extensional, que ocurrió en varias fases o acmés de deformación, abarcando desde el Eoceno hasta el Cuaternario (Nieto-Samaniego *et al.* 1999; Aranda *et al.*, 2000; Ferrari *et al.*, 2005; Tristán-González *et al.*, 2009; Loza-Aguirre *et al.*, 2012). Estos eventos se han asociado a una extensión litosférica debida al retroceso de la placa Farallón desde

la base de la placa Norteamérica (Ferrari et al., 2005). Ferrari et al. (2017) sugiere que esa extensión litosférica durante el Oligoceno inició desde la parte oriental de la Sierra Madre Occidental. Sin embargo, considerando las observaciones realizadas en el desarrollo de esta tesis, se propone que la extensión empezó desde el límite oriental de la Mesa Central. Esto se evidencia en las edades de deformación de las estructuras mayores, desde el graben de Villa de Reyes (límite oriental de la Mesa Central) hasta el graben de Juchipila (límite oriental de la Sierra Madre Occidental), las cuales afectan a una cubierta ignimbrítica oligocénica con edades que van desde 30 Ma a 28 Ma (Figura 41).

En la Mesa central y la Sierra Madre Occidental existen evidencias geológicas de una migración del magmatismo y el fallamiento extensional de Este a Oeste, que ocurrieron durante el Oligoceno-Mioceno temprano (Ferrari *et al.*, 2005; Nieto-Samaniego *et al.* 2005). En la parte meridional de la MC se presenta una cubierta volcánica formada por un enorme campo de domos riolíticos (32 – 29 Ma; Nieto-Samaniego *et al.* 2007) e ignimbritas de composición riolítica (29-25 Ma; Nieto-Samaniego *et al.* 2007) con edades oligocénicas. El volcanismo fue coetáneo con la deformación extensional generando fallas y fosas con direcciones NW, NE y E-W, que confieren un arreglo romboédrico complejo (fallamiento polimodal) bajo un régimen de deformación tridimensional (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Del Pilar-Martínez *et al.*, 2019). Seguido de esto, la actividad magmática y la deformación extensional migró hacia occidente localizándose cerca de los márgenes de la MC (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005), propagándose hacia el dominio oriental y occidental de la Sierra Madre Occidental (Ferrari *et al.*, 2005). Dentro de estos dominios se encuentran secuencias de ignimbritas silíceas con espesores que superan 1000 metros, emplazadas durante los pulsos del Oligoceno tardío y Mioceno temprano. Esas ignimbritas se encuentran afectadas por grábenes y semigrábenes con orientación N-S, NNE y NNW (Ferrari *et al.*, 2002; Ferrari *et al.*, 2005), causada por una deformación bidimensional (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997). Según lo anterior, se observa que hubo un cambio en el estilo de deformación extensional, que pasó de tridimensional en la MC a bidimensional en la SMOc (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997).

La relación espacial y temporal del SM define un límite estructural entre los dos estilos de deformación que se observan en la Mesa Central y la Sierra Madre Occidental (Figura 41). No obstante, cabe señalar que es el graben de Aguascalientes (GA) el límite entre las dos provincias fisiográficas (SMOc y MC), el cual no sólo está definido por su estructura sino también por criterios morfológicos y geológicos. El GA es una estructura cortical con dirección N-S, cuya falla principal tiene un desplazamiento vertical de aproximadamente 900 m (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005), en contraste con el SM que presenta un desnivel máximo de 300 m entre las rocas volcánicas que afloran el bloque del bajo de la falla El Rayo (Segmento Centro) y el nivel del valle. Además, las contrastantes morfologías que separa el GA entre cada provincia son el resultado de la deformación generada durante el Oligoceno en la SMOc y en el Mioceno en la MC.

En este trabajo se documentó la edad (~28 Ma), cinemática y evolución del semigraben de Matancillas (SM) que está ubicado en la parte sur de la Mesa Central. Mediante el análisis cinemático de las fallas encontradas en campo, se consideró que la deformación ocurrida en el SM fue bidimensional, mostrando que el acortamiento principal ( $\epsilon_3$ ) es aproximadamente vertical, con un eje de alargamiento principal en dirección E-W ( $\epsilon_1$ ). La configuración estructural del semigraben de Matancillas (SM) es diferente a las estructuras de la Mesa Central y de la Faja Volcánica Transmexicana, aún más si se considera como una sola megaestructura todo el graben de Penjamillo-Pinos (GPP en Figura 41). El SM muestra gran similitud en longitud y orientación con las estructuras de la Sierra Madre Occidental, y si el SM se formó durante el evento tectónico de la SMOc, como lo indican su edad y estilo estructural, entonces la segmentación del continente que culminó con la apertura del Golfo de California inició en la parte central del continente, en el límite este de la Mesa Central alrededor de 28 Ma.



**Figura 41.** Mapa estructural del sur de la Sierra Madre Occidental (SMOc), Mesa Central (MC) y del sector centro - oeste de la Faja Volcánica Transmexicana. Las flechas de color gris indica la dirección de extensión de los grabenes y semigrabenes de la Mesa Central (MC) y la Sierra Madre Occidental (SMOc) y en número indica la edad de deformación. Figura basada en Nieto-Samaniego *et al.* (1999); Ferrari (2000); Ferrari *et al.* (2002), y Del Pilar-Martínez *et al.* (2019). FVT: Faja Volcánica Transmexicana, SFB: Sistema de fallas El Bajío, PC: Paso de Cuarenta, SLP: San Luis Potosí, A: Aguascalientes, J: Juchipila, T: Tlaltenango, B: Bolaños, Z: Zacatecas.

## 7. Conclusiones

- El graben Bajo Penjamillo - Pinos (GPP) es un sistema de grabenes y semigrabenos con dirección ~N-S que se extiende 250 km desde Pinos, Zacatecas, hasta Penjamillo, Michoacán, y se intercepta con las estructuras mayores de la Mesa Central y la Faja Volcánica Transmexicana. En la parte norte de este sistema se encuentra el semigraben de Matancillas, y en el sur se ubica el graben de Penjamillo. Las relaciones de corte de las fallas sugieren que la actividad del GPP es mucho más antigua al norte que al sur, dado que, en la parte norte las estructuras cortan rocas del Oligoceno tardío y al sur, las fallas se encuentran afectando rocas del Cuaternario.

- El semigraben de Matancillas es una estructura con orientación NNE definido por la falla principal El Rayo que delimita el pilar tectónico del medio graben. La fosa producto del semigraben tiene un ancho de ~25 km, longitud de ~95 km y un desnivel topográfico máximo de 300 m.
- En el semigraben de Matancillas afloran diez unidades litoestratigráficas con edades que van desde el Mesozoico hasta el Cenozoico. Para cinco de estas unidades se presentan nuevas edades U-Pb: riolita El Gallo ( $34.61 \pm 0.15$  Ma), ignimbrita Rincón de Ortega ( $30.63 \pm 0.62$  Ma), riolita Chichíndaro ( $29.53 \pm 0.21$  Ma), ignimbrita Cantera ( $29.24 \pm 0.32$  Ma;  $29.80 \pm 0.26$ ) e ignimbrita Cuatralba ( $27.68 \pm 0.38$  Ma;  $28.81 \pm 0.39$  Ma;  $27.96 \pm 0.58$  Ma;  $28.83 \pm 0.51$  Ma).
- Fueron identificados cuatro eventos de deformación en el área de estudio. El primer evento se registra en las rocas cretácicas, la cuales presentan estructuras de acortamiento como pliegues, foliaciones y fallas inversas mostrando transporte tectónico al NE, asociadas a la deformación Laramide. El segundo evento de deformación fue extensional y es inferido a partir del depósito del conglomerado Pinos. El tercer evento ocurrió ca. 30 Ma, representado por una discordancia angular producida por fallas NW-SE con arreglo de tipo dominó. El cuarto evento de deformación, que comprende dos fases de actividad, ocurrió a finales del Oligoceno tardío. La primera fase generó el semigraben de Matancillas (~28 Ma) de orientación NNE y la segunda fase, de menor magnitud, produjo fallas normales con componente lateral y rumbo NE-SW y se encuentran desplazando a las estructuras formadas durante la primera fase de este evento.
- Basados en las edades de deformación reportadas de los grábenes Juchipila (< 28 Ma), Aguascalientes (< 28 Ma) y Villa de Reyes (< 30 Ma > 28 Ma), y dado que el registro de actividad más antiguo del semigraben de Matancillas es de < 28 Ma, se propone que esta estructura pudo haberse formado durante las primeras fases de deformación extensional que afectó al centro de México y que culminó con la apertura del Golfo de California.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguillon-Robles, A., 1983, Cartografía geológica de las hojas Espíritu Santo, Pinos, El Obraje y Ojuelos, Estados de San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato y Zacatecas: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico, 76 p.
- Aguillon-Robles, A., Aranda-Gomez, J.J., Marin-Solis, J.D., 1994, Noticia acerca de la presencia de sedimentos continentales y volcanismo asociado (Eoceno?) en la región de Pinos, Zac: GEOS,14(5), 80 p.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., 2005, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57(1), 65-82.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Reyes-Zaragoza, M. A., Orozco-Esquivel, M. T., Ojeda-García, Á. C., Vasallo-Morales, L. F., 2001, Estratigrafía y deformación de la región San Miguel de Allende-Querétaro: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 18, 129-148.
- Alaniz-Álvarez, S. A., & Nieto-Samaniego, A. F., 2005, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57(1), 65-82.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Orozco-Esquivel, M. T., Vassallo, L. F., Xu, S., 2002, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: implicaciones en la deformación post-eocénica del centro de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 55(1), 12-29.
- Allmendinger, R. W., Cardozo, N., Fisher, D. M., 2011, Structural geology algorithms: Vectors and tensors: Cambridge University Press, Cambridge, UK, 289 p.



- Ángeles-Moreno, E., 2018, La evolución tectónica Cenozoica de las Sierras de Guanajuato y Codornices, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, Tesis de Doctorado.
- Angelier, J., Mechler, P., 1977, Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits: Bulletin de la Société géologique de France, 7(19), 1309-1318.
- Aranda-Gómez, J. J., Aranda-Gómez, J. M., Nieto-Samaniego, A. F., 1989, Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el Cenozoico de la Sierra de Guanajuato y la parte meridional de la Mesa Central: Universidad Nacional Autónoma de México. Revista, 8(1), 33-46.
- Aranda-Gómez, J. J., Henry, C. D., Luhr, J. F., 2000, Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras. México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53(1), 59-71.
- Aranda-Gómez, J. J., Mcdowell, F. W., 1998, Paleogene extension in the southern Basin and Range province of Mexico: Syndepositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato Mining District: International Geology Review, 40(2), 116-134.
- Aranda-Gomez, J.J., Molina-Garza, R.S., Mcdowell, F.W. Vassallo-Morales, L.F., Ortega-Rivera, M.A., Solorio-Mungia, J.G., Aguillon-Robles, A., 2007, The relationships between volcanism and extension in the Mesa Central: the case of Pinos, Zacatecas, Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geologicas, 24(2), 216-233.
- Barragán, R., Campos-Madrigal, E., Ferrusquía-Villafranca, I., López-Palomino, I., Tolson, G., 2010, Código Estratigráfico Norteamericano: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Botero-Santa, P. A., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., López-Martínez, M., Levresse, G., Xu, S., Ortega-Obregón, C., 2015, Origen y desarrollo de la cuenca El

Bajío en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana: *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 32(1), 84-98.

Cuéllar-Cárdenas, M. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Levresse, G., Alaniz-Álvarez, S. A., Solari, L., Ortega-Obregón, C., López-Martínez, M., 2012, Límites temporales de la deformación por acortamiento Laramide en el centro de México: *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 29(1), 179-203.

Daválos Elizondo, E., 2011, Análisis estructural del complejo volcano-tectónico de Pinos, Zacatecas, México: Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Tesis de Maestría.

Del Pilar-Martínez, A., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Alvarez, S.A., Angeles-Moreno, E., and Ortega-Obregón, C., 2018, Geology of southern Mesa Central of Mexico: An example of three-dimensional deformation in the Oligocene: *Proceedings of the Geological Society of America 130th Annual Meeting*, Indianapolis, Indiana, Nov 2018.

Del Pilar-Martínez, A., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Alvarez, S.A., Angeles-Moreno, E., 2019, Geology of southern Mesa Central of Mexico: recording the beginning of a polymodal fault system: *Journal of Maps*.

Delvaux, D., Sperner, B., 2003, New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program: *Geological Society, London, Special Publications*, 212(1), 75-100.

Echegoyén-Sánchez, J., Romero-Martínez, S., Velázquez-Silva, S., 1970, Geología y yacimientos minerales de la parte central del distrito minero de Guanajuato: *Boletín del Consejo de Recursos Minerales no Renovables*, 75, 48 p.

Edwards, D.J., 1955, Studies of some early Tertiary red conglomerates of central Mexico: *United States Geological Survey Professional Paper* 264-H, 153–185.

Escalona-Alcázar, F. J., Solari, L., García-y-Barragán, J. C., Carrillo-Castillo, C., Bluhm-Gutiérrez, J., García-Sandoval, P., Nieto-Samaniego, A. F., Núñez-Peña, E. P., 2016, The Paleocene-early Oligocene Zacatecas conglomerate, Mexico: sedimentology, detrital zircon U–Pb ages, and sandstone provenance: *International Geology Review*, 58 (7), 826-848 p. Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica

Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 84-92.

Ferrari, L., López-Martínez, M., Rosas-Elguera, J., 2002, Ignimbrite flare-up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: Implications for the late subduction history of the Farallon plate: *Tectonics*, 21(4), 17-1.

Ferrari, L., Loza-Aguirre, I., Martínez-Reséndiz E. V., Beltrán-Martínez, B. C., Cadena-Larriva M., Orozco-Esquivel M. T., 2018, Geología del graben de Juchipila (Zac., Jal., AGS.) e implicaciones para su sistema hidrotermal (resumen): *Unión Geofísica Mexicana*, A.C. V.38 No.1 SE01-2.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2012, The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone: *Tectonophysics*, 522, 122-149.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2005, Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378.

Fitz-Díaz, E., Lawton, T. F., Juárez-Arriaga, E., Chávez-Cabello, G., 2018, The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics: *Earth-Science Reviews*, 183, 56-84.

Henry, C. D., Aranda-Gomez, J. J., 2000, Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range: *Tectonophysics*, 318(1-4), 1-26.

Hus, R., Acocella, V., Funiciello, R., De Batist, M., 2005, Sandbox models of relay ramp structure and evolution: *Journal of Structural Geology*, vol. 27, p. 459-473.

Imlay, R. W., 1937, Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, Mexico: *Bulletin of the Geological Society of America*, 48(5), 587-630.

- Iriondo, E., Kunk, M. J., Winick, J. A., & Minerales, C. D. R. (2003).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating studies of minerals and rocks in various areas. In in Mexico: USGS/CRM Scientific Collaboration (Part II): United States Geological Survey, 03-020, 03-020, 79p.
- Kelly, W. A., 1936, Part II. Geology of the mountains bordering the valleys of Acatita and Las Delicias: Bulletin of the Geological Society of America, 47(7), 1009-1038.
- Kerdan, T. P., 1992, Estructura de la corteza y manto superior en el norte de México (a lo largo del Trópico de Cáncer desde Baja California hasta el Golfo de México): México: Universidad Nacional Autónoma de México, Colegio de Ciencias y Humanidades, Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y de Posgrado, Tesis de maestría, 347 p.
- Labarthe-Hemáncz, G., Jiménez-López, L. S., 1991, Cartografía geológica I: 50,000 de las hojas Cerritos de Bernal, Santo Domingo, El Estribo y La Herradura, Estado de San Luis Potosí: Universidad Autónoma San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto técnico 113.
- Labarthe-Hernández, G., Jiménez-López, L.S., 1992, Características físicas y estructura de lavas e ignimbritas riolíticas en la Sierra de San Miguelito S.L.P.: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto Geología, Folleto Técnico No. 114, 31 p.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aranda-Gómez, J.J., 1982, Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 85, 208 p.
- Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Iriondo, A, 2008, Relaciones estratigráfico-estructurales en la intersección del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes y el graben de Aguascalientes, México central: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25(3), 533-548.
- Marrett, R., Allmendinger, R. W., 1990, Kinematic analysis of fault-slip data: Journal of structural geology, 12(8), 973-986.

- Martínez-Reyes, J., 1992, Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato con resumen de la 19 geología de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto 20 de Geología, Cartas Geológicas y Mineras, 8, 1 mapa con resumen de la geología.
- Martínez-Reyes, J. M., Nieto-Samaniego, A. F., 1990, Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 9(1), 33-50.
- Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M. J., Omaña, L., Loza-Aguirre, I., 2016, Los depósitos clásticos pos-Laramide de la Sierra de Guanajuato: Implicaciones de su composición en la evolución tectono-sedimentaria y paleogeográfica: *Estudios Geológicos*, 72(2), 058.
- Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Camprubí, A., 2007, Mesa Central of México: Stratigraphy, structure, and Cenozoic tectonic evolution: *Geological Society of America Special Papers*, 422, 41-70.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Camprubí A., 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 285-318.
- Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Labarthe-Hernández, G., 1997, La deformación cenozoica poslaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14(1), 13-25.
- 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., 2016, 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.
- Nieto-Samaniego, A. F., Ferrari, L., Alaniz-Alvarez, S. A., Labarthe-Hernández, G., Rosas-Elguera, J., 1999, Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 111(3), 347-363.

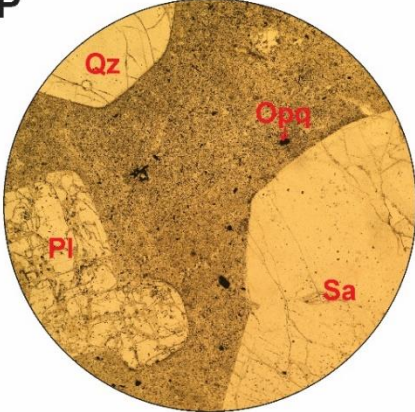
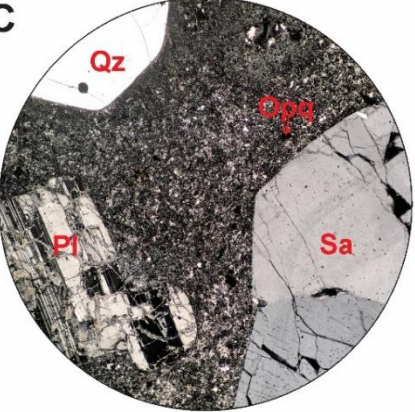
- Nieto-Samaniego, A. F., Macías-Romo, C., Alaniz-Álvarez, S. A., 1996, Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central. México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 13(1), 117-122.
- Nixon, C. W., Sanderson, D. J., Dee, S. J., Bull, J. M., Humphreys, R. J., Swanson, M. H., 2014, Fault interactions and reactivation within a normal-fault network at Milne Point, Alaska: AAPG Bulletin, 98(10), 2081-2107.
- Quintero-Legorreta, O., 1992, Geología de la región de Comanja, estados de Guanajuato y Jalisco: Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, v. 10, 6–25 p.
- Raisz, E., 1959, Landforms of Mexico, scale ca. 1: 3 000 000: Cambridge, Massachusetts, US Office of Naval Research. Geography Branch, 1.
- Ramos-Rosique, A., 2012, Timing and evolution of Late Oligocene to Early Miocene magmatism and epithermal mineralization in the central Bolaños Graben, Southern Sierra Madre Occidental, Mexico: Tesis de Doctorado, UNAM-Kingston University. 287 p
- Solari, L. A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J. P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M., 2010, U-Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical workstation: Achievements in precision and accuracy: Geostandards and Geoanalytical Research, 34(1), 5-18.
- Tristan-Gonzalez, M., Aguillon-Robles, A., Barboza-Gudino, J.R., Torres-Hernandez J.R., Bellon, H., Lopez-Doncel, R., Rodriguez-Rios, R., Labarthe-Hernandez, G., 2009, Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 61(2).
- Tristán-González, M., & Labarthe-Hernández, G. (1979). Cartografía geológica hoja "Tepetate,". San Luis Potosí: Instituto de Geología y Metalurgia: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto Técnico, 66, 31.

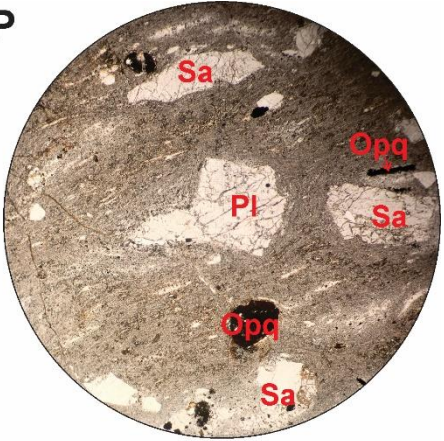
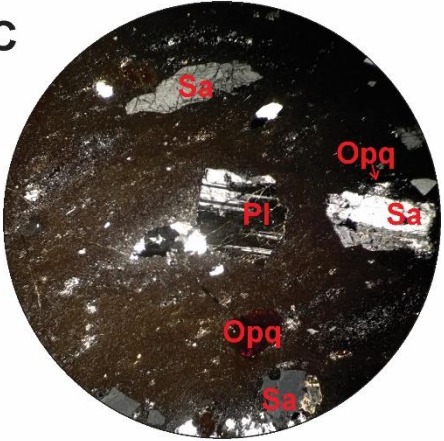
Whitney, D. L., Evans, B. W., 2010, Abbreviations for names of rock-forming minerals: *American mineralogist*, 95(1), 185-187.

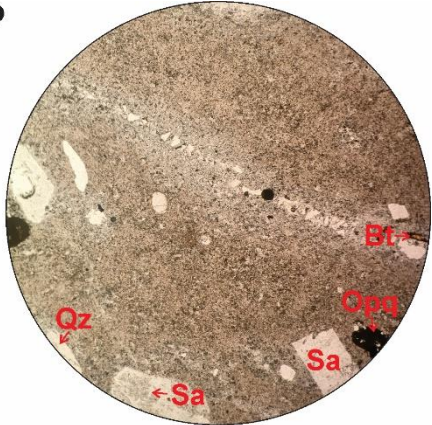
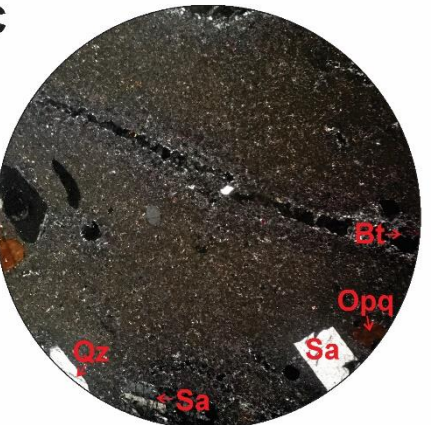
Xu, S., Nieto-Samaniego, Á. F., & Alaniz-Álvarez, S. A., 2004, Tilting mechanisms in domino faults of the Sierra de San Miguelito, central Mexico. *Geologica Acta*, 2(3), 189.

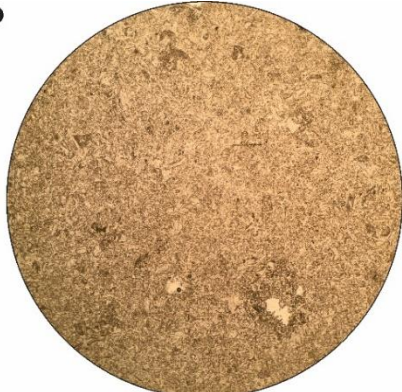
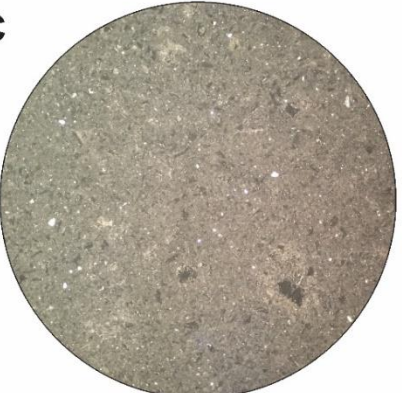

# **ANEXO 1: Petrografía**

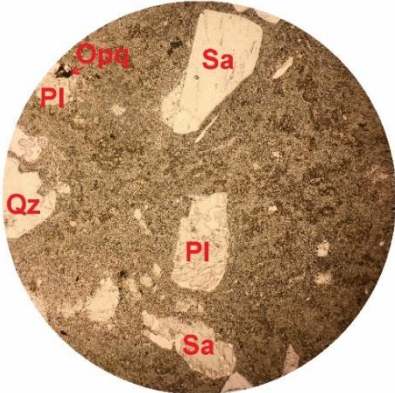
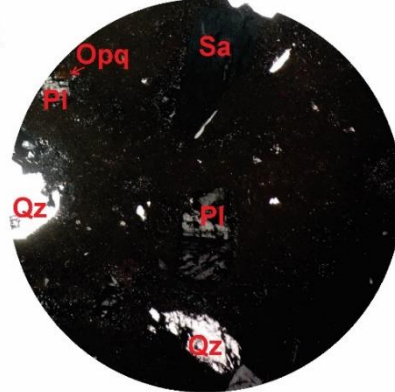



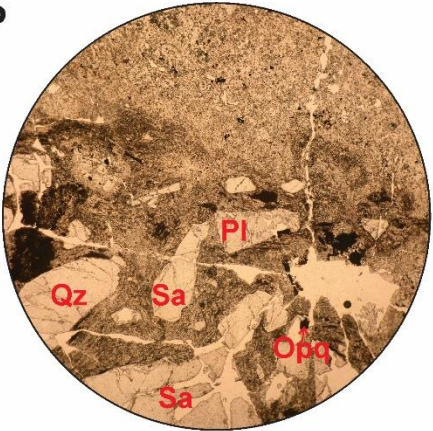
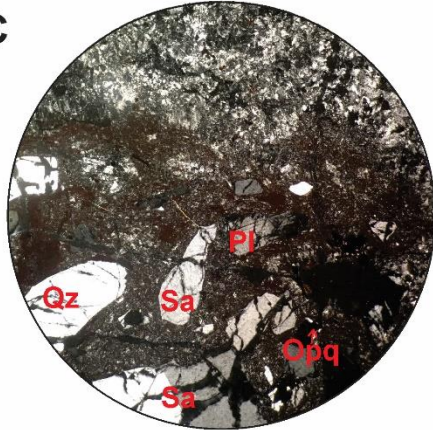

<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-04	<p data-bbox="1570 199 1625 232"><b>NP</b></p>  <p data-bbox="1570 651 1625 683"><b>NC</b></p>  <p data-bbox="1759 1105 1856 1174">1 mm</p>
<b>Unidad:</b> Riolita Chichíndaro	<b>Localización:</b> 21°54'13.45"N; 101°38'23.21"W	
<b>Relaciones de campo:</b> Esta unidad yace bajo la ignimbrita Cuatralba.		
<b>Descripción megascópica:</b> La roca es de color violeta claro, masiva y esta moderadamente alterada (intemperización). Presenta fenocristales de sanidino, cuarzo y ferromagnesianos que se encuentran dentro de una matriz afanítica. La textura es porfídica.		
<b>Descripción petrográfica:</b> La textura general de la muestra es porfídica y granofídica. Los fenocristales representan el 30 % del volumen de la roca, con una asociación mineral de Sa>>Qz>Pl>Opq inmersos en una matriz felsítica. Se observa una textura axiolítica en bandas irregulares, que están compuestas por minerales félsicos de tamaño de grano grueso.		
<b>Mineralogía:</b> Estimación mineralógica (Philpotts, 1989): 30% <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sanidino (10%): Fenocristales de formas euhedrales (tablas), con tamaños que van desde 1 mm hasta 9 mm de longitud. Los cristales presentan macla carlsbad y se encuentra fracturados. Algunos cristales tienen textura poiquilítica, donde las inclusiones son de feldespato y cuarzo.</li> <li>- Cuarzo (7%): Fenocristales anhedrales con tamaños que van desde 1 mm hasta 2.5 mm de longitud. Algunos cristales se encuentran fracturados y tienen pequeñas inclusiones de forma orbicular con tamaños de 0.25 mm, que asemejan a esferulitas.</li> <li>- Plagioclasa (5%): Fenocristales anhedrales a subhedrales con tamaños desde 1 mm hasta 2.5 mm de longitud. Los cristales presentan macla polisintética y están altamente fracturados.</li> <li>- Minerales Opacos (1%): Cristales de forma euhedral que posiblemente se encuentran reemplazando a los cristales de sanidino.</li> <li>- Matriz (77%): La matriz es un agregado felsítico de grano fino.</li> </ul>		
<b>Clasificación:</b> Lava riolítica		

<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-05	<p data-bbox="1549 256 1606 292"><b>NP</b></p>  <p data-bbox="1549 737 1606 773"><b>NC</b></p>  <p data-bbox="1772 1175 1877 1250">1 mm</p>
<b>Unidad:</b> Ignimbrita Cuatralba	<b>Localización:</b> 21°58'46.45"N; 101°36'10.89"W	
<b>Relaciones de campo:</b> Esta unidad yace bajo el piroclástico Las Pilas y sobreyace a la riolita Chichíndaro.		
<b>Descripción megascópica:</b> La roca es masiva, densamente soldada, con pómez colapsadas. Presenta fenocristales de sanidino, cuarzo y ferromagnesianos que se encuentran dentro de una matriz afanítica. La textura es porfídica y eutaxítica.		
<b>Descripción petrográfica:</b> La textura general de la muestra es porfídica, eutaxítica, axiolítica, y con matriz hialocristalina. Los fenocristales representan el 5 % del volumen la roca, con una asociación mineral de Qz>> Sa>Pl>Bt+Opq, inmersos en una matriz hialocristalina compuesta principalmente de vidrio. Se observa una textura eutaxítica representada por pómez colapsadas (fiamme) que tienen formas lenticulares y tamaños que van desde 1mm hasta 5 mm. El grado de soldamiento varía de moderado a alto, esto se observa en el contacto entre los fenocristales y las fiammes, que en algunas ocasiones la fiamme toma la forma del fenocristal. La desvitrificación se observa dentro de la fiamme (textura axiolítica) y en la matriz con la cristalización de fase de vapor por cuarzo policristalino de grano fino. <p data-bbox="197 781 373 816"><b>Mineralogía:</b></p> Estimación mineralógica (Philpotts, 1989): 5% <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cuarzo (10%): Fenocristales anhedrales con tamaños que van desde hasta 1 mm hasta 3 mm de longitud, algunos cristales se encuentran fracturados y tienen pequeñas bahías de reabsorción.</li> <li>- Sanidino (7%): Fenocristales de formas subhedrales a euhedrales con tamaños que van desde 0.5 mm hasta 3 mm de longitud. Algunos cristales presentan macla carlsbad</li> <li>- Plagioclasa (5%): Fenocristales de formas anhedrales con tamaños desde 1 mm hasta 2.4 mm de longitud. Los cristales presentan macla polisintética y están altamente fracturados.</li> <li>- Biotita (1%): Fenocristales de forma subhedral con tamaños que varían entre 0.5 mm y 1 mm. Estos cristales se encuentran reemplazados por minerales opacos.</li> <li>- Minerales Opacos (1%): Cristales de forma anhedral que se encuentran reemplazando a los cristales de biotita.</li> <li>- Matriz (76%): La matriz es hialocristalina compuesta principalmente por material vítreo y en algunos lugares se presentan parches de minerales criptocristalinos félsicos.</li> </ul>		
<b>Clasificación:</b> Ignimbrita riolítica		

<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-15	<p data-bbox="1497 277 1549 310"><b>NP</b></p>  <p data-bbox="1497 740 1549 773"><b>NC</b></p>  <p data-bbox="1713 1198 1812 1268">1 mm</p>
<b>Unidad:</b> Ignimbrita Cuatralba	<b>Localización:</b> 21°47'46.91"N; 101°40'53.96"W	
<b>Relaciones de campo:</b> Esta unidad yace bajo el piroclástico Las Pilas y sobreyace a la ignimbrita Cantera.		
<b>Descripción megascópica:</b> La roca es masiva, densamente soldada, con pómez colapsadas. Presenta fenocristales de sanidino, cuarzo y ferromagnesianos que se encuentran dentro de una matriz afanítica. La textura es porfídica y eutaxítica.		
<p data-bbox="199 493 552 526"><b>Descripción petrográfica:</b></p> <p data-bbox="199 531 1472 760">La textura general de la muestra es porfídica, eutaxítica, axiolítica, y con matriz hialocristalina. Los fenocristales representan el 5 % de la roca, con una asociación mineral de Qz&gt;&gt; Sa&gt;&gt;Bt+Opq, inmersos en una matriz hialocristalina. Se observa una textura eutaxítica representada por pómez colapsadas (fiamme) que tienen formas lenticulares y tamaños que van desde 1mm hasta 7 mm. El grado de soldamiento varía de moderado a alto y la desvitrificación se observa dentro de la fiamme (textura axiolítica) y en la matriz con la cristalización de fase de vapor por cuarzo policristalino de grano fino.</p> <p data-bbox="199 764 373 797"><b>Mineralogía:</b></p> <p data-bbox="199 802 798 834">Estimación mineralógica (Philpotts, 1989): 5%</p> <ul data-bbox="199 839 1472 1219" style="list-style-type: none"> <li>- Cuarzo (15%): Fenocristales de formas anhedrales y subhedrales. Presentan tamaños que van desde hasta 1 mm hasta 2 mm de longitud. Los cristales se encuentran fracturados.</li> <li>- Sanidino (10%): Fenocristales de formas subhedrales a euhedrales. Presentan tamaños que van desde 0.5 mm hasta 2.5 mm de longitud. Los cristales tienen macla Carlsbad.</li> <li>- Biotita (1%): Fenocristales de forma subhedral con tamaños menores a 0.5 mm. Estos cristales se encuentran reemplazados por minerales opacos.</li> <li>- Minerales Opacos (1%): Cristales de forma anhedral que se encuentran reemplazando a los cristales de biotita.</li> <li>- Matriz (72%): La matriz es hialocristalina compuesta principalmente por material vítreo y en algunos lugares se presentan parches de minerales criptocristalinos félsicos.</li> </ul>		
<b>Clasificación:</b> Ignimbrita riolítica		

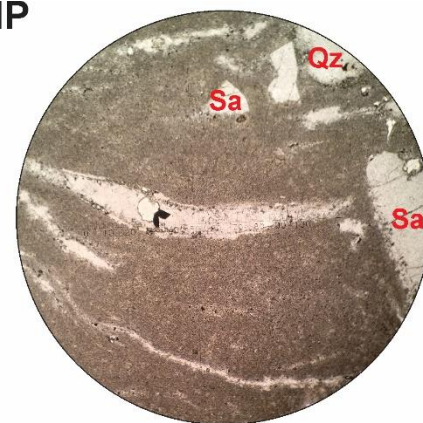
<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-30	<p><b>NP</b></p>  <p><b>NC</b></p>  <p style="text-align: center;">   1 mm </p>
<b>Unidad:</b> Piroclástico Las Pilas	<b>Localización</b> 21°58'43.23"N; 101°36'4.91"W	
<b>Relaciones de campo:</b> El piroclástico Las Pilas sobreyace a la ignimbrita Cuatralba.		
<b>Descripción megascópica:</b> Se observa como una roca de color blanco, poco soldada, muy fina, bien clasificada y constituida principalmente por vidrio volcánico. Se pueden observar algunos minerales de cuarzo y feldespato.		
<p>Los fenocristales representan el 1 % del volumen de la roca, con una asociación mineral de Qz&gt;&gt;Fp, inmersos en una matriz vitroclástica, constituida por fragmentos de pómez, algunos con formas de Y, tabulares o de cúspide.</p>		
<b>Clasificación:</b> Caída de ceniza		

<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-31	<div data-bbox="1520 277 1577 310"><b>NP</b></div>  <div data-bbox="1520 727 1577 760"><b>NC</b></div>  <div data-bbox="1745 1130 1839 1195">   1 mm </div>
<b>Unidad:</b> Ignimbrita Cuatralba	<b>Localización:</b> 21°58'46.36"N; 101°36'10.68"W	
<b>Relaciones de campo:</b> Esta unidad yace bajo el piroclástico Las Pilas.		
<b>Descripción megascópica:</b> La roca es de color café, masiva, densamente soldada, con pómez colapsadas. Presenta fenocristales de sanidino, cuarzo y ferromagnesianos que se encuentran dentro de una matriz afanítica. La textura es porfídica y eutaxítica.		
<b>Descripción petrográfica:</b> La textura general de la muestra es porfídica, eutaxítica, axiolítica, y con matriz hialocristalina. Los fenocristales representan el 5 % de la roca, con una asociación mineral de Qz>> Sa>Pl>Bt+Opq, inmersos en una matriz hialocristalina. Se observa una textura eutaxítica representada por pómez colapsadas (fiamme) que tienen formas lenticulares y tamaños que van desde 1mm hasta 6 mm. El grado de soldamiento varía de moderado a alto y la desvitrificación se observa dentro de la fiamme (textura axiolítica) y en la matriz con la cristalización de fase de vapor por cuarzo policristalino de grano fino. <b>Mineralogía:</b> Estimación mineralógica (Philpotts, 1989): 5% <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cuarzo (10%): Fenocristales anhedrales con tamaños que van desde hasta 1 mm hasta 3 mm de longitud, algunos cristales se encuentran fracturados y tienen pequeñas bahías de reabsorción.</li> <li>- Sanidino (7%): Fenocristales de formas subhedrales a euhedrales con tamaños que van desde 0.5 mm hasta 3 mm de longitud. Algunos cristales presentan macla Carlsbad</li> <li>- Plagioclasa (5%): Fenocristales de formas anhedrales con tamaños desde 1 mm hasta 2.4 mm de longitud. Los cristales presentan macla polisintética y están altamente fracturados.</li> <li>- Biotita (1%): Fenocristales de forma subhedral con tamaños que varían entre 0.5 mm y 1 mm. Estos cristales se encuentran reemplazados por minerales opacos.</li> <li>- Minerales Opacos (1%): Cristales de forma anhedral que se encuentran reemplazando a los cristales de biotita.</li> <li>- Matriz (76%): La matriz es hialocristalina compuesta por material vítreo, en algunos lugares se presentan parches de minerales criptocristalinos.</li> </ul> <b>Clasificación:</b> Ignimbrita riolítica		
<b>Clasificación:</b> Ignimbrita riolítica		

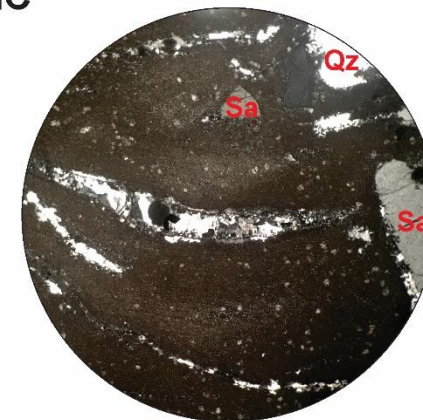
<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-52	<div data-bbox="1545 215 1604 253" style="text-align: right;">NP</div>  <div data-bbox="1545 683 1604 721" style="text-align: right;">NC</div>  <div data-bbox="1759 1117 1856 1192" style="text-align: center;">   1 mm </div>
<b>Unidad:</b> Ignimbrita Rincón de Ortega	<b>Localización:</b> 21°42'24.86"N 101°45'25.67"W	
<b>Relaciones de campo:</b> Esta unidad yace en discordancia angular bajo la ignimbrita Cuatralba		
<b>Descripción megascópica:</b> La roca es de color gris - rojo, masiva, densamente soldada, con pómez colapsadas. Presenta fenocristales de sanidino, cuarzo y ferromagnesianos, que se encuentran dentro de una matriz afanítica oxidada. Se caracteriza por tener líticos volcánicos. La textura es porfídica y eutaxítica.		
<b>Descripción petrográfica:</b> La textura general de la muestra es porfídica, eutaxítica, axiolítica, y con matriz hialocristalina. Los fenocristales representan el 30 % de la roca, con una asociación mineral de Qz>> Sa>Bt>Pl>Opq, inmersos en una matriz hialocristalina y oxidada. Se observa una textura eutaxítica representada por pómez colapsadas (fiamme) que tienen formas lenticulares y tamaños que varían desde 5 mm hasta 10 mm. El grado de soldamiento es alto, esto se observa en el contacto entre los fenocristales y las fiammes, que en algunas ocasiones la fiamme toma la forma del fenocristal. El grado de desvitrificación es alto observándose en las cavidades de la fiamme (textura axiolítica) donde es relleno por cuarzo policristalino de grano fino. <b>Mineralogía:</b> Estimación mineralógica (Philpotts, 1989): 30% <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cuarzo (10%): Fenocristales anhedral a subhedral con tamaños que van desde hasta 0.5 mm hasta 1 mm de longitud. Los cristales se encuentran muy fracturados.</li> <li>- Sanidino (7%): Fenocristales subhedral a euhedral con tamaños que van desde 0.5 mm hasta 3 mm de longitud. Los cristales presentan macla Carlsbad y se presentan en formas de tablas.</li> <li>- Plagioclasa (5%): Fenocristales anhedral a subhedral con tamaños desde 1 mm hasta 2.5 mm de longitud. Los cristales presentan macla polisintética y están altamente fracturados.</li> <li>- Biotita (1%): Fenocristales anhedral a subhedral con tamaños menores a 0.5 mm. Estos cristales se encuentran reemplazados por óxidos.</li> <li>- Minerales Opacos (1%): Cristales de forma anhedral que se encuentran reemplazando a los cristales de biotita.</li> <li>- Matriz (76%): La matriz es hialocristalina compuesta por material vítreo oxidado con parches de minerales criptocristalinos (félsicos). La matriz se observa con alto grado de oxidación.</li> </ul>		
<b>Clasificación:</b> Ignimbrita riolítica		

<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-54
<b>Unidad:</b> Piroclástico Las Pilas	<b>Localización:</b> 21°42'32.87"N; 101°47'5.88"W
<b>Relaciones de campo:</b> Esta unidad sobreyace a la ignimbrita Cuatralba	
<b>Descripción megascópica:</b> La roca es de color café, masiva, densamente soldada, con pómez colapsadas. Presenta fenocristales de sanidino, cuarzo y ferromagnesianos que se encuentran dentro de una matriz afanítica. La textura es porfídica y eutaxítica.	
<p><b>Descripción petrográfica:</b></p> <p>La textura general de la muestra es porfídica, eutaxítica, axiolítica, y con matriz hialocristalina. Los fenocristales representan el 5 % del volumen de la roca, con una asociación mineral de Qz&gt;&gt;Sa&gt;Pl+Opq, inmersos en una matriz hialocristalina. Se observa una textura eutaxítica representada por pómez colapsadas (fiamme) que tienen formas lenticulares y tamaños que van desde 1mm hasta 8 mm. El grado de soldamiento es alto, esto se observa en el contacto entre los fenocristales y las fiammes, en donde la fiamme toma la forma del fenocristal. La desvitrificación se observa dentro de la fiamme (textura axiolítica) y en la matriz, con la cristalización de fase de vapor por cuarzo policristalino de grano medio a grueso.</p> <p><b>Mineralogía:</b> Estimación mineralógica (Philpotts, 1989): 5%</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cuarzo (15%): Fenocristales de formas anhedrales y subhedrales. Presentan tamaños que van desde 0.5 mm hasta 3 mm de longitud, algunos cristales se encuentran fracturados.</li> <li>- Sanidino (7%): Fenocristales de formas subhedrales a euhedrales. Presentan tamaños que van desde 1 mm hasta 2.5 mm de longitud. Algunos cristales presentan macla carlsbad</li> <li>-Plagioclasa (1%): Fenocristales de formas anhedrales con tamaños menores a 0.5 mm de longitud. Los cristales presentan están fracturados</li> <li>- Minerales Opacos (5%): Fenocristales de forma subhedral a euhedral. Presentan tamaños que van desde 1 mm hasta 2 mm. Algunos cristales aparecen como pseudomorfos que posiblemente se encuentran reemplazando a cristales de biotita y sanidinos.</li> <li>- Matriz (73%): La matriz es hialocristalina compuesta principalmente por material vítreo y en algunos lugares se presentan parches de minerales criptocristalinos félsicos.</li> </ul>	
<b>Clasificación:</b> Ignimbrita riolítica	

NP



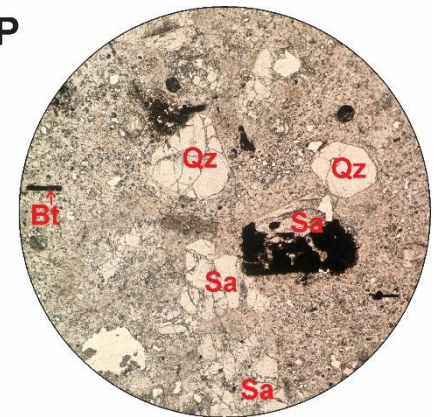
NC



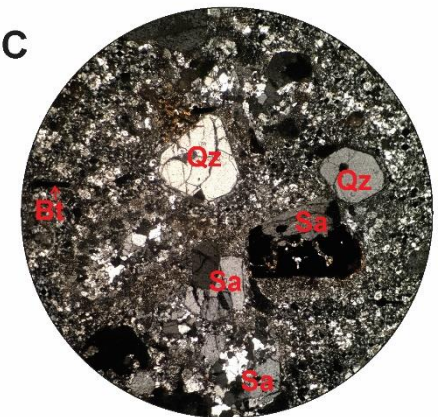
1 mm

<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-56
<b>Unidad:</b> Riolita El Gallo	<b>Localización:</b> 21°54'32.99"N; 101°23'39.37"W
<b>Relaciones de campo:</b> La riolita El Gallo se encuentra en forma de domo y yace bajo el piroclástico Las Pilas.	
<b>Descripción megascópica:</b> Macroscópicamente se observa como una roca con color morado claro, masiva, con textura porfídica y presencia de cristales de cuarzo, feldespato y biotita.	
<p><b>Descripción petrográfica:</b> La textura general de la muestra es porfídica y granofídica. Los fenocristales representan el 30 % del volumen de la roca, con una asociación mineral de Sa&gt;&gt;Qz&gt;Bt&gt;Pl+Opq, inmersos en una matriz felsítica.</p> <p><b>Mineralogía:</b> Estimación mineralógica (Philpotts, 1989): 30%</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sanidino (15%): Fenocristales de formas euhedrales (tablas), con tamaños que van desde 0.5 mm hasta 3 mm de longitud. Los cristales presentan macla carlsbad y se encuentra fracturados. Algunos cristales se encuentran reemplazados por minerales opacos.</li> <li>- Cuarzo (7%): Fenocristales anhedrales con tamaños que van desde hasta 0.5 mm hasta 1.5 mm de longitud. Algunos cristales se encuentran fracturados y tienen pequeñas inclusiones de forma orbicular con tamaños de 0.25 mm.</li> <li>- Biotita (3%): Fenocristales de forma subhedral con tamaños menores a 0.6 mm de longitud. Estos cristales se encuentran reemplazados por minerales opacos</li> <li>- Plagioclasa (1%): Fenocristales anhedrales con tamaños menores a 1 mm de longitud. Los cristales presentan macla polisintética y están altamente fracturados.</li> <li>- Minerales Opacos (1%): Cristales de forma subhedral y euhedral que posiblemente se encuentran reemplazando a los cristales de biotita y sanidinos.</li> <li>- Matriz (77%): La matriz es un agregado felsítico de grano medio.</li> </ul>	
<b>Clasificación:</b> Lava de composición riolítica	

NP



NC

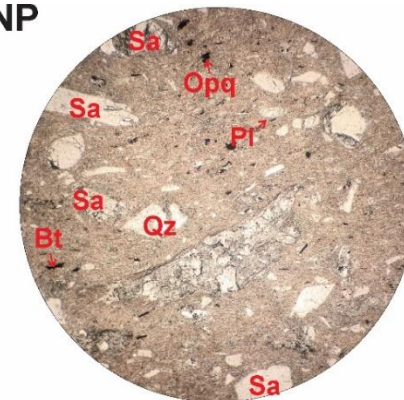


1 mm

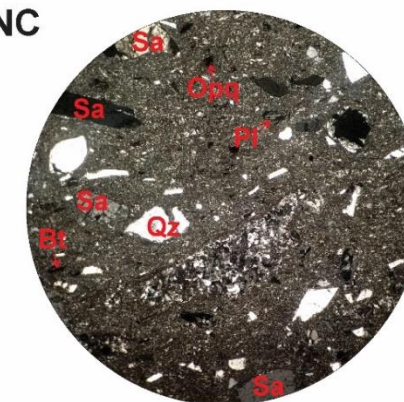


<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-62
<b>Unidad:</b> Ignimbrita Cantera	<b>Localización:</b> 22° 1'4.62"N; 101°25'48.12"W
<b>Relaciones de campo:</b> La Ignimbrita sobreyace a rocas cretácicas.	
<b>Descripción megascópica:</b> La roca es de color morado claro, masiva, densamente soldada, pómez colapsadas de poca longitud (<3mm) . Presenta fenocristales de sanidino, cuarzo, ferromagnesianos que se encuentran dentro de una matriz afanítica. La textura es porfídica y eutaxítica.	
<b>Descripción petrográfica</b> La textura general de la muestra es porfídica, eutaxítica, axiolítica, y con una matriz hialocristalina. Los fenocristales representan el 30 % del volumen de la roca, con una asociación mineral de Sa>>Qz>Bt>Opq inmersos en una matriz hialocristalina. Se observa una textura eutaxítica representada por pómez colapsadas (fiamme) con tamaños que varían desde 0.5 mm hasta 1.5 mm de longitud. El grado de soldamiento es bajo y la desvitrificación es alta dentro de la fiamme (textura axiolítica).	
<b>Mineralogía:</b> Estimación mineralógica (Philpotts, 1989): 30% <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sanidino (7%): Fenocristales de formas subhedralas a euhedrales con tamaños que van desde 0.5 mm hasta 1 mm de longitud. Los cristales presentan macla carlsbad</li> <li>- Cuarzo (10%): Fenocristales anhedralas con tamaños que van desde hasta 1 mm hasta 3 mm de longitud, algunos cristales se encuentran fracturados y tienen pequeñas bahías de reabsorción.</li> <li>- Biotita (1%): Fenocristales de forma subhedral con tamaños que varían entre 0.5 mm y 1 mm. Estos cristales se encuentran reemplazados por minerales opacos.</li> <li>- Minerales Opacos (1%): Cristales de forma anhedral que se encuentran reemplazando a los cristales de biotita.</li> <li>- Matriz (76%): La matriz es hialocristalina compuesta por material vítreo presentan parches de minerales criptocristalinos.</li> </ul>	
<b>Clasificación:</b> Ignimbrita riolítica	

NP



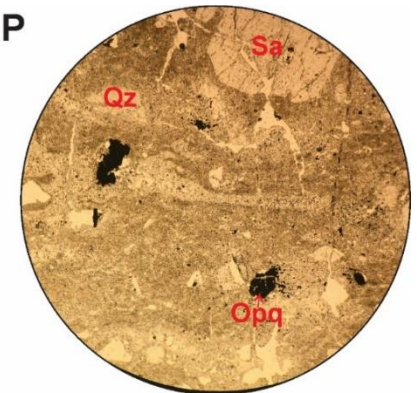
NC



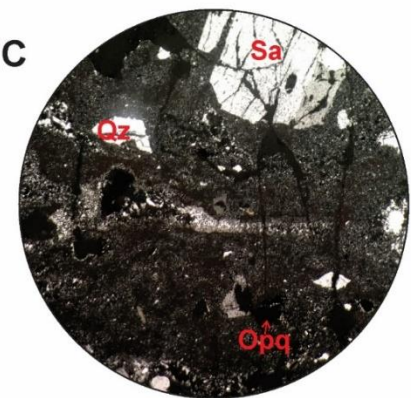
1 mm

<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-64
<b>Unidad:</b> Ignimbrita Cantera	<b>Localización:</b> 21°51'9.91"N; 101°38'44.76"W
<b>Relaciones de campo:</b> La ignimbrita Cantera sobreyace a rocas cretácicas y yace bajo la ignimbrita Cuatralba.	
<b>Descripción megascópica:</b> La roca es de color morado claro, masiva, densamente soldada, con pómez colapsadas. Presenta fenocristales de sanidino, cuarzo, ferromagnesianos, y fragmentos líticos volcánicos que se encuentran dentro de una matriz afanítica. La textura es porfídica y eutaxítica.	
<b>Descripción petrográfica</b> La textura general de la muestra es porfídica, eutaxítica, axiolítica, y con una matriz hialocristalina. Los fenocristales representan el 30 % del volumen de la roca, con una asociación mineral de Sa>>Qz>Bt>Opq inmersos en una matriz hialocristalina. Se observa una textura eutaxítica representada por varias pómez colapsadas (fiamme) con tamaños que varían desde 0.5 mm hasta 10 mm y tienen formas lenticulares que siguen una orientación preferencial. El grado de soldamiento es alto, esto se observa en el contacto entre los fenocristales y las fiammes, donde la fiamme toma la forma del fenocristal. La desvitrificación es alta y se observa dentro de la fiamme (textura axiolítica) y en la matriz con la cristalización de cuarzo policristalino de grano fino. <b>Mineralogía:</b> Estimación mineralógica (Philpotts, 1989): 30%  - Sanidino (7%): Fenocristales de formas subhedrales a euhedrales con tamaños que van desde 0.5 mm hasta 3 mm de longitud. Los cristales presentan macla Carlsbad - Cuarzo (10%): Fenocristales anhedrales con tamaños que van desde hasta 1 mm hasta 3 mm de longitud, algunos cristales se encuentran fracturados y tienen pequeñas bahías de reabsorción. - Biotita (1%): Fenocristales de forma subhedral con tamaños que varían entre 0.5 mm y 1 mm. Estos cristales se encuentran reemplazados por minerales opacos. - Minerales Opacos (1%): Cristales de forma anhedral que se encuentran reemplazando a los cristales de biotita. - Matriz (76%): La matriz es hialocristalina compuesta por material vítreo presentan parches de minerales criptocristalinos	
<b>Clasificación:</b> Ignimbrita riolítica soldada.	

NP



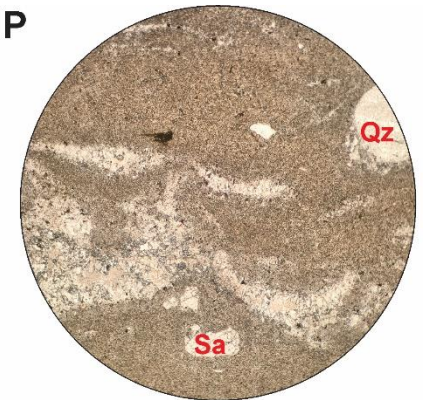
NC



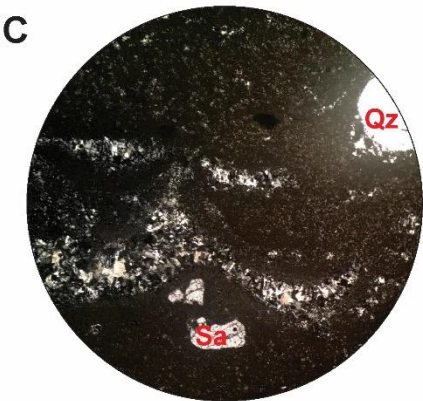
1 mm

<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-65
<b>Unidad:</b> Piroclástico Las Pilas	<b>Localización:</b> 21°51'14.62"N; 101°49'55.12"W
<b>Relaciones de campo:</b>	
<b>Descripción megascópica:</b> La roca es masiva, densamente soldada, con pómez colapsadas. Presenta fenocristales de sanidino, cuarzo y ferromagnesianos que se encuentran dentro de una matriz afanítica. La textura es porfídica y eutaxítica.	
<b>Descripción petrográfica:</b> La textura general de la muestra es porfídica, eutaxítica, axiolítica, y con matriz hialocristalina. Los fenocristales representan el 5 % del volumen de la roca, con una asociación mineral de Qz>>Sa >Opq, inmersos en una matriz hialocristalina. Se observa una textura eutaxítica representada por pómez colapsadas (fiamme) que tienen formas lenticulares y tamaños que van desde 1mm hasta 8 mm. El grado de soldamiento varía de moderado a alto. La desvitrificación se observa dentro de la fiamme (textura axiolítica) y en la matriz, con la cristalización de fase de vapor por cuarzo policristalino de grano fino.	
<b>Mineralogía:</b> Estimación mineralógica (Philpotts, 1989): 5% - Cuarzo (15%): Fenocristales de formas anhedralas y subhedralas. Presentan tamaños que van desde 0.5 mm hasta 3 mm de longitud, algunos cristales se encuentran fracturados. - Sanidino (7%): Fenocristales de formas subhedralas a euhedralas. Presentan tamaños que van desde 1 mm hasta 2.5 mm de longitud. Algunos cristales presentan macla carlsbad - Minerales Opacos (5%): Fenocristales de forma subhedral a euhedral. Presentan tamaños que van desde 2mm hasta 1 mm. Algunos cristales aparecen como pseudomorfos, que posiblemente se encuentran reemplazando a cristales de biotita. - Matriz (73%): La matriz es hialocristalina compuesta por material vítreo y en algunos lugares se presentan parches de minerales criptocristalinos félsicos.	
<b>Clasificación:</b> Ignimbrita riolítica	

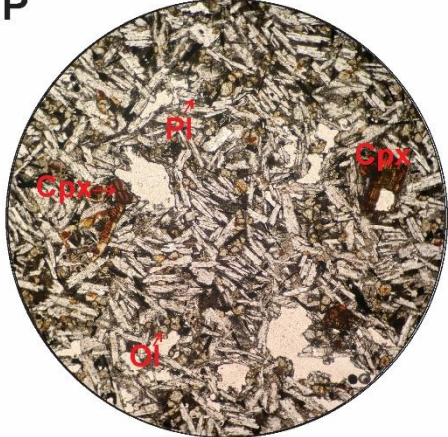
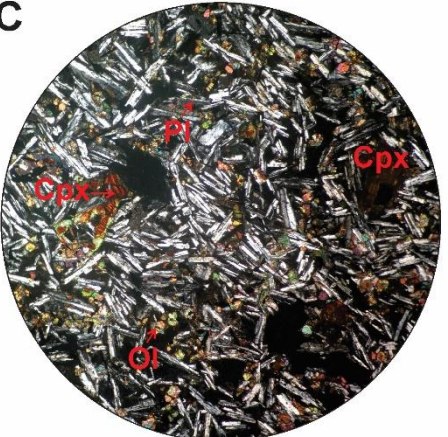

NP



NC



1 mm

<b>Proyecto:</b> Geología del semigraben de Matancillas	<b>Muestra:</b> GM-148	<p data-bbox="1556 196 1612 232"><b>NP</b></p>  <p data-bbox="1549 678 1612 714"><b>NC</b></p>  <p data-bbox="1766 1154 1871 1230">   1 mm </p>
<b>Unidad:</b> Basalto Cabras	<b>Localización:</b> 21°53'29.80"N; 101°36'7.18"W	
<b>Relaciones de campo:</b> Esta unidad sobreyace a la Ignimbrita Cuatralba, y yace bajo el Piroclástico Las Pilas		
<b>Descripción megascópica:</b> La roca es de color negro, alterado y presenta algunas vesículas. Textura afanítica.		
<p data-bbox="197 435 554 467"><b>Descripción petrográfica:</b></p> <p data-bbox="197 475 1482 581">La textura general de la muestra es porfídica y pilotaxítica seriada. Los fenocristales representan el 50% del volumen de la roca, con una asociación mineral de Pl&gt;&gt;Ol&gt;Cpx inmersos en una matriz pilotaxítica seriada.</p> <p data-bbox="197 630 373 662"><b>Mineralogía:</b></p> <p data-bbox="197 670 814 703">Estimación mineralógica (Philpotts, 1989): 50%</p> <ul data-bbox="197 743 1524 971" style="list-style-type: none"> <li>- Plagioclasa (%): Fenocristales subhedrales con tamaños desde 0.5 mm hasta 1 mm de longitud. Los cristales presentan macla polisintética. Las plagioclases hacen parte de la matriz del basalto.</li> <li>- Olivino (%): Fenocristales anhedrales con tamaños de 0.25 mm. Presenta colores de birrefringencia de tercer orden y hacen parte de la matriz del basalto.</li> <li>- Clinopiroxenos (%): Fenocristales anhedrales a subhedrales con tamaños de 0.2 a 0.7 mm. Presentan clivaje y extinción oblicua.</li> </ul>		
<b>Clasificación:</b> Basalto		

## **ANEXO 2: Datos isotópicos U-Pb**

**Tabla A1.** Datos U-Pb en circón con método LA-ICPMS de la muestra GM-15 de la ignimbrita Cuatralba. Coordenadas WGS84: 21°47'46.91"N; 101°40'53.96"O

Punto análisis				RELACIONES CORREGIDAS									EIDADES CORREGIDAS								
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ	Best age (Ma)	±2σ	Disc %
GM-15_2	271	169.1	0.62	0.1050	0.0120	0.0657	0.0078	0.0045	0.0002	0.0027	0.0003	0.14	29.0	1.5	65.7	7.7	1630.0	230.0	29.0	1.5	55.9
GM-15_10	881	354	0.40	0.0774	0.0068	0.0510	0.0044	0.0046	0.0002	0.0023	0.0002	0.22	29.3	1.0	50.5	4.2	1140.0	160.0	29.3	1.0	42.0
GM-15_5	560	261	0.47	0.0596	0.0096	0.0360	0.0055	0.0046	0.0002	0.0019	0.0002	0.04	29.4	1.4	35.8	5.3	510.0	320.0	29.4	1.4	17.9
GM-15_19	115.9	68	0.59	0.1560	0.0290	0.1110	0.0190	0.0049	0.0005	0.0039	0.0010	0.12	31.5	3.3	106.0	17.0	2370.0	380.0	31.5	3.3	70.3
GM-15_9	297.2	131.9	0.44	0.1120	0.0120	0.0741	0.0081	0.0049	0.0002	0.0036	0.0004	0.15	31.5	1.5	72.4	7.6	1770.0	200.0	31.5	1.5	56.5
GM-15_4	227.8	116.1	0.51	0.1730	0.0200	0.1170	0.0140	0.0050	0.0003	0.0047	0.0005	0.29	31.9	2.1	114.0	13.0	2570.0	230.0	31.9	2.1	72.0
GM-15_17	129.3	56.4	0.44	0.1850	0.0300	0.1270	0.0180	0.0051	0.0004	0.0063	0.0008	0.02	32.8	2.6	120.0	16.0	2630.0	280.0	32.8	2.6	72.7
GM-15_18	76.4	44.4	0.58	0.1440	0.0300	0.1030	0.0180	0.0052	0.0005	0.0040	0.0006	0.10	33.1	3.3	98.0	17.0	2190.0	370.0	33.1	3.3	66.2
GM-15_15	70.3	42.6	0.61	0.1350	0.0360	0.0910	0.0170	0.0052	0.0006	0.0037	0.0007	-0.27	33.2	3.8	88.0	16.0	1980.0	490.0	33.2	3.8	62.3
GM-15_3	109.7	67.1	0.61	0.1710	0.0240	0.1210	0.0140	0.0052	0.0003	0.0040	0.0005	-0.12	33.6	2.1	115.0	13.0	2520.0	270.0	33.6	2.1	70.8
GM-15_7	56.5	33.8	0.60	0.2090	0.0430	0.1560	0.0250	0.0053	0.0006	0.0051	0.0011	0.17	33.7	3.8	145.0	21.0	2810.0	360.0	33.7	3.8	76.8
GM-15_14	134.7	67.4	0.50	0.2310	0.0460	0.1660	0.0340	0.0053	0.0005	0.0060	0.0011	0.14	34.0	3.3	154.0	29.0	2930.0	370.0	34.0	3.3	77.9
GM-15_1	207	79.2	0.38	0.1470	0.0180	0.1060	0.0110	0.0054	0.0003	0.0056	0.0005	0.01	35.0	1.8	104.4	9.4	2360.0	200.0	35.0	1.8	66.5
GM-15_11	102.9	59.3	0.58	0.1980	0.0330	0.1430	0.0210	0.0055	0.0004	0.0052	0.0005	0.01	35.1	2.8	134.0	18.0	2690.0	280.0	35.1	2.8	73.8
GM-15_16	108.6	47.1	0.43	0.3010	0.0390	0.2440	0.0270	0.0058	0.0004	0.0102	0.0013	-0.08	37.1	2.6	227.0	22.0	3400.0	220.0	37.1	2.6	83.7
GM-15_8	123	77	0.63	0.1960	0.0290	0.1490	0.0170	0.0060	0.0005	0.0061	0.0008	0.49	38.6	3.3	141.0	15.0	2810.0	240.0	38.6	3.3	72.6
GM-15_13	64	26.13	0.41	0.2720	0.0510	0.2170	0.0300	0.0062	0.0006	0.0105	0.0014	-0.32	39.8	3.7	197.0	26.0	3190.0	360.0	39.8	3.7	79.8
GM-15_6	38.03	23.06	0.61	0.3420	0.0690	0.2770	0.0370	0.0066	0.0007	0.0098	0.0014	-0.17	42.3	4.7	254.0	31.0	3510.0	310.0	42.3	4.7	83.3
GM-15	46.3	27.2	0.59	0.3170	0.0550	0.2830	0.0400	0.0074	0.0007	0.0106	0.0014	0.32	47.6	4.6	249.0	32.0	3470.0	290.0	47.6	4.6	80.9
GM15_23m	59.1	23.16	0.39	0.0770	0.0340	0.0440	0.0170	0.0044	0.0005	0.0023	0.0007	-0.02	28.1	3.0	42.0	16.0	300.0	790.0	28.1	3.0	33.1
GM15_23m_2	246	98	0.40	0.1100	0.0150	0.0790	0.0110	0.0051	0.0003	0.0037	0.0005	0.06	32.6	1.6	76.0	10.0	1790.0	250.0	32.6	1.6	57.1
GM15_23m_3	276	135.9	0.49	0.0493	0.0095	0.0307	0.0059	0.0044	0.0002	0.0015	0.0002	-0.02	28.0	1.3	30.5	5.8	180.0	360.0	28.0	1.3	8.2
GM15_23m_4	79.4	43.9	0.55	0.0620	0.0190	0.0370	0.0120	0.0050	0.0003	0.0023	0.0004	0.08	32.4	2.1	37.0	11.0	260.0	560.0	32.4	2.1	12.4
GM15_23m_5	89.7	39.4	0.44	0.1290	0.0330	0.0820	0.0210	0.0052	0.0004	0.0037	0.0010	0.38	33.4	2.7	79.0	19.0	1800.0	470.0	33.4	2.7	57.7
GM15_23m_6	99.6	40.5	0.41	0.0530	0.0180	0.0340	0.0120	0.0049	0.0003	0.0020	0.0004	-0.05	31.2	2.0	33.0	12.0	-130.0	580.0	31.2	2.0	5.5
GM15_23m_7	85.9	41.8	0.49	0.0480	0.0200	0.0300	0.0110	0.0048	0.0004	0.0012	0.0004	-0.14	30.8	2.7	29.0	11.0	-250.0	660.0	30.8	2.7	-6.2

GM15_23m_8	2586	1817	0.70	0.0541	0.0050	0.0365	0.0035	0.0049	0.0001	0.0018	0.0001	0.11	31.3	0.6	36.3	3.5	390.0	210.0	31.3	0.6	13.8
GM15_23m_9	63.7	23.89	0.38	0.1390	0.0310	0.0940	0.0160	0.0054	0.0005	0.0040	0.0009	0.03	34.7	2.9	90.0	15.0	1860.0	420.0	34.7	2.9	61.4
GM15_32m_1	113.8	57	0.50	0.0610	0.0170	0.0337	0.0088	0.0044	0.0003	0.0017	0.0003	0.06	28.5	1.7	33.4	8.6	320.0	550.0	28.5	1.7	14.7
GM15_32m_2	411	252.6	0.61	0.0514	0.0060	0.0300	0.0032	0.0042	0.0002	0.0016	0.0001	-0.02	27.2	1.0	30.0	3.1	260.0	260.0	27.2	1.0	9.2
GM15_32m_3	1421	747	0.53	0.0478	0.0021	0.0282	0.0011	0.0043	0.0001	0.0014	0.0001	-0.22	27.6	0.4	28.2	1.1	83.0	93.0	27.6	0.4	2.2
GM15_32m_4	48.65	24.72	0.51	0.2310	0.0410	0.1710	0.0300	0.0059	0.0005	0.0075	0.0011	0.17	38.1	3.0	158.0	26.0	2960.0	340.0	38.1	3.0	75.9
GM15_32m_5	896.1	465.6	0.52	0.0495	0.0026	0.0317	0.0016	0.0045	0.0001	0.0014	0.0001	-0.11	28.7	0.7	31.7	1.5	180.0	120.0	28.7	0.7	9.4
GM15_32m_6	922	487.8	0.53	0.0744	0.0070	0.0465	0.0047	0.0044	0.0001	0.0019	0.0001	0.39	28.6	0.7	46.1	4.6	990.0	190.0	28.6	0.7	38.0
GM15_32m_7	295.5	193.1	0.65	0.0587	0.0072	0.0341	0.0042	0.0043	0.0002	0.0016	0.0001	0.09	27.9	1.0	34.0	4.1	470.0	250.0	27.9	1.0	18.1
GM15_32m_9	79.6	44.4	0.56	0.0510	0.0140	0.0335	0.0085	0.0046	0.0003	0.0016	0.0003	0.14	29.8	1.7	33.0	8.4	180.0	460.0	29.8	1.7	9.7

**Tabla A2.** Datos U-Pb en circón con método LA-ICPMS de la muestra GM-24 de la Riolita Chichíndaro. Coordenadas WGS84: 21°54'1.32"N; 101°37'51.75"O

Punto análisis				RELACIONES CORREGIDAS									EDADES CORREGIDAS								
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ	Best age (Ma)	±2σ	Disc %
GM-24_3	218.3	113.7	0.52	0.0900	0.0140	0.0594	0.0097	0.0045	0.0003	0.0026	0.0003	0.21	28.7	1.8	58.3	9.3	1460.0	320.0	28.7	1.8	50.8
GM-24	652	289	0.44	0.0532	0.0059	0.0338	0.0041	0.0045	0.0002	0.0016	0.0002	0.24	29.1	1.5	33.7	4.0	340.0	250.0	29.1	1.5	13.6
GM-24_18	1960	711	0.36	0.0472	0.0038	0.0301	0.0025	0.0046	0.0001	0.0016	0.0002	0.28	29.3	0.6	30.1	2.5	100.0	180.0	29.3	0.6	2.5
GM-24_12	829	420	0.51	0.0708	0.0073	0.0460	0.0041	0.0047	0.0002	0.0020	0.0002	-0.06	29.9	1.0	45.6	3.9	1000.0	210.0	29.9	1.0	34.4
GM-24_13	1079	482.6	0.45	0.0507	0.0047	0.0321	0.0028	0.0047	0.0001	0.0016	0.0001	0.01	30.1	0.8	32.1	2.7	230.0	190.0	30.1	0.8	6.2
GM-24_7	774	535	0.69	0.0565	0.0065	0.0372	0.0041	0.0047	0.0002	0.0018	0.0001	0.11	30.5	1.0	37.0	4.1	440.0	250.0	30.5	1.0	17.6
GM-24_11	300	165.3	0.55	0.0850	0.0120	0.0573	0.0063	0.0048	0.0003	0.0022	0.0003	-0.23	30.8	1.6	56.4	6.1	1320.0	260.0	30.8	1.6	45.4
GM-24_19	1584	439	0.28	0.0584	0.0065	0.0384	0.0039	0.0048	0.0001	0.0020	0.0002	-0.19	31.1	0.8	38.2	3.8	540.0	260.0	31.1	0.8	18.7
GM-24_6	209	163	0.78	0.1100	0.0150	0.0714	0.0096	0.0049	0.0004	0.0021	0.0003	0.23	31.2	2.3	69.6	9.1	1820.0	220.0	31.2	2.3	55.2
GM-24_9	376	198.9	0.53	0.0699	0.0068	0.0479	0.0035	0.0048	0.0002	0.0022	0.0003	0.01	31.2	1.4	47.5	3.4	940.0	210.0	31.2	1.4	34.3
GM-24_1	135.9	98.8	0.73	0.1300	0.0260	0.0810	0.0150	0.0050	0.0004	0.0027	0.0004	0.06	32.0	2.3	78.0	14.0	1840.0	400.0	32.0	2.3	59.0
GM-24_14	230	391	1.70	0.1030	0.0140	0.0715	0.0093	0.0050	0.0002	0.0020	0.0002	0.19	32.2	1.3	69.7	8.8	1680.0	260.0	32.2	1.3	53.8
GM-24_2	173.6	97.1	0.56	0.1470	0.0280	0.0960	0.0170	0.0050	0.0004	0.0040	0.0004	0.16	32.2	2.4	92.0	15.0	2210.0	370.0	32.2	2.4	65.0
GM-24_8	219	117.2	0.54	0.1080	0.0120	0.0757	0.0081	0.0050	0.0003	0.0030	0.0003	0.10	32.4	1.6	73.8	7.7	1780.0	230.0	32.4	1.6	56.1
GM-24_5	119.7	56.6	0.47	0.1170	0.0160	0.0830	0.0110	0.0053	0.0003	0.0048	0.0007	0.20	34.0	2.0	80.0	10.0	1830.0	300.0	34.0	2.0	57.5
GM-24_10	314	186	0.59	0.0930	0.0160	0.0663	0.0097	0.0054	0.0003	0.0026	0.0003	-0.22	34.4	1.8	64.9	9.2	1390.0	330.0	34.4	1.8	47.0
GM-24_17	183	63.4	0.35	0.1190	0.0140	0.0885	0.0098	0.0054	0.0003	0.0047	0.0005	0.01	34.6	1.8	85.6	9.0	1960.0	200.0	34.6	1.8	59.6
GM-24_15	91.5	66	0.72	0.1840	0.0300	0.1280	0.0170	0.0054	0.0005	0.0036	0.0005	-0.22	34.8	3.2	122.0	15.0	2570.0	310.0	34.8	3.2	71.5
GM-24_4	105.1	64.7	0.62	0.1560	0.0240	0.1160	0.0150	0.0056	0.0003	0.0035	0.0004	-0.15	36.1	1.9	110.0	13.0	2300.0	260.0	36.1	1.9	67.2
GM24_23m	194.6	102	0.52	0.1690	0.0210	0.1180	0.0110	0.0056	0.0003	0.0052	0.0005	0.11	36.1	1.9	119.0	12.0	2450.0	220.0	36.1	1.9	69.7
GM24_23m_1	223	171.3	0.77	0.0533	0.0089	0.0353	0.0063	0.0049	0.0003	0.0014	0.0002	0.44	31.2	1.8	35.1	6.1	340.0	320.0	31.2	1.8	11.1
GM24_23m_2	87.8	43.9	0.50	0.1610	0.0300	0.1140	0.0200	0.0053	0.0003	0.0042	0.0007	-0.20	34.0	1.9	107.0	18.0	2250.0	380.0	34.0	1.9	68.2
GM24_23m_3	11720	13960	1.19	0.0478	0.0012	0.0322	0.0008	0.0049	0.0001	0.0015	0.0000	0.12	31.5	0.4	32.2	0.8	86.0	54.0	31.5	0.4	2.1
GM24_23m_4	722	380.3	0.53	0.0515	0.0044	0.0332	0.0027	0.0046	0.0001	0.0014	0.0001	0.18	29.8	0.8	33.5	2.7	250.0	180.0	29.8	0.8	11.1
GM24_23m_5	2740	575	0.21	0.0525	0.0021	0.0361	0.0017	0.0050	0.0001	0.0019	0.0001	-0.01	32.2	0.5	36.0	1.6	285.0	88.0	32.2	0.5	10.7



GM24_23m_6	601	278.4	0.46	0.0571	0.0065	0.0380	0.0039	0.0048	0.0002	0.0018	0.0001	- 0.22	30.5	1.0	37.8	3.8	500.0	240.0	30.5	1.0	19.3
GM24_23m_7	3600	1880	0.52	0.0574	0.0028	0.0356	0.0019	0.0045	0.0001	0.0016	0.0001	0.44	29.2	0.5	35.5	1.8	490.0	110.0	29.2	0.5	17.8
GM24_23m_8	354.2	225.1	0.64	0.0840	0.0130	0.0547	0.0079	0.0049	0.0002	0.0019	0.0002	- 0.15	31.4	1.4	53.8	7.6	1020.0	320.0	31.4	1.4	41.6
GM24_32m	2444	965	0.39	0.0591	0.0020	0.0378	0.0014	0.0046	0.0001	0.0018	0.0001	0.30	29.4	0.5	37.6	1.4	570.0	77.0	29.4	0.5	21.7
GM24_32m_1	205.6	125.3	0.61	0.0520	0.0110	0.0334	0.0077	0.0046	0.0002	0.0020	0.0002	0.23	29.7	1.4	33.3	7.6	270.0	470.0	29.7	1.4	10.8
GM24_32m_10	243.1	162.1	0.67	0.1122	0.0092	0.0783	0.0057	0.0050	0.0002	0.0025	0.0002	- 0.16	32.2	1.0	76.4	5.3	1840.0	160.0	32.2	1.0	57.9
GM24_32m_2	862	419.5	0.49	0.0542	0.0039	0.0354	0.0023	0.0047	0.0001	0.0017	0.0001	- 0.15	30.2	0.6	35.3	2.2	360.0	160.0	30.2	0.6	14.4
GM24_32m_3	417	230.3	0.55	0.0496	0.0054	0.0314	0.0034	0.0046	0.0001	0.0016	0.0001	- 0.16	29.4	0.9	31.3	3.3	180.0	220.0	29.4	0.9	6.1
GM24_32m_4	81	24.1	0.30	0.0460	0.0170	0.0310	0.0120	0.0044	0.0004	0.0019	0.0004	0.25	28.0	2.5	30.0	12.0	60.0	630.0	28.0	2.5	6.7
GM24_32m_5	11820	6690	0.57	0.0532	0.0011	0.0340	0.0008	0.0046	0.0001	0.0013	0.0000	0.10	29.8	0.4	34.0	0.7	334.0	48.0	29.8	0.4	12.2
GM24_32m_6	493.8	308.6	0.62	0.0621	0.0048	0.0379	0.0033	0.0046	0.0001	0.0018	0.0001	0.31	29.5	0.8	37.7	3.3	590.0	170.0	29.5	0.8	21.8
GM24_32m_7	5860	4710	0.8	0.055	0.004	0.0337	0.002	0.005	5E-05	0.0015	2E-05	- 0.19	29.27	0.3	33.7	2.1	390	140	29.3	0.3	13.145
GM24_32m_8	1724	618.6	0.36	0.0498	0.003	0.0318	0.002	0.005	1E-04	0.00171	1E-04	0.29	30.76	0.6	31.8	2.1	170	120	30.8	0.6	3.2704
GM24_32m_9	2500	1588	0.64	0.0469	0.004	0.0295	0.002	0.005	8E-05	0.00154	5E-05	0.14	29.24	0.5	29.5	2.2	40	160	29.2	0.5	0.8814

**Tabla A3.** Datos U-Pb en circón con método LA-ICPMS de la muestra GM-52 de la ignimbrita Rincón de Ortega. Coordenadas WGS84: 21°42'24.86"N; 101°45'25.67"O

Punto análisis				RELACIONES CORREGIDAS									EDADES CORREGIDAS								
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sub>1</sub>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ	Best age (Ma)	±2σ	Disc %
GM-52_11	711	423	0.59	0.0750	0.0099	0.0462	0.0051	0.0046	0.0002	0.0017	0.0002	-0.03	29.7	1.5	45.8	5.0	1130.0	200.0	29.7	1.5	35.2
GM-52_2	1578	706	0.45	0.0537	0.0043	0.0345	0.0026	0.0046	0.0001	0.0015	0.0001	0.09	29.7	0.8	34.4	2.6	320.0	170.0	29.7	0.8	13.5
GM-52_17	743	318	0.43	0.0524	0.0080	0.0336	0.0047	0.0046	0.0001	0.0019	0.0002	-0.09	29.8	0.9	33.5	4.6	200.0	300.0	29.8	0.9	11.2
GM-52_9	713	491.7	0.69	0.0598	0.0065	0.0379	0.0040	0.0046	0.0001	0.0016	0.0002	0.03	29.8	0.8	37.7	3.9	530.0	230.0	29.8	0.8	21.0
GM-52	945	440.9	0.47	0.0768	0.0069	0.0500	0.0042	0.0047	0.0001	0.0023	0.0002	0.12	30.3	0.9	49.5	4.0	1050.0	190.0	30.3	0.9	38.9
GM-52_34	1265	764	0.60	0.0580	0.0059	0.0374	0.0034	0.0048	0.0001	0.0016	0.0001	-0.02	30.6	0.9	37.3	3.3	500.0	220.0	30.6	0.9	18.0
GM-52_15	554	280	0.51	0.0646	0.0091	0.0462	0.0056	0.0048	0.0002	0.0021	0.0003	-0.11	30.7	1.3	45.8	5.4	830.0	290.0	30.7	1.3	33.0
GM-52_19	1103	434	0.39	0.0589	0.0065	0.0384	0.0040	0.0048	0.0001	0.0018	0.0002	0.01	30.8	0.8	38.2	3.9	480.0	230.0	30.8	0.8	19.3
GM-52_22	756	399.1	0.53	0.0880	0.0110	0.0581	0.0064	0.0048	0.0002	0.0024	0.0002	-0.26	30.8	0.9	57.2	6.1	1280.0	260.0	30.8	0.9	46.1
GM-52_27	2052	1092.9	0.53	0.0734	0.0048	0.0493	0.0032	0.0048	0.0002	0.0020	0.0001	0.14	31.0	1.1	48.8	3.1	1000.0	140.0	31.0	1.1	36.5
GM-52_21	894.2	403	0.45	0.0640	0.0095	0.0408	0.0050	0.0048	0.0002	0.0021	0.0002	-0.25	31.1	1.3	40.5	4.9	630.0	320.0	31.1	1.3	23.2
GM-52_20	977	472	0.48	0.0609	0.0052	0.0409	0.0034	0.0049	0.0002	0.0020	0.0002	-0.08	31.2	1.1	40.6	3.3	590.0	180.0	31.2	1.1	23.2
GM-52_32	447	466	1.04	0.0760	0.0075	0.0507	0.0051	0.0049	0.0002	0.0018	0.0001	0.15	31.2	1.2	50.2	5.0	1050.0	190.0	31.2	1.2	37.8
GM-52_6	937	590	0.63	0.0553	0.0047	0.0374	0.0030	0.0049	0.0002	0.0017	0.0001	-0.03	31.2	1.0	37.3	2.9	430.0	170.0	31.2	1.0	16.4
GM-52_31	487	417.6	0.86	0.0775	0.0070	0.0542	0.0042	0.0049	0.0002	0.0020	0.0001	0.04	31.4	1.1	53.5	4.1	1180.0	170.0	31.4	1.1	41.3
GM-52_4	1122	507.8	0.45	0.0594	0.0058	0.0406	0.0037	0.0049	0.0001	0.0019	0.0002	-0.10	31.4	0.9	40.4	3.6	530.0	210.0	31.4	0.9	22.2
GM-52_28	889	466.2	0.52	0.0638	0.0076	0.0425	0.0050	0.0049	0.0001	0.0020	0.0001	0.27	31.5	0.7	42.2	4.9	660.0	240.0	31.5	0.7	25.3
GM-52_13	905	433	0.48	0.0686	0.0056	0.0469	0.0035	0.0049	0.0002	0.0019	0.0002	-0.01	31.6	1.0	46.5	3.4	860.0	160.0	31.6	1.0	32.2
GM-52_24	1108	604.7	0.55	0.0681	0.0048	0.0471	0.0028	0.0050	0.0002	0.0021	0.0002	-0.26	32.0	1.1	46.7	2.8	850.0	150.0	32.0	1.1	31.5
GM-52_1	1027	484.6	0.47	0.0990	0.0120	0.0676	0.0081	0.0050	0.0002	0.0032	0.0003	0.26	32.1	1.3	66.3	7.7	1620.0	200.0	32.1	1.3	51.6
GM-52_10	764	356.7	0.47	0.0766	0.0056	0.0516	0.0035	0.0050	0.0002	0.0020	0.0002	0.05	32.1	1.2	51.1	3.4	1120.0	160.0	32.1	1.2	37.2
GM-52_16	233.6	154.3	0.66	0.0780	0.0100	0.0534	0.0068	0.0051	0.0002	0.0023	0.0002	0.23	32.6	1.5	52.6	6.6	1070.0	280.0	32.6	1.5	38.0
GM-52_8	541	457	0.84	0.0980	0.0160	0.0680	0.0099	0.0051	0.0002	0.0024	0.0002	-0.30	32.6	1.5	66.7	9.4	1430.0	320.0	32.6	1.5	51.1
GM-52_7	523.8	187	0.36	0.1010	0.0100	0.0695	0.0067	0.0051	0.0002	0.0033	0.0004	-0.16	32.7	1.4	69.4	6.7	1630.0	220.0	32.7	1.4	52.9
GM-52_30	768	406.1	0.53	0.0691	0.0051	0.0497	0.0033	0.0051	0.0002	0.0021	0.0002	-0.01	33.1	1.0	49.2	3.2	960.0	150.0	33.1	1.0	32.7
GM-52_14	798	468	0.59	0.1230	0.0140	0.0867	0.0098	0.0052	0.0002	0.0033	0.0003	0.30	33.4	1.1	84.2	9.1	1910.0	200.0	33.4	1.1	60.3
GM-52_3	246	174	0.71	0.1060	0.0140	0.0748	0.0086	0.0053	0.0003	0.0028	0.0003	0.11	33.7	1.8	73.0	8.1	1670.0	270.0	33.7	1.8	53.8

GM-52_12	485	249	0.51	0.0800	0.0110	0.0572	0.0070	0.0053	0.0002	0.0025	0.0002	-0.10	33.8	1.3	56.4	6.7	1140.0	280.0	33.8	1.3	40.1
GM-52_18	195.9	156.1	0.80	0.1260	0.0170	0.0910	0.0130	0.0053	0.0003	0.0028	0.0004	0.27	34.3	1.8	88.0	12.0	1980.0	280.0	34.3	1.8	61.0
GM-52_26	757	367	0.48	0.0881	0.0071	0.0647	0.0042	0.0054	0.0001	0.0030	0.0002	-0.47	34.5	0.9	63.6	4.0	1420.0	160.0	34.5	0.9	45.7
GM-52_33	311.9	167.4	0.54	0.0890	0.0110	0.0656	0.0077	0.0055	0.0003	0.0028	0.0003	0.04	35.2	1.8	64.4	7.3	1370.0	270.0	35.2	1.8	45.3
GM-52_25	986	433	0.44	0.1260	0.0130	0.0922	0.0092	0.0056	0.0003	0.0045	0.0006	0.38	35.8	1.8	89.4	8.6	2000.0	200.0	35.8	1.8	60.0

**Tabla A4.** Datos U-Pb en circón con método LA-ICPMS de la muestra GM-54 de la ignimbrita Cuatralba. Coordenadas WGS84: 21°42'32.87"N; 101°47'5.88"O

Punto análisis				RELACIONES CORREGIDAS									EDADES CORREGIDAS								
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sub>1</sub>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ	Best age (Ma)	±2σ	Disc %
GM-54_23	846	429	0.51	0.0683	0.0088	0.0408	0.0050	0.0043	0.0002	0.0017	0.0002	0.27	27.9	1.1	40.5	4.9	920.0	210.0	27.9	1.1	31.1
GM-54_2	697	341	0.49	0.0625	0.0067	0.0379	0.0037	0.0043	0.0001	0.0019	0.0002	-0.04	28.0	0.9	37.7	3.6	760.0	240.0	28.0	0.9	25.9
GM-54_29	571	279.9	0.49	0.0626	0.0094	0.0377	0.0054	0.0044	0.0002	0.0021	0.0003	0.07	28.1	1.1	37.5	5.3	680.0	300.0	28.1	1.1	25.1
GM-54_7	542.5	232	0.43	0.0547	0.0076	0.0349	0.0048	0.0044	0.0002	0.0017	0.0002	-0.10	28.2	1.4	35.9	4.3	460.0	300.0	28.2	1.4	21.4
GM-54_16	820	398.6	0.49	0.0482	0.0044	0.0296	0.0024	0.0044	0.0002	0.0016	0.0001	-0.11	28.5	1.0	29.6	2.3	70.0	180.0	28.5	1.0	3.7
GM-54_24	114.6	70.9	0.62	0.0900	0.0250	0.0540	0.0150	0.0044	0.0003	0.0016	0.0003	-0.29	28.5	2.2	53.0	14.0	930.0	700.0	28.5	2.2	46.2
GM-54_9	326	189	0.58	0.0810	0.0110	0.0476	0.0063	0.0044	0.0002	0.0020	0.0002	0.18	28.5	1.4	48.3	6.4	1190.0	250.0	28.5	1.4	41.0
GM-54_17	416	189.1	0.45	0.0630	0.0110	0.0385	0.0063	0.0045	0.0002	0.0020	0.0002	-0.40	28.8	1.1	38.3	6.2	470.0	370.0	28.8	1.1	24.8
GM-54_6	702	271.5	0.39	0.0655	0.0061	0.0411	0.0035	0.0045	0.0001	0.0018	0.0002	-0.12	28.9	0.7	40.8	3.4	740.0	180.0	28.9	0.7	29.2
GM-54_21	689	318.8	0.46	0.0776	0.0091	0.0476	0.0053	0.0045	0.0002	0.0020	0.0002	-0.02	29.0	1.0	47.1	5.2	1050.0	230.0	29.0	1.0	38.5
GM-54_11	811.7	416.5	0.51	0.0583	0.0084	0.0378	0.0053	0.0045	0.0002	0.0017	0.0002	-0.07	29.1	1.3	37.6	5.2	510.0	310.0	29.1	1.3	22.6
GM-54_4	452.3	236.5	0.52	0.0775	0.0095	0.0476	0.0052	0.0046	0.0002	0.0020	0.0001	-0.04	29.3	1.3	47.1	5.1	1090.0	230.0	29.3	1.3	37.8
GM-54_25	1049	407	0.39	0.0520	0.0050	0.0328	0.0031	0.0046	0.0001	0.0017	0.0001	0.10	29.4	0.8	32.8	3.1	260.0	190.0	29.4	0.8	10.3
GM-54_27	619.1	373.4	0.60	0.0683	0.0057	0.0441	0.0037	0.0046	0.0001	0.0017	0.0002	0.14	29.5	0.9	43.8	3.6	850.0	170.0	29.5	0.9	32.8
GM-54_1	116.6	59	0.51	0.1290	0.0150	0.0850	0.0120	0.0047	0.0004	0.0036	0.0006	0.43	29.9	2.3	82.0	12.0	2100.0	240.0	29.9	2.3	63.5
GM-54_14	907	424	0.47	0.0503	0.0051	0.0334	0.0036	0.0047	0.0002	0.0016	0.0002	0.02	30.0	1.0	33.4	3.5	260.0	230.0	30.0	1.0	10.2
GM-54_15	238.7	116.6	0.49	0.0840	0.0160	0.0541	0.0094	0.0047	0.0003	0.0028	0.0003	-0.07	30.2	1.9	53.2	9.0	1110.0	360.0	30.2	1.9	43.2
GM-54_18	308	155.6	0.51	0.1120	0.0250	0.0730	0.0160	0.0047	0.0003	0.0035	0.0005	0.06	30.3	1.7	71.0	15.0	1670.0	450.0	30.3	1.7	57.3
GM-54_8	254.6	114.1	0.45	0.1120	0.0170	0.0750	0.0110	0.0047	0.0003	0.0033	0.0004	-0.01	30.4	1.8	73.0	10.0	1860.0	310.0	30.4	1.8	58.4
GM-54	95	55.9	0.59	0.1420	0.0320	0.0780	0.0150	0.0048	0.0004	0.0032	0.0005	0.00	30.6	2.2	75.0	14.0	1610.0	480.0	30.6	2.2	59.2
GM-54_22	140.3	61.7	0.44	0.1260	0.0250	0.0790	0.0120	0.0048	0.0004	0.0038	0.0005	-0.33	30.7	2.4	77.0	12.0	1970.0	330.0	30.7	2.4	60.1
GM-54_10	199.4	92.6	0.46	0.0910	0.0120	0.0595	0.0073	0.0048	0.0003	0.0032	0.0003	0.16	31.0	1.8	58.4	7.1	1500.0	240.0	31.0	1.8	46.9
GM-54_3	288	151.4	0.53	0.0980	0.0140	0.0660	0.0088	0.0049	0.0003	0.0029	0.0002	0.00	31.6	1.6	64.6	8.4	1430.0	290.0	31.6	1.6	51.1
GM-54_19	785	375	0.48	0.0750	0.0063	0.0511	0.0042	0.0049	0.0002	0.0023	0.0002	-0.05	31.8	1.0	50.6	4.0	1110.0	180.0	31.8	1.0	37.3

**Tabla A5.** Datos U-Pb en circón con método LA-ICPMS de la muestra GM-56 de la ignimbrita Cuatralba. Coordenadas WGS84: 21°54'32.99"N; 101°23'39.37"O

Punto análisis				RELACIONES CORREGIDAS									EDADES CORREGIDAS								
	U (ppm) <sub>i</sub>	Th (ppm) <sub>i</sub>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ	Best age (Ma)	±2σ	Disc %
GM_56	5387	1459	0.27	0.0476	0.0019	0.0353	0.0016	0.0054	0.0001	0.0018	0.0001	0.05	34.8	0.6	35.3	1.6	92.0	94.0	34.8	0.6	1.5
GM_56_1	6872	2430	0.35	0.0627	0.0036	0.0502	0.0034	0.0057	0.0001	0.0024	0.0001	0.35	36.8	0.7	49.7	3.3	700.0	130.0	36.8	0.7	26.0
GM_56_2	2972	1071	0.36	0.0688	0.0027	0.0508	0.0023	0.0054	0.0001	0.0024	0.0001	0.14	34.8	0.6	50.3	2.2	896.0	84.0	34.8	0.6	30.8
GM_56_3	3150	1142	0.36	0.0483	0.0021	0.0357	0.0017	0.0054	0.0001	0.0017	0.0001	0.07	34.5	0.7	35.6	1.7	108.0	98.0	34.5	0.7	3.1
GM_56_4	4906	1369	0.28	0.0649	0.0022	0.0484	0.0019	0.0054	0.0001	0.0026	0.0001	0.01	34.9	0.6	48.0	1.8	764.0	70.0	34.9	0.6	27.3
GM_56_5	3999	1164	0.29	0.0645	0.0061	0.0466	0.0042	0.0055	0.0001	0.0025	0.0003	0.37	35.0	0.9	46.3	4.1	730.0	190.0	35.0	0.9	24.4
GM_56_6	3230	881.3	0.27	0.0514	0.0020	0.0392	0.0017	0.0056	0.0001	0.0017	0.0001	-0.06	35.8	0.6	39.3	1.7	246.0	89.0	35.8	0.6	9.0
GM_56_7	3995	1387	0.35	0.0643	0.0026	0.0476	0.0023	0.0054	0.0001	0.0022	0.0001	0.57	34.6	0.6	47.2	2.2	757.0	90.0	34.6	0.6	26.8
GM_56_8	3398	1025	0.30	0.0502	0.0018	0.0371	0.0015	0.0054	0.0001	0.0016	0.0001	-0.16	34.6	0.7	37.0	1.4	196.0	82.0	34.6	0.7	6.6
GM_56_10	6450	2309	0.36	0.0491	0.0031	0.0365	0.0023	0.0054	0.0001	0.0018	0.0001	-0.18	34.8	0.6	36.4	2.3	140.0	140.0	34.8	0.6	4.3
GM_56_11	3785	970	0.26	0.0520	0.0015	0.0377	0.0013	0.0053	0.0001	0.0017	0.0001	0.46	34.2	0.6	37.6	1.3	276.0	65.0	34.2	0.6	9.1
GM_56_12	4130	2025	0.49	0.0593	0.0019	0.0436	0.0016	0.0053	0.0001	0.0019	0.0001	-0.03	34.4	0.7	43.4	1.6	571.0	70.0	34.4	0.7	20.8
GM_56_13	3861	1235	0.32	0.0630	0.0027	0.0461	0.0022	0.0053	0.0001	0.0023	0.0001	-0.10	34.1	0.6	45.8	2.1	695.0	93.0	34.1	0.6	25.7
GM_56_14	4710	1495	0.32	0.0482	0.0021	0.0357	0.0017	0.0054	0.0001	0.0018	0.0001	-0.11	34.6	0.7	35.6	1.6	103.0	98.0	34.6	0.7	2.8
GM_56_15	3503	1039.6	0.30	0.0580	0.0021	0.0429	0.0017	0.0053	0.0001	0.0022	0.0001	-0.02	34.2	0.5	42.7	1.7	522.0	80.0	34.2	0.5	19.9
GM_56_16	4079	1240	0.30	0.0494	0.0023	0.0364	0.0018	0.0054	0.0001	0.0018	0.0001	-0.35	34.8	0.6	36.3	1.8	160.0	100.0	34.8	0.6	4.2
GM_56_17	5560	1900	0.34	0.0491	0.0016	0.0361	0.0013	0.0054	0.0001	0.0018	0.0001	0.30	34.5	0.6	36.0	1.3	146.0	72.0	34.5	0.6	4.2
GM_56_18	4030	1950	0.48	0.0650	0.0027	0.0482	0.0025	0.0054	0.0001	0.0020	0.0001	0.42	34.7	0.7	47.8	2.4	766.0	90.0	34.7	0.7	27.4
GM_56_19	5360	1960	0.37	0.0571	0.0017	0.0424	0.0015	0.0054	0.0001	0.0020	0.0001	-0.01	35.0	0.6	42.2	1.4	496.0	65.0	35.0	0.6	17.0
GM_56_20	4880	1444	0.30	0.0485	0.0013	0.0360	0.0012	0.0054	0.0001	0.0018	0.0001	-0.08	34.5	0.6	35.9	1.2	121.0	62.0	34.5	0.6	4.0
GM_56_23	3860	1519	0.39	0.0510	0.0025	0.0384	0.0018	0.0054	0.0001	0.0018	0.0001	-0.31	35.0	0.7	38.3	1.8	227.0	110.0	35.0	0.7	8.6
GM_56_24	3763	1054	0.28	0.0483	0.0020	0.0364	0.0017	0.0054	0.0001	0.0017	0.0001	-0.07	35.0	0.7	36.3	1.7	109.0	94.0	35.0	0.7	3.5
GM_56_25	3037	1006	0.33	0.0479	0.0019	0.0362	0.0017	0.0054	0.0001	0.0015	0.0001	0.08	34.9	0.6	36.1	1.6	108.0	91.0	34.9	0.6	3.2
GM_56_26	1799	970	0.54	0.0480	0.0022	0.0364	0.0015	0.0055	0.0001	0.0015	0.0001	0.11	35.2	0.6	36.3	1.5	98.0	100.0	35.2	0.6	3.0

GM_56_28	4110	1234	0.30	0.0563	0.0021	0.0432	0.0018	0.0056	0.0001	0.0022	0.0001	0.00	36.1	0.6	42.9	1.7	452.0	82.0	36.1	0.6	15. 9
GM_56_29	1649	971	0.59	0.0498	0.0025	0.0374	0.0020	0.0054	0.0001	0.0015	0.0001	- 0.07	34.7	0.7	37.3	2.0	200.0	120. 0	34.7	0.7	7.1
GM_56_30	1892	787	0.42	0.0515	0.0025	0.0386	0.0021	0.0054	0.0001	0.0016	0.0001	0.25	35.0	0.6	38.4	2.0	250.0	110. 0	35.0	0.6	9.0
GM_56_31	2840	927	0.33	0.0704	0.0038	0.0546	0.0034	0.0056	0.0001	0.0024	0.0002	0.47	35.9	0.6	53.9	3.3	900.0	110. 0	35.9	0.6	33. 4
GM_56_32	3920	1033	0.26	0.0489	0.0018	0.0364	0.0018	0.0055	0.0001	0.0018	0.0001	0.11	35.3	0.7	36.3	1.8	138.0	83.0	35.3	0.7	2.9
GM_56_33	3311	1052	0.32	0.0667	0.0020	0.0515	0.0019	0.0056	0.0001	0.0026	0.0001	0.05	36.1	0.6	50.9	1.8	818.0	63.0	36.1	0.6	29. 1
GM_56_34	4964	1358	0.27	0.0605	0.0020	0.0448	0.0018	0.0054	0.0001	0.0024	0.0001	0.23	34.5	0.6	44.5	1.7	614.0	70.0	34.5	0.6	22. 4

**Tabla A6.** Datos U-Pb en circón con método LA-ICPMS de la muestra GM-62 de la ignimbrita Cantera. Coordenadas WGS84: 22° 1'4.62"N; 101°25'48.12"O

Punto análisis				RELACIONES CORREGIDAS									EIDADES CORREGIDAS								
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ	Best age (Ma)	±2σ	Disc %
GM_62	526	320	0.61	0.0531	0.0046	0.0314	0.0028	0.0045	0.0001	0.0016	0.0001	-0.02	28.8	0.8	32.0	2.6	280.0	180.0	28.8	0.8	10.1
GM_62_1	72.1	38.3	0.53	0.0900	0.0130	0.0584	0.0081	0.0049	0.0002	0.0025	0.0003	-0.07	31.6	1.5	57.3	7.8	1100.0	320.0	31.6	1.5	44.9
GM_62_2	328	196.4	0.60	0.0634	0.0091	0.0396	0.0054	0.0047	0.0002	0.0017	0.0002	-0.04	30.2	1.0	39.3	5.2	580.0	300.0	30.2	1.0	23.2
GM_62_3	304	185	0.61	0.0602	0.0094	0.0423	0.0074	0.0048	0.0002	0.0022	0.0002	0.28	31.1	1.1	42.0	7.2	560.0	350.0	31.1	1.1	26.0
GM_62_4	136.4	68.9	0.51	0.0540	0.0075	0.0325	0.0041	0.0046	0.0002	0.0019	0.0004	-0.10	29.3	1.2	32.4	4.0	330.0	290.0	29.3	1.2	9.6
GM_62_5	233	188	0.81	0.1240	0.0120	0.0884	0.0090	0.0050	0.0002	0.0027	0.0002	0.04	32.0	1.3	87.1	8.1	2020.0	170.0	32.0	1.3	63.3
GM_62_7	255.6	129.2	0.51	0.0518	0.0068	0.0317	0.0044	0.0044	0.0002	0.0016	0.0002	0.13	28.5	1.1	31.7	4.3	220.0	270.0	28.5	1.1	10.1
GM_62_9	242	101	0.42	0.0695	0.0091	0.0471	0.0064	0.0049	0.0002	0.0022	0.0002	-0.05	31.8	1.1	46.6	6.1	760.0	260.0	31.8	1.1	31.8
GM_62_10	231.5	129	0.56	0.0525	0.0096	0.0352	0.0066	0.0050	0.0002	0.0015	0.0002	-0.01	32.0	1.1	35.1	6.5	180.0	360.0	32.0	1.1	8.9
GM_62_11	78.1	57.7	0.74	0.0750	0.0160	0.0510	0.0100	0.0049	0.0002	0.0019	0.0003	-0.11	31.7	1.2	49.8	10.0	670.0	440.0	31.7	1.2	36.3
GM_62_12	226.4	176.6	0.78	0.0950	0.0130	0.0588	0.0075	0.0045	0.0002	0.0018	0.0002	0.59	29.1	1.0	57.9	7.2	1410.0	280.0	29.1	1.0	49.7
GM_62_13	61.1	33.44	0.55	0.1120	0.0210	0.0800	0.0140	0.0051	0.0003	0.0037	0.0004	-0.16	33.0	1.9	79.0	14.0	1770.0	370.0	33.0	1.9	58.2
GM_62_14	85	50.5	0.59	0.0970	0.0190	0.0620	0.0120	0.0047	0.0002	0.0029	0.0004	0.15	30.3	1.3	63.0	11.0	1230.0	430.0	30.3	1.3	51.9
GM_62_15	775	338	0.44	0.0483	0.0037	0.0306	0.0024	0.0046	0.0002	0.0015	0.0001	0.33	30.0	1.1	30.6	2.3	100.0	160.0	30.0	1.1	2.0
GM_62_16	77.2	55.1	0.71	0.0530	0.0110	0.0341	0.0065	0.0048	0.0002	0.0017	0.0002	-0.15	30.9	1.3	33.9	6.4	220.0	380.0	30.9	1.3	8.8
GM_62_17	99.3	36.5	0.37	0.0590	0.0130	0.0369	0.0083	0.0046	0.0002	0.0026	0.0004	-0.04	29.8	1.4	36.4	8.1	340.0	460.0	29.8	1.4	18.1
GM_62_18	229	139	0.61	0.0479	0.0064	0.0299	0.0042	0.0046	0.0002	0.0016	0.0001	-0.03	29.3	1.0	29.8	4.1	80.0	270.0	29.3	1.0	1.6
GM_62_19	462.1	266.3	0.58	0.1260	0.0091	0.0815	0.0067	0.0047	0.0002	0.0033	0.0004	0.17	30.1	1.4	79.5	6.3	2030.0	130.0	30.1	1.4	62.1
GM_62_20	534	352	0.66	0.0724	0.0097	0.0499	0.0064	0.0051	0.0001	0.0021	0.0002	0.19	32.6	0.8	49.4	6.2	900.0	270.0	32.6	0.8	34.0
GM_62_21	372.2	193.3	0.52	0.0594	0.0057	0.0368	0.0036	0.0045	0.0002	0.0016	0.0001	0.28	28.8	1.1	36.6	3.5	550.0	220.0	28.8	1.1	21.3
GM_62_22	72.27	40.27	0.56	0.0550	0.0140	0.0339	0.0096	0.0047	0.0002	0.0021	0.0004	0.11	30.0	1.5	33.6	9.5	190.0	490.0	30.0	1.5	10.7
GM_62_23	226	131	0.58	0.0777	0.0077	0.0517	0.0046	0.0051	0.0002	0.0022	0.0002	-0.03	33.0	1.0	51.1	4.5	1100.0	200.0	33.0	1.0	35.5
GM_62_26	214	152	0.71	0.0490	0.0091	0.0321	0.0058	0.0048	0.0002	0.0016	0.0002	0.02	30.8	1.1	32.1	5.7	90.0	380.0	30.8	1.1	4.0
GM_62_27	103.9	50.3	0.48	0.0680	0.0120	0.0443	0.0075	0.0048	0.0002	0.0021	0.0003	-0.05	31.1	1.4	43.8	7.3	620.0	360.0	31.1	1.4	29.0
GM_62_28	545	268	0.49	0.0609	0.0079	0.0375	0.0042	0.0046	0.0002	0.0018	0.0002	0.24	29.5	0.9	37.4	4.1	600.0	230.0	29.5	0.9	21.2
GM_62_29	240.7	145.8	0.61	0.0625	0.0072	0.0385	0.0045	0.0045	0.0002	0.0015	0.0002	0.06	28.8	1.1	38.3	4.4	660.0	260.0	28.8	1.1	24.8

GM_62_31	839	433	0.52	0.0536	0.0046	0.0349	0.0029	0.0048	0.0001	0.0016	0.0001	0.38	30.5	0.9	34.8	2.9	310.0	190.0	30.5	0.9	12.3
GM_62_32	149.6	104.9	0.70	0.1440	0.0190	0.1070	0.0120	0.0052	0.0002	0.0035	0.0003	-0.14	33.5	1.2	103.0	11.0	2370.0	220.0	33.5	1.2	67.5
GM_62_33	170.7	47.2	0.28	0.0620	0.0170	0.0326	0.0075	0.0042	0.0002	0.0017	0.0005	-0.06	26.9	1.4	32.5	7.4	450.0	540.0	26.9	1.4	17.2
GM_62_34	265	156.1	0.59	0.0533	0.0066	0.0352	0.0047	0.0047	0.0001	0.0017	0.0002	-0.08	30.4	0.9	35.0	4.6	320.0	230.0	30.4	0.9	13.1



**Tabla A7.** Datos U-Pb en circón con método LA-ICPMS de la muestra GM-64 de la ignimbrita Cantera. Coordenadas WGS84: 21°51'9.91"N; 101°38'44.76"O

Punto análisis				RELACIONES CORREGIDAS									EDADES CORREGIDAS								
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ	Best age (Ma)	±2σ	Disc %
GM_64	414	252	0.61	0.0533	0.0038	0.0348	0.0026	0.0047	0.0002	0.0016	0.0002	-0.28	30.2	0.9	35.3	2.8	350.0	170.0	30.2	0.9	14.5
GM_64_1	223.5	125.6	0.56	0.0538	0.0087	0.0360	0.0058	0.0048	0.0001	0.0019	0.0002	-0.27	30.7	0.9	35.8	5.6	340.0	320.0	30.7	0.9	14.2
GM_64_2	268	110.7	0.41	0.0533	0.0063	0.0346	0.0041	0.0048	0.0001	0.0017	0.0002	0.05	30.7	0.9	34.4	4.0	300.0	230.0	30.7	0.9	10.9
GM_64_3	901	397	0.44	0.0460	0.0038	0.0306	0.0026	0.0048	0.0001	0.0017	0.0001	0.20	30.8	0.8	30.6	2.6	0.0	170.0	30.8	0.8	-0.6
GM_64_4	233	120	0.52	0.0497	0.0084	0.0342	0.0047	0.0047	0.0002	0.0019	0.0002	-0.30	30.5	1.0	34.0	4.6	370.0	280.0	30.5	1.0	10.3
GM_64_5	443.2	219.56	0.50	0.0580	0.0056	0.0366	0.0033	0.0046	0.0002	0.0017	0.0002	0.02	29.5	1.0	36.4	3.3	490.0	220.0	29.5	1.0	19.1
GM_64_6	548	266.9	0.49	0.0505	0.0044	0.0334	0.0032	0.0048	0.0001	0.0018	0.0002	0.47	30.6	0.7	33.3	3.2	230.0	200.0	30.6	0.7	8.0
GM_64_7	414	201	0.49	0.0517	0.0043	0.0329	0.0028	0.0047	0.0001	0.0016	0.0001	0.03	29.9	0.7	32.8	2.7	230.0	170.0	29.9	0.7	8.8
GM_64_9	321.5	171.5	0.53	0.0554	0.0085	0.0345	0.0052	0.0047	0.0001	0.0017	0.0002	0.24	30.5	0.8	34.4	5.1	320.0	310.0	30.5	0.8	11.5
GM_64_10	622.6	225.1	0.36	0.0500	0.0042	0.0318	0.0027	0.0046	0.0001	0.0017	0.0001	-0.11	29.8	0.6	31.8	2.7	150.0	180.0	29.8	0.6	6.4
GM_64_11	214.9	94.7	0.44	0.0530	0.0100	0.0348	0.0066	0.0047	0.0001	0.0016	0.0002	-0.09	30.1	0.9	34.6	6.5	410.0	390.0	30.1	0.9	12.9
GM_64_12	371.2	139.3	0.38	0.0517	0.0049	0.0346	0.0033	0.0047	0.0001	0.0016	0.0002	-0.16	30.3	0.9	34.5	3.2	300.0	210.0	30.3	0.9	12.1
GM_64_14	252.8	129.38	0.51	0.0596	0.0089	0.0373	0.0054	0.0047	0.0002	0.0016	0.0002	0.31	30.1	1.3	37.2	5.3	480.0	310.0	30.1	1.3	19.1
GM_64_15	804	376	0.47	0.0491	0.0038	0.0310	0.0025	0.0046	0.0001	0.0016	0.0001	0.22	29.4	0.8	31.0	2.4	200.0	160.0	29.4	0.8	5.2
GM_64_16	424.1	322.7	0.76	0.0539	0.0070	0.0349	0.0042	0.0048	0.0002	0.0017	0.0001	-0.16	30.6	1.0	34.8	4.1	350.0	280.0	30.6	1.0	12.0
GM_64_17	231.6	114.02	0.49	0.0600	0.0170	0.0380	0.0110	0.0047	0.0002	0.0020	0.0004	0.54	29.9	1.3	38.0	10.0	420.0	530.0	29.9	1.3	21.3
GM_64_18	255.5	203	0.79	0.0533	0.0091	0.0338	0.0055	0.0047	0.0002	0.0016	0.0001	-0.22	30.0	1.2	33.7	5.4	220.0	350.0	30.0	1.2	11.0
GM_64_19	357.2	307.9	0.86	0.0590	0.0110	0.0377	0.0067	0.0047	0.0001	0.0017	0.0002	-0.10	30.2	0.6	37.5	6.5	560.0	420.0	30.2	0.6	19.4
GM_64_21	716	313.2	0.44	0.0527	0.0040	0.0345	0.0026	0.0048	0.0001	0.0017	0.0001	-0.24	30.8	0.7	34.5	2.5	270.0	170.0	30.8	0.7	10.7
GM_64_22	281.2	168.4	0.60	0.0503	0.0078	0.0349	0.0048	0.0048	0.0002	0.0017	0.0002	-0.08	30.8	1.1	34.8	4.7	230.0	290.0	30.8	1.1	11.6
GM_64_24	112.2	67.18	0.60	0.0540	0.0120	0.0357	0.0079	0.0047	0.0002	0.0019	0.0003	0.10	30.2	1.3	35.4	7.7	390.0	460.0	30.2	1.3	14.7
GM_64_24	112.2	67.18	0.60	0.0540	0.0120	0.0357	0.0079	0.0047	0.0002	0.0019	0.0003	0.10	30.2	1.3	35.4	7.7	390.0	460.0	30.2	1.3	14.7
GM_64_27	428.3	361	0.84	0.0570	0.0071	0.0354	0.0038	0.0046	0.0001	0.0016	0.0001	0.03	29.3	0.9	35.3	3.7	450.0	240.0	29.3	0.9	16.9
GM_64_28	263.5	182.7	0.69	0.0521	0.0057	0.0328	0.0032	0.0048	0.0002	0.0017	0.0002	-0.11	30.7	1.0	32.8	3.1	250.0	220.0	30.7	1.0	6.5
GM_64_29	271.8	138.1	0.51	0.0504	0.0051	0.0333	0.0033	0.0048	0.0001	0.0020	0.0002	0.16	30.9	0.9	33.3	3.2	270.0	240.0	30.9	0.9	7.3

GM_64_31	353	168.2	0.48	0.0507	0.0096	0.0321	0.0057	0.0047	0.0002	0.0016	0.0002	-0.44	30.0	1.0	32.0	5.6	140.0	370.0	30.0	1.0	6.3
GM_64_32	225.1	108.2	0.48	0.0484	0.0079	0.0315	0.0049	0.0047	0.0002	0.0017	0.0001	-0.08	30.4	0.9	31.4	4.8	50.0	310.0	30.4	0.9	3.3
GM_64_33	881	359	0.41	0.0485	0.0032	0.0322	0.0023	0.0048	0.0001	0.0017	0.0002	0.33	30.7	0.8	32.2	2.2	120.0	140.0	30.7	0.8	4.6
GM_64_34	389	364	0.94	0.0496	0.0044	0.0344	0.0034	0.0049	0.0001	0.0015	0.0001	0.02	31.6	0.9	34.3	3.3	130.0	180.0	31.6	0.9	7.8
GM_64_35	789.6	327.2	0.41	0.0503	0.0041	0.0327	0.0027	0.0047	0.0001	0.0016	0.0002	-0.07	30.4	0.7	32.7	2.6	180.0	170.0	30.4	0.7	6.9

**Tabla A8.** Datos U-Pb en circón con método LA-ICPMS de la muestra GM-65 de la ignimbrita Cuatralba. Coordenadas WGS84: 21°51'14.62"N; 101°49'55.12"O

Punto análisis				RELACIONES CORREGIDAS									EIDADES CORREGIDAS								
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ	Best age (Ma)	±2σ	Disc %
GM_65	125.7	70.3	0.56	0.0520	0.0130	0.0317	0.0077	0.0046	0.0003	0.0019	0.0002	-0.28	29.3	1.9	31.6	7.6	280.0	550.0	29.3	1.9	7.3
GM_65_1	166	98.6	0.59	0.0479	0.0054	0.0294	0.0035	0.0045	0.0001	0.0015	0.0001	0.16	28.8	0.9	29.4	3.5	100.0	230.0	28.8	0.9	1.9
GM_65_2	95.1	49.3	0.52	0.0660	0.0190	0.0390	0.0110	0.0044	0.0003	0.0017	0.0003	-0.51	28.4	1.7	38.0	11.0	740.0	590.0	28.4	1.7	25.3
GM_65_3	91.11	35.99	0.40	0.1040	0.0290	0.0640	0.0170	0.0045	0.0003	0.0034	0.0010	-0.07	29.1	2.2	62.0	16.0	1710.0	430.0	29.1	2.2	53.1
GM_65_4	56.7	25.5	0.45	0.0590	0.0170	0.0317	0.0080	0.0042	0.0002	0.0017	0.0004	-0.23	27.3	1.5	32.8	8.2	240.0	480.0	27.3	1.5	16.8
GM_65_5	92	49.5	0.54	0.0910	0.0240	0.0630	0.0130	0.0046	0.0003	0.0027	0.0004	0.02	29.4	2.1	62.0	12.0	1360.0	500.0	29.4	2.1	52.6
GM_65_6	209.1	112.5	0.54	0.0560	0.0110	0.0344	0.0064	0.0045	0.0002	0.0016	0.0002	-0.33	28.9	1.1	34.2	6.3	370.0	410.0	28.9	1.1	15.5
GM_65_7	287.5	188	0.65	0.0528	0.0059	0.0313	0.0031	0.0043	0.0001	0.0014	0.0002	-0.20	27.9	0.9	31.2	3.1	260.0	240.0	27.9	0.9	10.5
GM_65_8	103.1	52.7	0.51	0.0590	0.0120	0.0331	0.0069	0.0043	0.0002	0.0016	0.0002	0.14	27.8	1.0	32.8	6.7	390.0	370.0	27.8	1.0	15.2
GM_65_9	89.6	51.4	0.57	0.0590	0.0150	0.0361	0.0081	0.0046	0.0003	0.0019	0.0003	-0.24	29.4	1.6	35.9	7.9	350.0	530.0	29.4	1.6	18.1
GM_65_10	224.4	104.9	0.47	0.0494	0.0056	0.0308	0.0036	0.0044	0.0001	0.0015	0.0002	-0.15	28.5	0.8	30.8	3.6	220.0	210.0	28.5	0.8	7.3
GM_65_11	256	131.1	0.51	0.0550	0.0100	0.0317	0.0060	0.0042	0.0001	0.0016	0.0002	-0.10	27.0	0.9	31.7	5.9	450.0	360.0	27.0	0.9	14.7
GM_65_12	139.7	61.8	0.44	0.0505	0.0079	0.0315	0.0050	0.0042	0.0002	0.0017	0.0002	-0.01	27.0	1.2	32.4	4.6	310.0	300.0	27.0	1.2	16.7
GM_65_13	70.9	36.5	0.51	0.0710	0.0160	0.0419	0.0091	0.0044	0.0002	0.0021	0.0003	-0.16	28.4	1.6	41.3	8.8	520.0	480.0	28.4	1.6	31.2
GM_65_14	92	47.8	0.52	0.0610	0.0130	0.0360	0.0071	0.0043	0.0003	0.0018	0.0003	0.37	27.4	1.7	35.7	7.0	660.0	310.0	27.4	1.7	23.2
GM_65_15	100.2	49.6	0.50	0.0716	0.0100	0.0418	0.0062	0.0044	0.0002	0.0018	0.0003	0.05	28.3	1.4	42.8	6.4	810.0	300.0	28.3	1.4	33.9
GM_65_16	95.6	42.71	0.45	0.0670	0.0130	0.0393	0.0070	0.0043	0.0002	0.0014	0.0002	-0.36	27.9	1.4	39.0	6.8	570.0	400.0	27.9	1.4	28.5
GM_65_17	223.6	105	0.47	0.0499	0.0061	0.0283	0.0034	0.0042	0.0001	0.0015	0.0002	0.08	27.1	0.9	28.3	3.4	110.0	240.0	27.1	0.9	4.2
GM_65_18	97	43.44	0.45	0.0600	0.0150	0.0340	0.0081	0.0044	0.0002	0.0016	0.0003	-0.40	28.2	1.5	33.7	8.0	290.0	480.0	28.2	1.5	16.3
GM_65_19	52.3	21.4	0.41	0.0600	0.0200	0.0390	0.0130	0.0047	0.0004	0.0021	0.0005	-0.14	30.3	2.3	38.0	12.0	320.0	600.0	30.3	2.3	20.3
GM_65_20	68	30.01	0.44	0.0720	0.0230	0.0400	0.0120	0.0043	0.0004	0.0023	0.0004	0.05	27.8	2.2	39.0	11.0	480.0	610.0	27.8	2.2	28.7
GM_65_21	102.5	59	0.58	0.0580	0.0120	0.0324	0.0063	0.0041	0.0003	0.0015	0.0002	-0.04	26.5	1.6	32.2	6.2	510.0	410.0	26.5	1.6	17.7
GM_65_22	128.8	54.65	0.42	0.0700	0.0110	0.0451	0.0068	0.0047	0.0002	0.0023	0.0003	-0.18	30.1	1.2	44.6	6.5	720.0	340.0	30.1	1.2	32.5
GM_65_23	160.5	73.24	0.46	0.0600	0.0170	0.0360	0.0100	0.0044	0.0002	0.0020	0.0003	-0.12	28.1	1.2	36.2	9.9	430.0	590.0	28.1	1.2	22.4
GM_65_24	355.1	221.6	0.62	0.0481	0.0046	0.0295	0.0030	0.0044	0.0001	0.0015	0.0001	-0.01	28.2	0.7	29.5	2.9	120.0	200.0	28.2	0.7	4.4
GM_65_25	59.9	39.48	0.66	0.0830	0.0190	0.0458	0.0100	0.0043	0.0003	0.0018	0.0003	-0.01	27.8	1.9	46.8	9.3	870.0	480.0	27.8	1.9	40.6

GM_65_26	128.9	89.2	0.69	0.0535	0.0086	0.0327	0.0053	0.0045	0.0002	0.0015	0.0001	0.03	28.7	1.2	33.3	5.3	340.0	300.0	28.7	1.2	13.8
GM_65_27	96.3	40.1	0.42	0.1000	0.0170	0.0640	0.0120	0.0045	0.0002	0.0032	0.0004	0.29	29.2	1.6	63.0	11.0	1670.0	320.0	29.2	1.6	53.7
GM_65_28	70.7	40.9	0.58	0.0720	0.0160	0.0414	0.0080	0.0046	0.0002	0.0020	0.0003	-0.08	29.6	1.5	40.8	7.8	530.0	430.0	29.6	1.5	27.5
GM_65_29	206.5	98.2	0.48	0.0593	0.0093	0.0349	0.0047	0.0044	0.0002	0.0018	0.0002	-0.20	28.2	1.1	34.7	4.6	480.0	330.0	28.2	1.1	18.7
GM_65_30	385.3	238.3	0.62	0.0517	0.0049	0.0311	0.0029	0.0044	0.0001	0.0015	0.0001	0.04	28.4	0.8	31.1	2.9	260.0	210.0	28.4	0.8	8.7
GM_65_31	122.7	53.81	0.44	0.0590	0.0150	0.0328	0.0077	0.0042	0.0002	0.0019	0.0003	0.08	27.1	1.2	32.5	7.5	200.0	470.0	27.1	1.2	16.6
GM_65_32	127.5	72.9	0.57	0.0602	0.0085	0.0365	0.0045	0.0044	0.0002	0.0017	0.0002	0.02	28.5	1.2	36.3	4.4	550.0	250.0	28.5	1.2	21.5
GM_65_33	84	45.6	0.54	0.0569	0.0089	0.0358	0.0056	0.0046	0.0002	0.0016	0.0004	0.23	29.6	1.5	35.6	5.5	560.0	320.0	29.6	1.5	16.9
GM_65_34	165	88.9	0.54	0.0533	0.0094	0.0336	0.0057	0.0046	0.0002	0.0017	0.0003	-0.02	29.2	1.1	33.5	5.6	200.0	350.0	29.2	1.1	12.8

**Tabla A9.** Datos U-Pb en circón con método LA-ICPMS de la muestra GM-31 de la ignimbrita Cuatralba. Coordenadas WGS84: 21°47'46.91"N; 101°40'53.96"O

Punto análisis	RELACIONES CORREGIDAS												EIDADES CORREGIDAS								
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ	Best age (Ma)	±2σ	Disc %
GM-31_1	1888	1002	0.53	0.0497	0.0044	0.0313	0.0025	0.0045	0.0001	0.0015	0.0001	0.14	28.9	0.8	31.3	2.5	230.0	180.0	28.9	0.8	7.8
GM-31_13	1705	952	0.56	0.0531	0.0035	0.0333	0.0023	0.0045	0.0001	0.0016	0.0001	-0.01	29.1	0.5	33.2	2.2	330.0	150.0	29.1	0.5	12.4
GM-31_9	615	252.7	0.41	0.0617	0.0085	0.0397	0.0053	0.0045	0.0002	0.0020	0.0002	-0.12	29.2	1.2	39.4	5.1	550.0	300.0	29.2	1.2	25.9
GM-31_2	160.8	104.2	0.65	0.0920	0.0180	0.0569	0.0100	0.0047	0.0003	0.0025	0.0003	-0.02	30.4	2.0	60.5	10.0	1190.0	430.0	30.4	2.0	49.8
GM-31_15	200	98.2	0.49	0.1260	0.0200	0.0790	0.0110	0.0048	0.0004	0.0035	0.0004	-0.06	30.5	2.4	76.8	10.0	2030.0	320.0	30.5	2.4	60.3
GM-31_5	502	486	0.97	0.0866	0.0082	0.0556	0.0056	0.0047	0.0002	0.0019	0.0001	-0.02	30.5	1.3	54.8	5.4	1310.0	200.0	30.5	1.3	44.3
GM-31_10	234.3	111.6	0.48	0.0580	0.0110	0.0371	0.0067	0.0048	0.0003	0.0022	0.0003	-0.21	31.0	1.6	36.8	6.6	430.0	420.0	31.0	1.6	15.8
GM-31_8	109.8	56.4	0.51	0.1550	0.0400	0.1040	0.0250	0.0050	0.0005	0.0048	0.0009	-0.18	31.8	2.9	100.0	23.0	2390.0	500.0	31.8	2.9	68.2
GM-31_12	270	154.3	0.57	0.0516	0.0079	0.0375	0.0053	0.0050	0.0003	0.0018	0.0002	0.19	32.2	1.8	37.2	5.1	220.0	290.0	32.2	1.8	13.4
GM-31_4	100.1	50	0.50	0.1660	0.0360	0.1080	0.0220	0.0051	0.0005	0.0050	0.0008	-0.04	32.8	2.9	103.0	20.0	2400.0	360.0	32.8	2.9	68.2
GM-31_6	114.1	51.3	0.45	0.1350	0.0260	0.1010	0.0200	0.0051	0.0004	0.0042	0.0006	0.39	33.1	2.8	96.0	18.0	2170.0	320.0	33.1	2.8	65.5
GM-31_7	70.5	42.3	0.60	0.2240	0.0550	0.1750	0.0470	0.0057	0.0008	0.0077	0.0014	0.15	36.8	4.8	169.0	42.0	2840.0	580.0	36.8	4.8	78.2
GM-31_16	62.2	42.2	0.68	0.2910	0.0500	0.2170	0.0260	0.0059	0.0006	0.0071	0.0008	-0.21	37.7	3.5	197.0	21.0	3300.0	270.0	37.7	3.5	80.9
GM-31	59.7	28.1	0.47	0.2540	0.0410	0.2120	0.0250	0.0064	0.0006	0.0080	0.0011	-0.01	41.3	3.5	193.0	21.0	3130.0	270.0	41.3	3.5	78.6
GM31_23m	2312	1175	0.51	0.0480	0.0019	0.0289	0.0010	0.0044	0.0001	0.0014	0.0000	0.07	28.6	0.5	29.0	1.0	102.0	85.0	28.6	0.5	1.4
GM31_23m_1	140.3	73.3	0.52	0.1790	0.0230	0.1320	0.0150	0.0056	0.0003	0.0046	0.0005	0.01	36.0	2.1	125.0	13.0	2530.0	230.0	36.0	2.1	71.2
GM31_23m_10	113.3	49.5	0.44	0.0640	0.0170	0.0320	0.0079	0.0042	0.0003	0.0021	0.0004	-0.29	26.9	2.1	31.6	7.7	370.0	480.0	26.9	2.1	14.9
GM31_23m_2	885	892	1.01	0.0724	0.0053	0.0456	0.0033	0.0046	0.0001	0.0017	0.0001	0.08	29.4	0.9	45.3	3.2	990.0	140.0	29.4	0.9	35.1
GM31_23m_3	195.3	91.1	0.47	0.0570	0.0120	0.0380	0.0070	0.0047	0.0003	0.0019	0.0002	-0.02	30.2	2.0	37.6	6.9	440.0	400.0	30.2	2.0	19.7
GM31_23m_4	103.4	46	0.44	0.0510	0.0170	0.0331	0.0097	0.0045	0.0004	0.0015	0.0004	0.15	28.6	2.3	32.5	9.5	0.0	550.0	28.6	2.3	12.0
GM31_23m_5	40.4	21.73	0.54	0.2080	0.0680	0.1330	0.0380	0.0057	0.0006	0.0052	0.0011	-0.01	36.7	3.8	120.0	33.0	1480.0	800.0	36.7	3.8	69.4
GM31_23m_6	107	58.5	0.55	0.0760	0.0170	0.0500	0.0110	0.0048	0.0004	0.0018	0.0004	-0.06	30.8	2.6	49.0	11.0	1040.0	420.0	30.8	2.6	37.1
GM31_23m_7	75.2	54.2	0.72	0.1270	0.0330	0.0770	0.0170	0.0046	0.0003	0.0015	0.0004	-0.09	29.7	2.1	74.0	16.0	1720.0	500.0	29.7	2.1	59.9
GM31_23m_8	710	310	0.44	0.0486	0.0050	0.0286	0.0029	0.0043	0.0002	0.0013	0.0001	0.02	27.9	0.9	28.6	2.8	90.0	210.0	27.9	0.9	2.6
GM31_23m_9	122	123	1.01	0.0560	0.0150	0.0341	0.0087	0.0046	0.0003	0.0018	0.0002	0.05	29.7	1.7	33.6	8.5	120.0	480.0	29.7	1.7	11.6

GM31_32m	121.8	68.1	0.56	0.2150	0.0370	0.1790	0.0410	0.0058	0.0006	0.0062	0.0012	0.66	37.2	3.6	165.0	35.0	2860.0	300.0	37.2	3.6	77.5
GM31_32m_1	114.5	48.5	0.42	0.1060	0.0170	0.0700	0.0100	0.0049	0.0002	0.0033	0.0004	-0.09	31.2	1.6	67.9	9.8	1690.0	310.0	31.2	1.6	54.1
GM31_32m_2	132.8	82.57	0.62	0.0590	0.0160	0.0353	0.0093	0.0042	0.0003	0.0015	0.0003	-0.30	27.0	2.0	35.0	9.2	400.0	600.0	27.0	2.0	22.9
GM31_32m_3	104.6	48.2	0.46	0.1670	0.0240	0.1210	0.0130	0.0056	0.0003	0.0053	0.0005	-0.16	35.8	1.9	115.0	12.0	2510.0	220.0	35.8	1.9	68.9
GM31_32m_4	158.4	111.1	0.70	0.0500	0.0100	0.0314	0.0061	0.0044	0.0002	0.0014	0.0001	-0.24	28.0	1.2	31.2	6.0	140.0	380.0	28.0	1.2	10.3
GM31_32m_5	743	364.8	0.49	0.0558	0.0038	0.0349	0.0023	0.0045	0.0001	0.0017	0.0001	0.01	29.2	0.6	34.8	2.2	450.0	150.0	29.2	0.6	16.2
GM31_32m_6	358	291	0.81	0.0747	0.0094	0.0432	0.0040	0.0044	0.0001	0.0018	0.0001	-0.20	28.5	0.9	44.3	4.6	950.0	250.0	28.5	0.9	35.7
GM31_32m_7	101	58.3	0.58	0.1270	0.0240	0.0990	0.0200	0.0053	0.0005	0.0038	0.0007	0.14	34.1	3.3	95.0	19.0	2060.0	380.0	34.1	3.3	64.1
GM31_32m_8	98.6	57.9	0.59	0.0850	0.0210	0.0520	0.0130	0.0047	0.0003	0.0025	0.0003	-0.21	29.9	2.2	51.0	12.0	920.0	530.0	29.9	2.2	41.4