

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**  
**CENTRO DE GEOCIENCIAS**

**ESTUDIO NEOTECTÓNICO DE LA FALLA AGUA FRÍA, EN LA PARTE  
CENTRAL DEL CINTURÓN VOLCÁNICO TRANS-MEXICANO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:  
ALMA DELIA LAGUNAS OCON

TUTOR PRINCIPAL:  
DR. PIERRE LACAN (UNAM, CENTRO DE GEOCIENCIAS)

MIEMBROS DEL COMITÉ:

Dr. Francisco Ramón Zúñiga Dávila-Madrid (UNAM, Centro de Geociencias)  
Dr. Luca Ferrari (UNAM, Centro de Geociencias)  
Dra. María Ortuño (Universidad de Barcelona)  
Dr. Ángel Francisco Nieto-Samaniego (UNAM, Centro de Geociencias)

JURIQUILLA, QRO. SEPTIEMBRE 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



“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 media mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, ó referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long vertical stroke extending downwards.

## *Dedicatoria*

A mis padres: David y Teresa

A mis hermanos: David, Guadalupe y Daniel

A mis sobrinos: Jade, Ryo y Axel

A mis amigos: Aurea, Ari-zhaell y Gerardo

A mi asesor de tesis: Dr. Pierre Lacan

Un agradecimiento infinito a mi papá porque aún en contra de su voluntad y de que él muchas veces no ha estado de acuerdo, me ha dejado tomar mis decisiones y me ha apoyado como nadie, cuando es necesario me da apoyo económico y cuando lo necesito también está ahí para guiarme y regañarme, te agradezco mucho papá que me hayas apoyado para tener una maestría.

*“El 10 % de mis logros se le atribuye a mi capacidad, el 90 % es el resultado del trabajo duro”*

## *Agradecimientos*

El mayor de mis agradecimientos es al Dr. Pierre Lacan, por confiar en mí, aún cuando hasta yo dudaba de mis capacidades, por su gran talento, conocimiento en neotectónica y paleosismología, desde luego por su gran humanidad y corazón.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por permitirme formar parte de su matrícula durante la maestría en Ciencias de la Tierra.

Al proyecto *PAPIIT IA102317*, otorgado al doctor Pierre Lacan y con el cual fue financiada la tesis: “Estudio neotectónico de la falla agua fría, en la parte central del Cinturón Volcánico Trans-mexicano”.

Al *CONACYT* por el apoyo otorgado a través de la beca que me fue asignada, durante los dos años de estadía en la maestría.

A los Doctores: Pierre Lacan; Ramón Zúñiga; Lucía Capra; Gerardo Carrasco; Tim Lawton; Luca Ferrari; Roberto Molina; Alexander Iriondo; Víctor Hugo Márquez; Velio Covellio; Mariano Cerca; Norma Eugenia García; Marina Vega y a los M. C. Carolina Muñoz; Gabriela Hernández y Rodrigo León: por las enseñanzas de cada disciplina que me fue impartida.

A los asistentes de posgrado: Blanca Rendón y Armando Ramírez; muchas gracias por todo el apoyo en cuanto el papeleo durante toda mi estancia en el Centro de Geociencias.

A mis compañeros del Centro de Geociencias: Alexis, Coste, Raúl, Sandra, Gio, Brian, Víctor, Andrea Gaby y Erika por hacer muy ameno el tiempo de maestría, gracias.

RESUMEN	10
<b>1. Introducción</b>	
1.1 Generalidades	12
1.2 Localización del Área de Estudio	12
1.3 Justificación	13
1.4 Objetivos	14
1.5 Hipótesis	14
<b>2. Marco Geológico y Antecedentes</b>	
2.1 El Cinturón Volcánico Trans-Mexicano(CVTM)	16
2.2 Sistema de Fallas Chapala-Tula (SFCT)	16
2.3 El Campo Volcánico Los Azufres	20
2.3.1 Geología y Geomorfología	21
2.3.2 Análisis Geomorfológico de la Falla Agua Fría (FAF)	27
2.3.3 Estudio Paleosimológico del segmento norte de la Falla Agua Fría	28
<b>3. Metodología</b>	
3.1 Trabajo Bibliográfico	30
3.2 Estudio Geomorfológico	30
3.3 Estudio de Paleosismología	31
3.4 Trabajo de campo Preliminar a la Excavación	33
3.5 Excavación de Trincheras	33
3.5.1 Apertura de las Trincheras	34
3.5.2 Trabajo dentro de las trincheras	35
3.5.2.1 Limpiar las paredes	35

3.5.2.2	<i>Colocación de una malla de referencia</i>	35
3.5.2.3	<i>Marcar horizontes y toma de muestras</i>	36
3.5.2.4	<i>Fotografía y dibujo de las trincheras</i>	36
3.6	<i>Digitalización</i>	37
3.7	<i>Interpretación</i>	37
3.8	<i>Dataciones</i>	38
<b>4.</b>	<b>Resultados del Estudio Paleosismológico</b>	
<b>4.1</b>	<b><i>Trinchera Agua Fría 1</i></b>	<b>40</b>
4.1.1	<i>Estratigrafía</i>	40
4.1.2	<i>Deformaciones tectónicas, análisis por retro-deformación</i>	45
4.1.3	<i>Interpretación</i>	47
<b>4.2</b>	<b><i>Trinchera Agua Fría 2</i></b>	<b>48</b>
4.2.1	<i>Estratigrafía</i>	48
4.2.2	<i>Deformaciones tectónicas, análisis por retro-deformación</i>	53
4.2.3	<i>Interpretación</i>	55
<b>4.3</b>	<b><i>Trinchera Agua Fría 4</i></b>	<b>57</b>
4.3.1	<i>Estratigrafía</i>	57
4.3.2	<i>Deformaciones tectónicas y análisis por retro-deformación</i>	62
4.3.3	<i>Interpretación</i>	64
4.4	<i>Dataciones</i>	65
<b>5.</b>	<b>Discusión</b>	
5.1	<i>Dataciones y correlación de los eventos entre trincheras</i>	68



5.1.1 <i>Trinchera Agua Fría 2</i>	69
5.1.2 <i>Trinchera Agua Fría 3A</i>	70
5.1.3 <i>Trinchera Agua Fría 3C</i>	71
5.1.4 <i>Trinchera Agua Fría 4</i>	71
5.1.5 <i>Eventos</i>	72
5.2 <i>Estimación de parámetros paleosismológicos</i>	73
5.2.1 <i>Intervalo de recurrencia o retorno (Ciclo Sísmico)</i>	73
5.2.2 <i>Paleomagnitudes</i>	73
5.2.2.1 <i>Relación de Wells y Coopersmith (1994)</i>	74
5.2.2.2 <i>Relación de Wesnousky (2008)</i>	75
5.2.2.3 <i>Relación de Hanks y Kanamori (1979)</i>	76
5.3 <i>Comparación de las paleomagnitudes</i>	78
<b>6. Conclusiones</b>	<b>79</b>
<b>7. Bibliografía.</b>	<b>81</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de localización CVLA	14
Figura 2 Principales sistemas de Fallas CVTM	17
Figura 3 Mapa con trazas morfológicas de las fallas en el CVTM	18
Figura 4 Sismos importantes en el CVTM	19
Figura 5 Mapa Digital de Elevación (DEM) El Graben de Acambay	20
Figura 6 Mapa Geológico Superficial del CVLA	23
Figura 7 Mapa Morfo-tectónico del CVLA	25
Figura 8 Perfiles Topográficos FAF	26
Figura 9 Logs Interpretativos de SNFA	29
Figura 10 Esquema rango de edades estudios neotectónicos	32
Figura 11 Fotografía de excavación de la trinchera	33
Figura 12 Fotografía del afloramiento de la trinchera “Agua Fría 1”	34
Figura 13 Fotografía de la trinchera	35
Figura 14 Fotografía del trabajo de la limpieza de las paredes	35
Figura 15 Fotografía de la malla de referencia	35
Figura 16 Fotografía ilustrando la recolección de muestras	36
Figura 17 Fotografía del trabajo de dibujo en las paredes de la trinchera	36
Figura 18 Localización de la cuenca Llano Grande	40
Figura 19 Fotolog Trinchera Agua Fría 1	42
Figura 20 Columna estratigráfica de la Trinchera Agua Fría 1	44
Figura 21 Análisis por retro-deformación Trinchera Agua Fría 1	46
Figura 22 Fotolog Trinchera Agua Fría 2 W	49
Figura 23 Fotolog Trinchera Agua Fría 2 E	52
Figura 24 Columna Estratigráfica Trinchera Agua Fría 2	51
Figura 25 Análisis por retro-deformación Trinchera Agua Fría 2 W	54
Figura 26 Fotolog Trinchera Agua Fría 4 W	58
Figura 27 Fotolog Trinchera Agua Fría 4 O	59
Figura 28 Columna estratigráfica Trinchera 4	61
Figura 29 Análisis por retro-deformación Trinchera Agua Fría 4 W	63
Figura 30 Línea del tiempo	69

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Sumario de parámetros morfométricos de las Fallas en el CVLA	24
Tabla 2	Descripción de la Litología Trinchera Agua Fría 1	43
Tabla 3	Descripción de la Litología Trinchera Agua Fría 2	51
Tabla 4	Descripción de la Litología Trinchera Agua Fría 4	60
Tabla 5	Resultado de dataciones	65
Tabla 6	Edades calibradas	68
Tabla 7	Estimación de paleomagnitudes	78

## RESUMEN

El Campo Volcánico Los Azufres (CVLA) se localiza en la parte Central del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), a 200 km al noroeste de la Ciudad de México, dentro del Estado de Michoacán y forma parte del conjunto de centros volcánicos silícicos del Pleistoceno con sistemas geotérmicos activos. El CVLA se ve afectado por fallas normales E-W de alto ángulo, entre de las que se encuentra la falla Agua Fría (FAF), objeto del presente estudio.

La parte central del CVTM ha sido escenario de sismos corticales destructivos, generados por la actividad de fallas someras como, por ejemplo, el sismo de Acambay de 1912.

En los últimos años, los grupos de neotectónica del Centro de Geociencias de la UNAM y de la Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo decidieron extender los estudios de paleosismología a fallas del CVTM para las cuales no había evidencias de sismos mayores en el registro sísmico instrumental e histórico. Es en este contexto que se decidió hacer un estudio neotectónico de la FAF para evaluar y caracterizar su potencial sismogénico. El objetivo final de tales estudios es de ampliar el catálogo sísmico para evaluar el peligro sísmico que representan este tipo de fallas en la zona.

A partir del estudio geomorfológico, se caracterizó la FAF como una estructura de orientación general E-W; con una longitud de traza de 15 km que podría extenderse hasta 27 km, un índice de sinuosidad  $S=1.04$  y con un rango de entre 130 metros y 10 metros de desnivel. Estas características morfológicas son similares con las que presentan las fallas activas del Graben de Acambay y justifican la importancia de caracterizar la sismicidad prehistórica mediante estudios de paleosismología.

Para fines de este estudio, la falla Agua Fría ha sido dividida en dos segmentos: el segmento sur y el segmento norte. El primer estudio neotectónico, fue llevado a cabo por Campos-Medina (2019) en el segmento norte de la falla y permitió demostrar la persistencia de la actividad sismotectónica de la falla. En este trabajo, completamos el estudio neotectónico de la falla con la excavación e interpretación de tres trincheras paleosismológicas en el segmento sur de la falla, las cuales

permitieron evidenciar tres eventos paleosísmicos preservados en el registro sedimentario. El fechamiento de las unidades desplazadas, y la correlación entre los eventos descubiertos en los dos segmentos de falla ha permitido describir y acotar en el tiempo tres eventos: El evento más antiguo tiene un rango de edades de 15-14 ka B.P. registrado solo en el segmento sur; el segundo evento tiene un rango de 12-4 años B.P. registrado solo en el segmento sur; el tercer evento registrado en ambos segmentos de la falla, presenta un rango de edad de 6-2 ka B.P. Finalmente, a partir de las relaciones empíricas disponibles en la bibliografía y con base en los resultados encontrados, se ha calculado que esta falla, por sus dimensiones, podría producir por sí sola un sismo de magnitud máxima  $M_w = 6.9 \pm 0.2$ , con una recurrencia de 5000 años, y una magnitud aún mayor si se considera la posibilidad de rupturas a lo largo de varias fallas de la zona durante un mismo evento sísmico. De hecho, los desplazamientos encontrados en las trincheras indican que muy posiblemente, tales rupturas múltiples han ocurrido durante el Holoceno. Los resultados obtenidos evidencian la importancia de considerar esta falla en la evaluación del peligro sísmico de esta zona altamente poblada. Sin preparación de la población y de las infraestructuras, un sismo de magnitud cercana a 7 podría provocar grandes pérdidas humanas y materiales en las ciudades vecinas al centro volcánico de Los Azufres, como lo son: Morelia, Ciudad Hidalgo y Maravatío.

## **1. Introducción**

### *1.1 Generalidades*

La República Mexicana se encuentra dentro de una de las zonas sísmicas más activas del mundo. La mayoría de los terremotos ocurren en la zona de subducción del Pacífico, en donde las placas oceánicas de Cocos y Rivera subducen bajo la placa continental Norteamericana. Sin embargo, se han presentado algunos sismos corticales fuertes al interior de la placa continental, en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), como por ejemplo, el sismo de Acambay de 1912 (Urbina y Camacho, 1913). El periodo de recurrencia de estos sismos es de 1000 a 12000 años en las fallas estudiadas hasta la fecha (Langridge et al., 2000, 2013; Sunye-Puchol et al., 2015; Ortuño et al., 2015; 2019; Lacan et al., 2018), por lo tanto, la sismicidad histórica e instrumental es insuficiente para caracterizar la actividad de estas fallas y son requeridos estudios de paleosismología, para poder determinar el riesgo sísmico asociado.

En este proyecto de investigación se ha llevado a cabo un análisis neotectónico del centro volcánico Los Azufres, (localizado en la parte central del CVTM), así como también un análisis paleosismológico del segmento sur de la falla Agua Fría, una de las múltiples fallas que afecta la geomorfología de los Azufres.

### *1.2 Localización del área de Estudio*

El área de estudio se encuentra en la parte central CVTM, a lo largo del sistema de falla Chapala-Tula que se extiende sobre 350 km desde Guadalajara hasta el Graben de Acambay. El Campo Volcánico de Los Azufres se encuentra en la parte oriental del sistema de falla Chapala-Tula, entre los Grabens de Acambay y Morelia-Cuitzeo.

El Campo Volcánico de Los Azufres se encuentra en la parte oriental del sistema de falla Chapala-Tula, entre el graben de Acambay y el semi-graben de Morelia-Cuitzeo.

El Campo Volcánico Los Azufres se localiza a unos 160 km al oeste-noroeste de la Ciudad de México. Forma parte de una serie de centros volcánicos silícicos del Pleistoceno con sistemas geotérmicos activos que yacen dentro del CVTM (Figura 1). Se encuentra afectado por un conjunto de fallas normales de alto ángulo, con orientación norte-noroeste, (Dobson, y Mahood, . 1985).

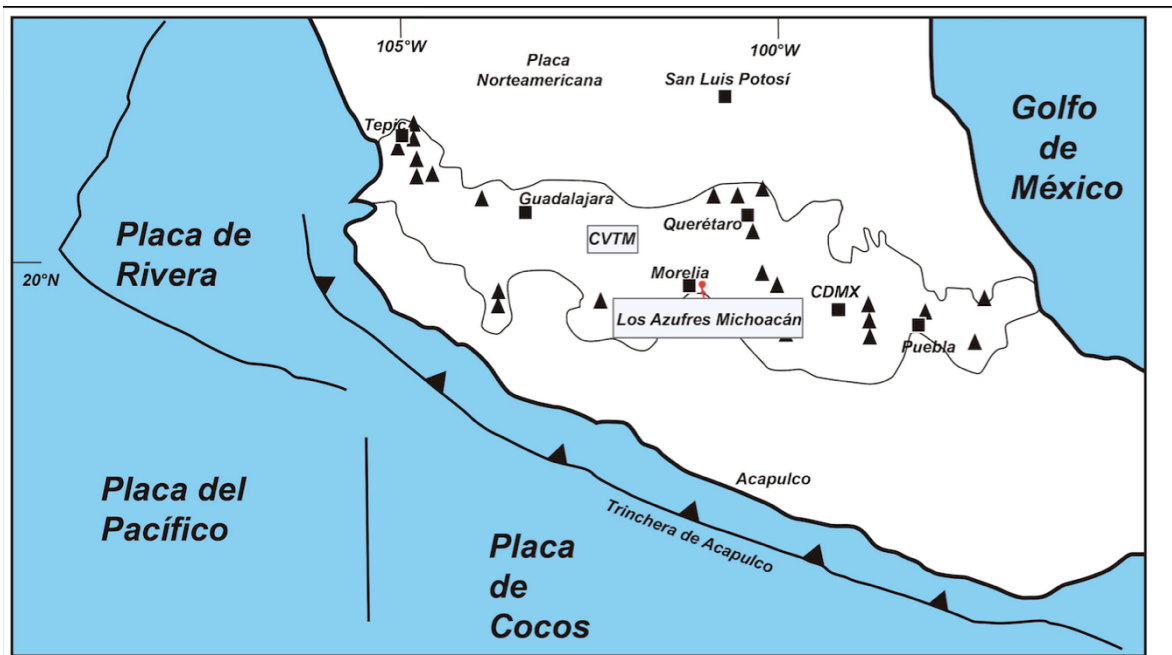


Figura 1: Mapa de localización del Campo Volcánico Los Azufres (Azufres, Michoacán), situado en la parte central del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM). Muestra los principales centros volcánicos del CVTM. Tomado y editado de Ferrari (2000).

### 1.3 Justificación

En este trabajo se propone estudiar y caracterizar el segmento sur de la falla Agua Fría, una de las fallas más largas del campo volcánico de los Azufres y potencialmente con la capacidad de generar sismos de una magnitud importante. El estudio de esta falla se justifica por la cercanía de esta con varias ciudades con un crecimiento poblacional importante y la presencia de la segunda planta geotérmica en generar energía eléctrica en México, tiene una capacidad instalada de 188 WM y produce energía a Morelia, Acámbaro, Ciudad Hidalgo y al resto del

país (30% del total de la energía eléctrica que se produce a través de la geotermia en el país).

#### *1.4 Objetivos*

El objetivo principal de esta tesis es caracterizar la actividad tectónica del segmento sur de la falla Agua Fría, buscando evidencias geológicas de las rupturas superficiales pleistocenas en el registro tectono-sedimentario reciente.

A largo plazo, el objetivo secundario es ampliar el catálogo sísmico de la región hasta tiempos prehistóricos, lo que permitirá conocer la magnitud y el periodo de recurrencia de sismos antiguos.

#### *1.5 Hipótesis*

Con el estudio paleosismológico del segmento norte de la falla Agua Fría, Campos-Medina, (2019) ha podido demostrar que este segmento de falla es activo y capaz de producir sismos mayores ( $M >> 5$ ). Sin embargo, no se ha podido calcular el ciclo sísmico ni fechar la ruptura encontrada. Con el estudio de tres nuevas trincheras en el segmento sur de la falla agua fría y el fechamiento de los diferentes eventos encontrados, se pretende caracterizar de manera acotada el peligro sísmico estimado asociado a esta falla obteniendo la edad de los eventos sísmicos prehistóricos, estimando así el ciclo sísmico de la falla y las relaciones entre los segmentos de la falla.



## 2. Marco Geológico y Antecedentes

### 2.1 El Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM)

El CVTM (Mooser, 1972), constituye uno de los rasgos más característicos de la geología de México. Es un arco volcánico que se desarrolla sobre el margen sudoccidental de la Placa Norteamericana como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos, a lo largo de la fosa Mesoamericana (Ferrari, 2000). El CVTM es un arco magmático continental, constituido por alrededor de 8000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos, que se extiende desde las costas del Pacífico, en Nayarit y Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Veracruz Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). Esta provincia tiene aproximadamente 1000 km de longitud y una amplitud que varía entre los 80 y 230 km. Tiene dirección preferencial E-W formando un ángulo cercano a los 16° con respecto a la fosa Mesoamericana (Ortega-Gutiérrez et al., 1992).

A lo largo del CVTM se han documentado arreglos lineales de estructuras que forman sistemas de fracturas y fallas que cortan rocas de edad Plioceno-Cuaternario (Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Suter et al., 2001).

Debido a su complejidad, tanto geológica como tectónica, el CVTM ha sido dividido por varios autores en tres sectores: el sector occidental; el sector central y el sector oriental (Demant, 1978; Pasquaré et al., 1988) (Figura 2). La porción occidental corresponde al bloque de Jalisco, limitado al norte por el sistema de fallas Tepic-Zacoalco y al sureste por el sistema de fallas del graben de Colima. Al este del bloque de Jalisco, el punto triple entre los sistemas de fallas de Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala marca el principio del sector central del CVTM, el cual se extiende sobre 420 km hasta la parte noroeste de la Ciudad de México (Alaniz-Álvarez et al., 2002). Desde el punto de vista tectónico, el sector central del CVTM se caracteriza por la presencia de muchas de fallas Plio-cuaternarias de dirección preferencial E-W que definen el sistema de falla Chapala-Tula. La porción oriental del CVTM corresponde a la parte localizada entre la parte noroeste de la Ciudad de México y el Golfo de México. Este sector no presenta evidencias morfológicas de fallas

cuaternarias sin embargo, la ocurrencia del sismo de Xalapa en 1920 atestigua de la persistencia de la actividad tectónica en esta zona (Suarez, 1992).

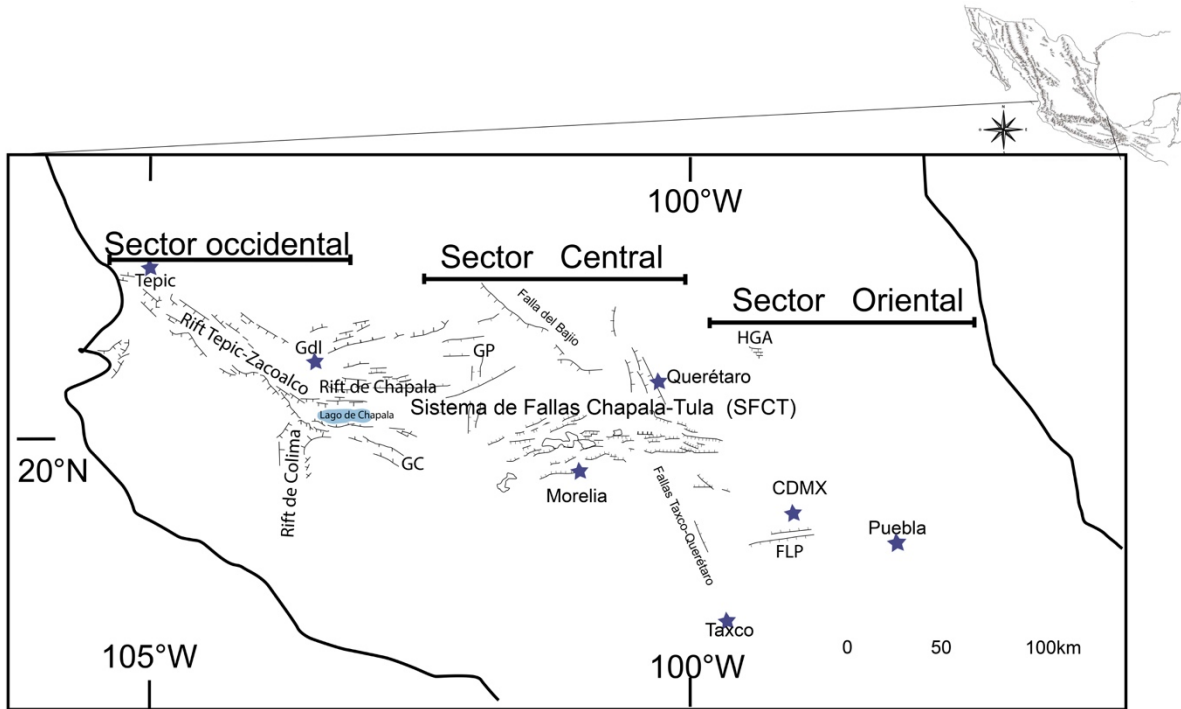


Figura 2: Principales sistemas de fallas que afectan al CVTM (Basado en Ferrari y Rosas-Elguera, 1999; Ferrari et al., 1999; Alaniz-Alvarez et al., 1998). GC: Graben de Cotija; Gp: Graben de Penjamillo; HGA: Semigraben de Aljibes; FLP: Falla la Pera. Tomado y editado de Ferrari L (2000).

## 2.2 Sistema de Fallas Chapala-Tula (SFCT)

El sistema de fallas Chapala-Tula (SFCT) tiene una extensión de 420 km y orientación E-W. Está constituido por fallas normales E-W, con desplazamientos de varios cientos de metros, se extiende desde el Lago de Chapala hasta la parte noroeste de la CDMX (Johnson y Harrison, 1990).

En el SFCT se han descrito varias depresiones tectónicas, dentro de las que destacan: el graben de Cuitzeo, el graben de Acambay, el medio graben de Aljibes y el graben del Mezquital (Suter et al., 2001).

Los estudios de geología estructural indican que el fallamiento del SFCT ocurrió entre el Mioceno y Plioceno (Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Suter et al., 1992, 1995b; Norato-Cortéz, 1998).

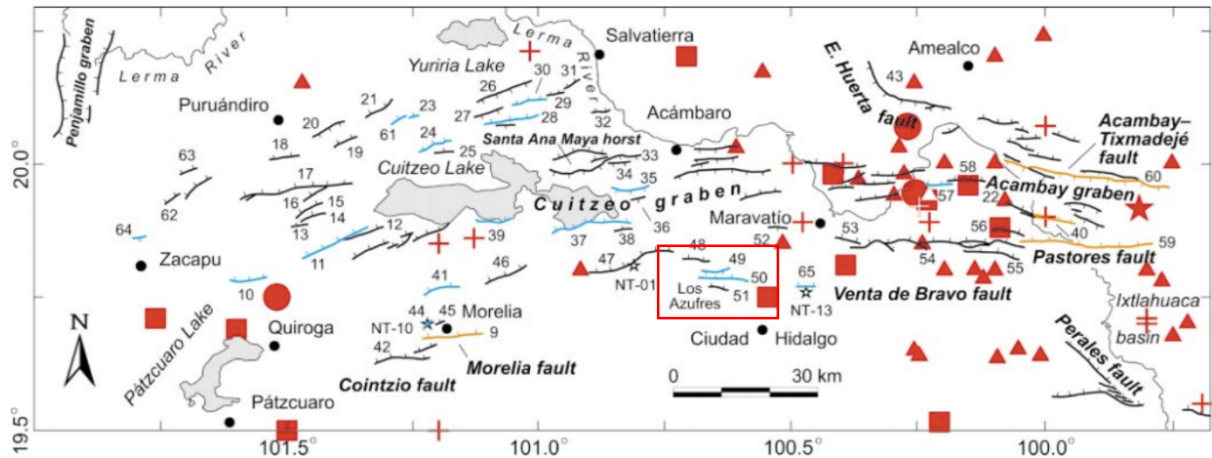


Figura 3: El mapa muestra las trazas morfológica de las fallas normales potencialmente activas, mayores a 2 km de largo, en la parte central del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. Muestra la existencia de eventos potencialmente destructivos, así como eventos sísmicos corticales. Modificado de Suter et al., (2001).

El sismo de Acambay de 1912 (Urbina y Camacho: 1913), con una Magnitud cercana a 7 (Suter et al., 2001), evidenció la persistencia de la actividad tectónica en el SFCT (Figura 3).

Después de este evento varios estudios han sido llevados a cabo para conocer y caracterizar la actividad Neotectónica/sísmica de este sistema de fallas.

Los datos del catálogo sísmico indica una tasa de sismicidad relativamente baja, en el SFCT (Norini G., et al., 2010 ; Zúñiga et al., 2019); sin embargo, los sismos históricos de Chapala 1847; (Suter, 2018), de Acambay 1912 (Urbina y Camacho, 1913) y el de Maravatío 1979; (Astiz Delgado, 1980), indican la persistencia de eventos potencialmente destructivos en tiempos históricos (Figura 4).

Basado en estas observaciones, estudios de neotectónica han sido llevados a cabo para demostrar y cuantificar la actividad cuaternaria de las fallas de la región ( Suter et al., 1992; 1995; 1996; 2001). Estos estudios permitieron caracterizar la edad de las deformaciones, la longitud y las dimensiones de las fallas, así como estimar una tasa de deslizamiento entre 0.07 y 0.02 mm/año, durante el Cuaternario.

A partir de este siglo se iniciaron los estudios de paleosismología en la parte central del CVTM con el trabajo de Langridge et al. (2000) sobre la falla Acambay-Tixmadejé, responsable del sismo de Acambay de 1912. A partir de esta fecha se

multiplicaron los estudios de paleosismología caracterizando la mayor parte de las fallas del Graben de Acambay (Langridge et al., 2013; Lacan et al., 2013; 2018; Sunye-Puchol et al., 2015; Ortuño et al., 2015; 2019) así como varias fallas de la zona Morelia-Cuitzeo (Garduño-Monroy et al., 2009; Suter, 2016).

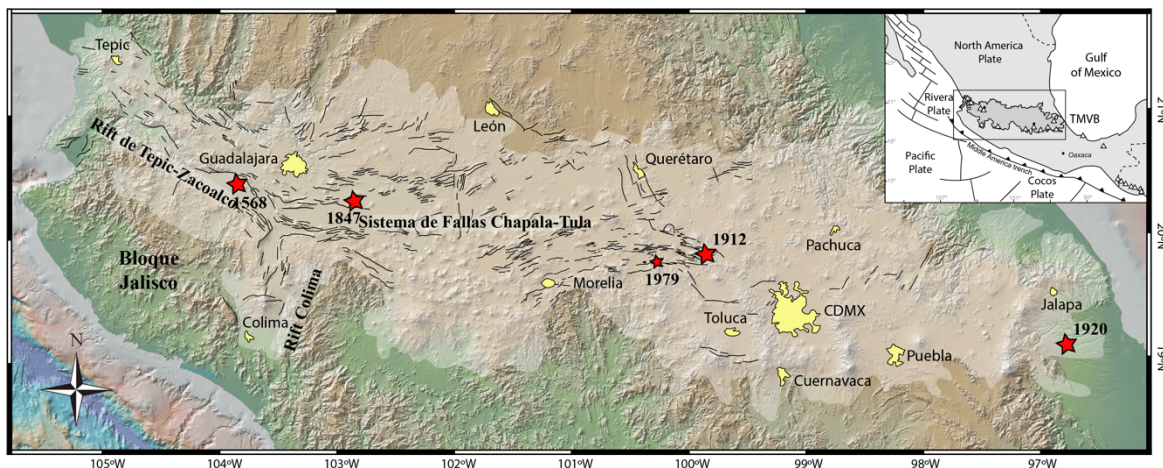


Figura 4: La imagen muestra los sismos potencialmente destructivos en tiempos históricos, dentro CVTM. Las estrellas indican los epicentros. Tomado y modificado de Zúñiga et al., (sometido).

Estos estudios permitieron identificar varias paleo-rupturas en las fallas del SFCT, incluyendo rupturas en fallas para las cuales la actividad tectónica holocénica era desconocida. Con base a estos resultados, se ha podido calcular una tasa de deslizamiento por falla de 0.03 a 0.3 mm/año, y un tiempo de recurrencia de sismos de magnitud superior a 6 en fallas individuales entre 900 y 14,000 años. Para determinar la magnitud máxima es importante tomar en cuenta la posibilidad de rupturas múltiples, porque existen varios ejemplos de sismos históricos en la parte central del CVTM que no corresponden a la ruptura de la falla única, sino a la ruptura simultánea de varias fallas superando las magnitudes esperadas, como es el caso del sismo de Ameca (Suter, 2015) y el sismo de Acambay de 1912 (Urbina y Camacho, 1913).

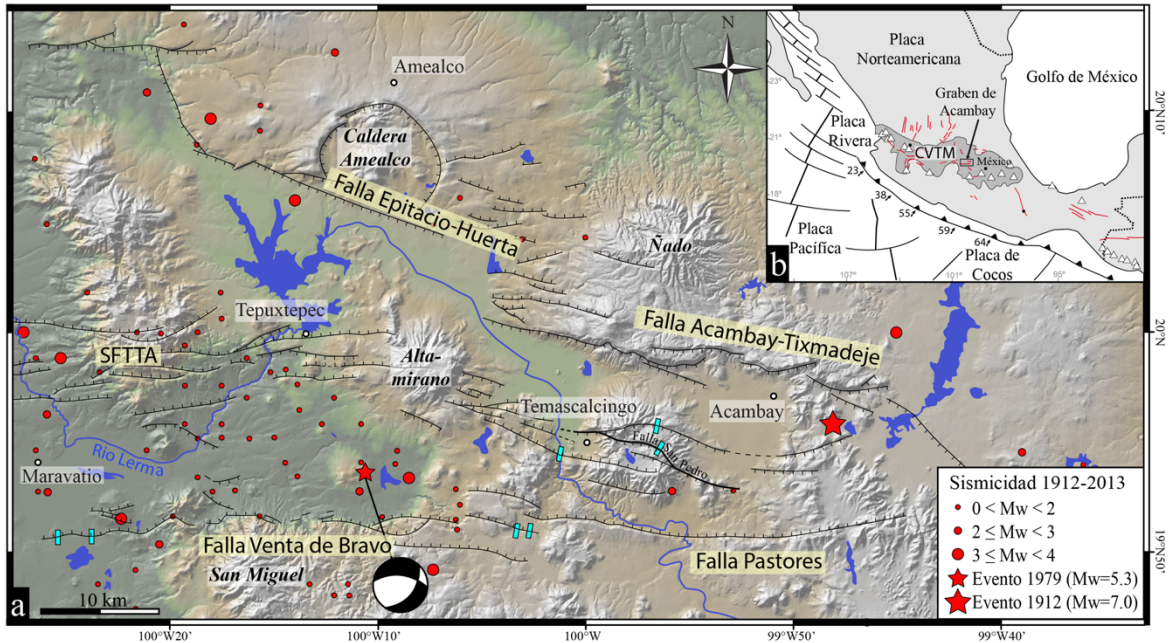


Figura 5: Mapa Digital de Elevación (DEM) del Graben de Acambay, La Figura “a” ilustra: Las fallas normales de la cuenca tectónica, los edificios volcánicos y la sismicidad del Graben de Acambay . La Figura “b” muestra el mapa de localización del Graben de Acambay. Tomado de Lacan (2013).

A partir de los resultados obtenidos, se ha interpretado que la mayoría de las fallas E-W de la parte central del CVTM, tienen una capacidad de generar sismos con magnitudes superiores a 6 y dada la elevada densidad de población de la zona puede inducir un riesgo sísmico elevado, justificando así el hecho de desarrollar los estudios de neotectónica y paleosismología (Figura 5).

### 2.3 El Campo Volcánico Los Azufres

El Campo Volcánico de los Azufres se localiza en el sector Central del CVTM, al NW del estado de Michoacán. Tiene un área aproximada de 676 km<sup>2</sup>, con una elevación máxima de 3200 msnm (Volcán San Andrés), y una mínima de 2140 m.s.n.m. (Ciudad Hidalgo). Está constituido por varias estructuras volcánicas, como lo son: estratovolcanes, domos (Los Azufres), conos de ceniza, depósitos piroclásticos y flujos de lava; presentan composición química variada, que va desde basaltos hasta rolitas. La actividad volcánica inició hace ~1.5 m.a y la última

actividad registrada fue hace hace < 26,000 años A.P. con la emisión de productos piroclásticos (Pradal y Robin 1985; Ferrari et al., 1991;1993).

En el Estado de Michoacán se han registrado sismos intraplaca, ligados a fallas geológicas que se generan en la corteza (sismos de Maravatío 1979 y 1999), con profundidades menores a los 30 km (Astiz-Delgado, 1980; Garduño-Monroy et al., 2001).

Durante los años 1845 y 1872 la región de los Azufres se vio afectada por una crisis sísmica, generando que la población civil pidiera apoyo a las autoridades (Urquiza 1872; Ramírez y Reyes 1873).

En el periodo que comprende los años del 2003-2005, el monitoreo sísmico realizado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en el Campo Volcánico Los Azufres detectó 117 microsismos de Magnitudes 0.1-0.8. La profundidad de estos sismos fue variable, sin sobrepasar los 17 km. Se considera que el origen de estos sismos podría ser: tectónico, ó de tipo armónico (relacionado con el movimiento de fluidos en pozos cercanos a algunas estaciones de monitoreo) (Valdés-Gonzáles y Pérez-Esquivas, 2007; Lermo et al., 2009; Valdés Gonzáles, 2009). Para el periodo de noviembre del 2011 a octubre del 2012, se localizaron 121 microsismos de tipo tectónico, en las cercanías del campo según Cruz-Noé et. al., (2013).

### *2.3.1 Geología y Geomorfología*

El Campo Volcánico Los Azufres ha sido estudiado por varios autores, quienes han descrito su geología detalladamente (e.g. De la Cruz et al., 1983; Dobson y Mahood 1985; Cathelineau et al., 1988; Ferrari et al., 1991; Gómez-Vasconcelos et. al., 2015; Rangel, E. et. al., 2012; y Pradal y Robin, 1994). Estos autores han propuesto una división de la litología en varias unidades geológicas principales (Figura 6):

- a) Unidad Andesítica Mil Cumbres: Está unidad se encuentra en toda la zona y es la unidad más gruesa con aproximadamente 3000 m, es considerada como el basamento local. Esta constituida por una sucesión compuesta por

depósitos de precipitación y oleadas piroclásticas. Estos a su vez, están cubiertos por una ignimbrita masiva en tono rosado. Las rocas en esta secuencia varían en su composición, desde andesita hasta dacita (Macías et al., 2008).

- b) Unidad de Riolita Agua Fría: La parte central del basamento es cubierto por esta unidad, misma que está constituida por domos de lava y flujos fragmentados de riolita con bandas de flujo y esférulas. La edad de esta unidad varia entre 1.6 a 0.84 millones de años (Dobson y Mahood 1985).
- c) Unidad de Dacita San Andrés: Está unidad sobreyace las unidades anteriores y aflora en la parte este del campo. Esta compuesta por dacitas con bandas de flujo, fenocristales de plagiclasas e inclusiones afaníticas. La edad de esta unidad oscila entre 0.36 a 0.33 millones de años (Dobson y Mahood 1985).
- d) Unidad de Riolita Yerbabuena: Esta unidad consiste en domos de riolitas ricas en sílice, riodacitas y material de caída libre, se encuentran en la parte oeste del campo. La edad de esta unidad varia de 0.3 millones de años a 0.14 millones de años (Dobson y Mahood 1985).
- e) Unidad Dacita Tejamaniles: Son lavas jóvenes que se encuentran en el sector sur del Campo, sobrepuestas a la unidad Agua Fría (Pérez Esquivias et al., 2010).
- f) Depósitos de flujo, de piedra pómez: Se considera que esta unidad incluye una variedad de depósitos piroclásticos que se han originado a partir de una actividad volcánica relativamente joven en las cercanías del campo (Pérez Esquivias et al., 2010).
- g) Sedimentos: En las cuencas y valles se formaron unidades sedimentológicas como resultado de la alteración de las rocas, la formación de suelos y aluviones (Pérez Esquivias et al., 2010).

De un punto de vista estructural, los estudios realizados por Pérez Esquivias et al., (2010) indican que las fallas del Campo Volcánico Los Azufres, tiene tres tendencias principales: NNO-SSE, NE-SO y E-O (Pérez Esquivias et al., 2010). El primer tipo

de fracturamiento corresponde a una deformación del Mioceno con fallas semi-verticales que afectaron sólo al basamento. Mientras que los otros dos, tienen unas fracturas semi-verticales y sub-horizontales, que afectaron regionalmente a rocas miocénas del basamento y a rocas cuaternarias que afloran en los Azufres (Pérez Esquivias et al., 2010).

Las estructuras con dirección NE-SO son poco visibles en el campo de los Azufres, y se caracterizan por presentar planos de falla casi verticales, aunque existen algunos con inclinaciones cercanas a los 45°.

Las fallas más importantes para la localización de nuevos pozos geotérmicos resultaron ser Marítaro y Agua Fría, de dirección E-O (Pérez Esquivias et al., 2010).

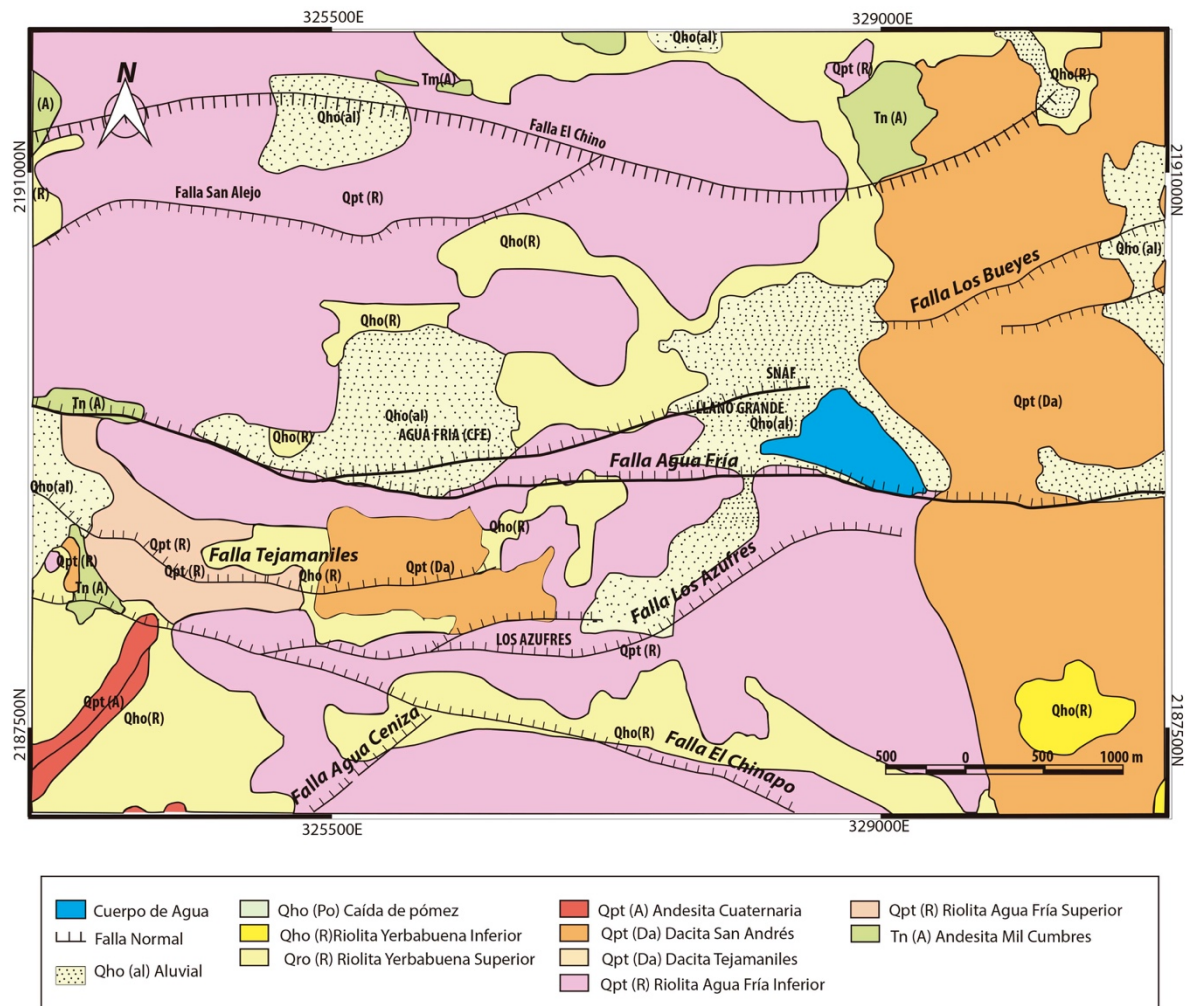


Figura 6: Mapa Geológico superficial del Campo Volcánico Los Azufres. Modificado de Molina, M. 2012 y Campos-Medina (2019).



En el estudio realizado por Campos-Medina, (2019) en el Campo Volcánico Los Azufres se logró identificar trece fallas normales con trazas morfológicas muy marcadas. Particularmente en los sectores septentrional y meridional del Campo Volcánico, se reconocieron tres tendencias estructurales de orientación general E-W, NE-SW, y NW-SE. Se han identificado cuatro fallas principales con dirección E-W que buzcan hacia el norte (El segmento norte de la falla Agua Fría, La falla Agua Fría, La falla Tejamaniles y La falla El Chinapo) y cuatro fallas normales antitéticas de dirección E-O que buzcan hacia el sur (fallas: El Chino, San Alejo, La Bolsa y Los Bueyes) (Campos-Medina, 2019) (Figura 7).

La siguiente tabla muestra los parámetros morfométricos de las fallas en Los Azufres:

<u>Fallas</u>	<u>Dirección General</u>	<u>Buzamiento</u>	<u>Longitud total del frente montañoso (Ls;km)</u>	<u>Longitud en línea recta medida entre los extremos del frente (Ls; km)</u>	<u>Índice de sinuosidad del frente montañoso (Smf) (Bull y McFadden, 1977) Smf= Smf/Ls</u>	<u>Tipo de Falla</u>	<u>Altura máxima del escarpe en metros</u>
<u>Segmento norte de la Falla Agua Fría</u>	E-W	Norte (N)	3.1	3.1	1	Falla Normal	40
<u>Falla Agua Fría</u>	<u>E-W</u>	<u>Norte (N)</u>	<u>15</u>	<u>14.4</u>	<u>1.04</u>	<u>Falla Normal</u>	<u>150</u>
<u>Falla Tejamaniles</u>	E-W	Norte (N)	3.4	3.2	1.05	Falla Normal	40
<u>Falla El Chinapo</u>	E-W	Norte (N)	8.3	8.1	1.02	Falla Normal	150
<u>Falla Maritaro</u>	E-W	Norte (N)	13.1	12.8	1.03	Falla Normal	200
<u>Falla el Chino</u>	E-W	Sur (S)	7.7	7.4	1.04	Falla Normal	120
<u>Falla San Alejo</u>	E-W	Sur (S)	3.8	3.6	1.04	Falla Normal	80
<u>Falla La bolsa</u>	E-W	Sur (S)	3	2.9	1.03	Falla Normal	60
<u>Falla Los Bueyes</u>	E-W	Sur (S)	2.9	2.9	1.01	Falla Normal	40
<u>Falla Los Azufres</u>	NE-SW	NW	4.3	4.1	1.04	Falla Normal	120
<u>Falla Rancho Viejo</u>	NE-SW	NW	2.2	2.2	1.01	Falla Normal	100
<u>Falla Agua Ceniza</u>	NE-SW	NW	2.6	2.5	1.01	Falla Normal	140
<u>Falla Eréndira</u>	NW-SE	NE	0.9	0.9	1	Falla Normal	60

Tabla 1: Sumario de parámetros morfométricos de las fallas en CVLA: Tomada de Campos-Medina(2019)

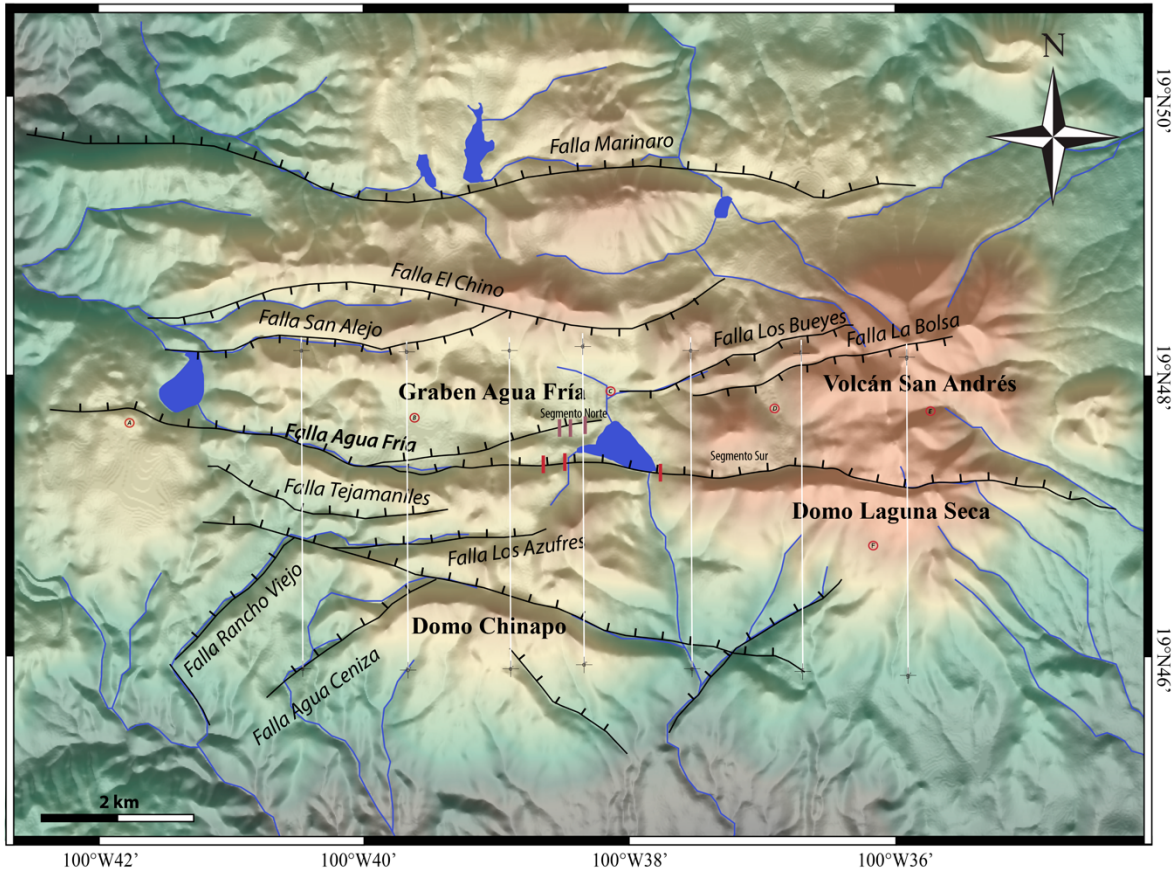


Figura 7: Mapa morfoestructural de lo Azufres. Sistema de coordenadas seleccionado: WGS 84/UTM zona 14. Basado en Campos-Medina, (2019). Los Recuadros en tono rosado indican la localización de las Trincheras 3A, 3B y 3C (Campos-Medina (2019), mientras que los recuadros en tono rojo representan las trincheras Agua Fria 1, Agua Fria 2 y Agua Fria 4, analizadas en este trabajo.

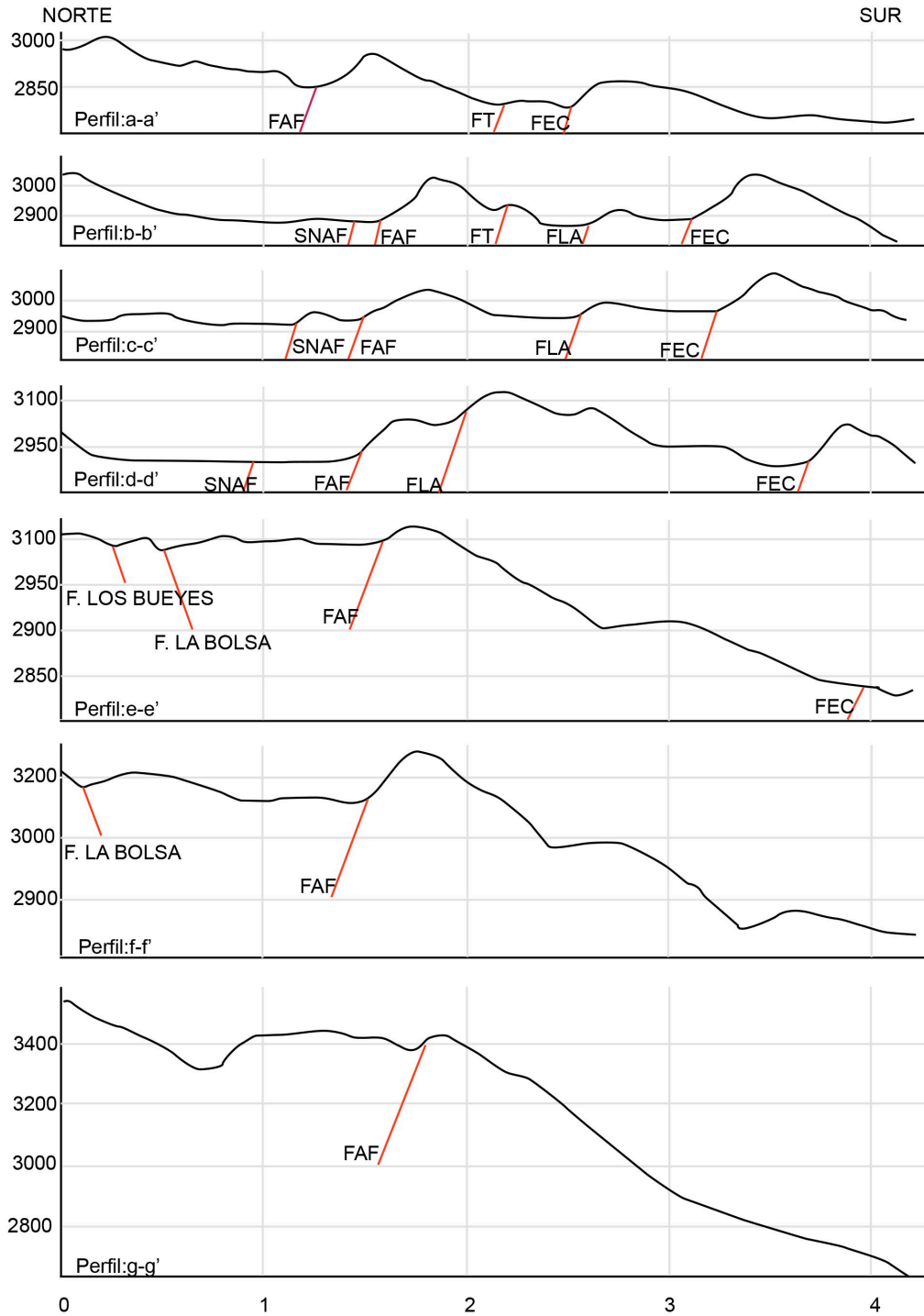


Figura 8: Perfiles topográficos perpendiculares a los escarpes de las fallas, calculados a partir del DEM, a 15 m. del INEGI. Perfiles de la figura X. SNAF: Segmento norte de la falla Agua Fría; FAF: Falla Agua Fría; FT: Falla Tejamaniles; FEC: Falla El Chinapo; F. LA BOLSA: Falla La Bolsa; F. LOS BUEYES: Falla Los Bueyes; FLA: Falla Los Azufres. Altitud en metros, distancia en kilómetros, exageración vertical x 1.5. Tomada de Campos-Medina, (2019).

### 2.3.2 Análisis Geomorfológico de la Falla Agua Fría (FAF)

El análisis geomorfológico de la Falla Agua Fría fue realizado a detalle por Campos-Medina, (2019), donde se destaca lo siguiente.

Tiene una longitud de 15 km de largo (Campos-Medina, 2019), que podría extenderse hasta 27 km. Un índice de sinuosidad  $S= 1.04$  según (Bull y McFadden, 1977). La FAF es una de las fallas más largas, continuas y rectilíneas del conjunto de fallas del Campo Volcánico Los Azufres. El buzamiento que presenta la FAF oscila entre los  $54^\circ$  y  $65^\circ$  hacia el Norte, las pocas estrías que se midieron en uno de los afloramientos indican una cinemática de falla normal, con una componente lateral izquierda (Campos-Medina, 2019). La traza de la falla tiene una orientación general E-W, es rectilínea y con un escarpe topográfico muy marcado en el paisaje, con un rango de entre 130 metros y 10 metros de desnivel (Figura 8).

El extremo oriental de la FAF afecta el complejo volcánico San Andrés (Arce et al., 2012), lo que probablemente generó un colapso en el flanco sur del volcán (Domo Laguna Seca; “F” en la Figura 7). A partir del escarpe morfológico de esta zona, se ha determinado una tasa de deslizamiento de  $0.16 \pm 0.05$  mm/año (Campos-Medina, 2019).

El panorama va cambiando hacia el oeste, justo a nivel de la planta geotérmica “Los Azufres” y el embalse de “Llano Grande”, en donde la actividad de la FAF provoca la formación de las cuencas de Agua Fría, Llano Grande y El Potrero, lo que corresponde al área dada con las letras: (“B”, “C”, y “D” en la Figura 7). La red de drenaje está controlada por el escarpe de la falla en esta zona preservado este último bajo la forma de facetas triangulares o trapezoidales.

Siguiendo la traza de la FAF hacia la parte Occidental, esta corta un flujo de lava (Mesa El Bosque; “A” en Figura 7) y forma escarpes con una altura que oscila entre 20 y 10 metros, considerando esto se ha calculado una tasa de desplazamiento de 0.25 a 0.125 mm/año (Campos-Medina 2019). El Flujo de lava afectado por la traza de la falla es de composición riolítica, según Macías et al., (2008) dicha lava tiene presenta una edad en 0.08 Ma, por lo que la actividad de la falla debería ser más reciente.

El escarpe topográfico tiene su límite en la zona E, sin embargo, se ha sugerido que la traza de la FAF continua en un alineamiento de varios conos monogenéticos hacia Tzintzingareo. En este sitio se ha descrito una falla con la misma orientación y buzamiento (Suter et al., 2001), infiriendo que podría ser la misma falla, acumulando una longitud total de 27 km (Campos-Medina, 2019).

### *2.3.3 Estudio Paleosismológico del Segmento Norte de la Falla Agua Fría (SNAF)*

El primer estudio de paleosismología a lo largo de la falla Agua Fría, fue realizado por (Campos-Medina, 2019), en el segmento norte de la falla Agua Fría. En este trabajo, complementaremos los datos obtenidos en el segmento norte con nuevos datos de paleosismología en el segmento sur con el fechamiento de las unidades en los dos segmentos de la falla.

(Campos-Medina 2019) interpretó a partir de las evidencias encontradas en las tres trincheras paleosismológicas del segmento norte, que la FAF es una estructura sismogénica que ha afectado distintas unidades volcánicas, lacustres y pedológicas, con desplazamientos de origen sísmico. El registro tectono-sedimentario de cada trinchera preservó un desplazamiento vertical de 148 a 175 cm pertenecientes a un solo evento sísmico (Campos-Medina, 2019) (Figura 9).

Teniendo en cuenta las estimaciones de la longitud de ruptura superficial y el desplazamiento vertical cosísmico, se estimó un intervalo de paleomagnitudes sísmicas elevadas de  $6.4 < M_w < 6.9$

Trincheras segmento norte de la falla Agua Fría

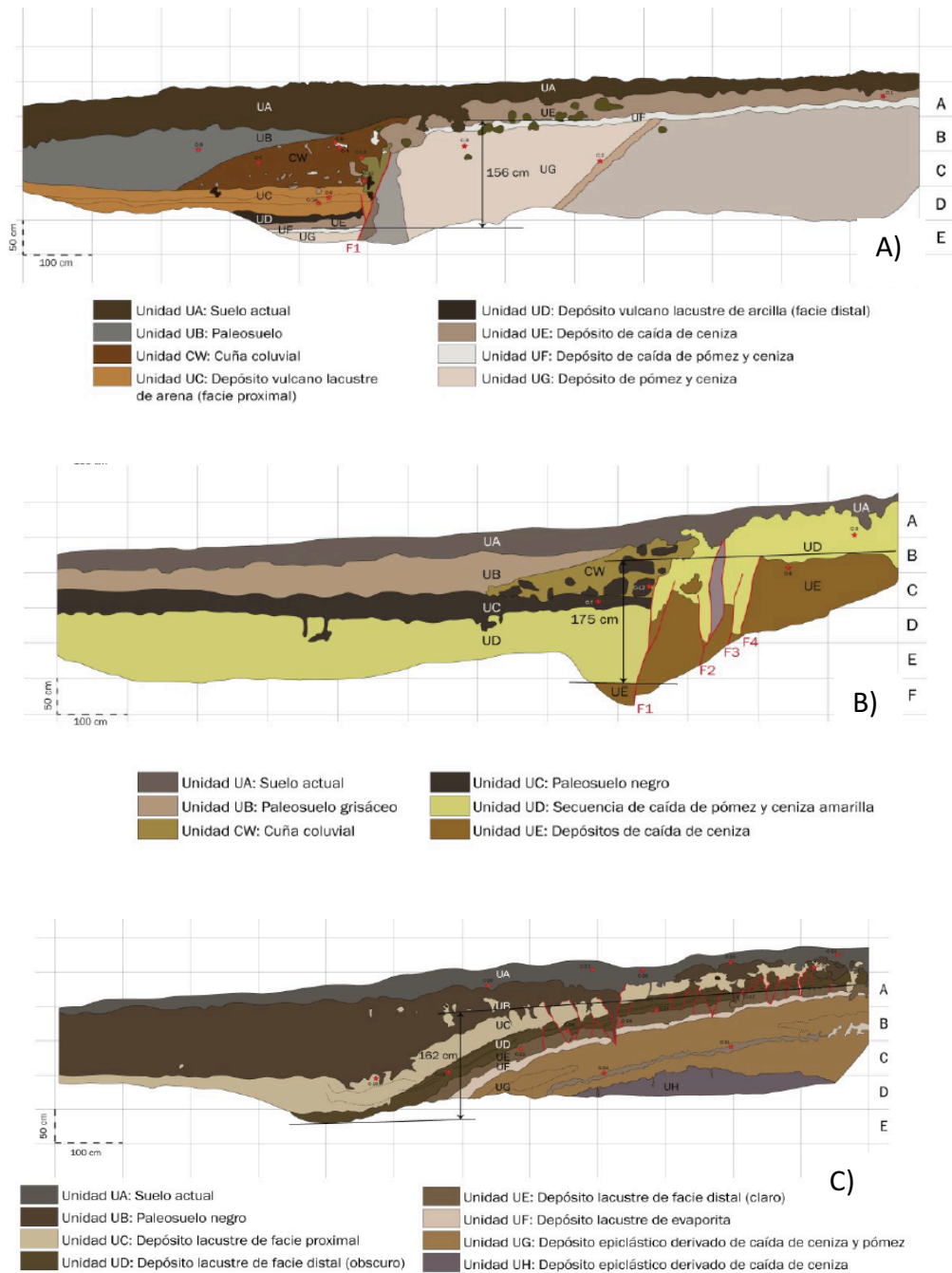


Figura 9: Log interpretativos del SNFA A) Trinchera 3A B) Trinchera 3C y C) Trinchera 3B. Todas las paredes de las trincheras son oeste. Tomada de Campos-Medina, (2019)

### **3. Metodología**

La metodología utilizada en este trabajo es la propuesta por McCalpin (2009), utilizada ya clásicamente en los estudios de paleosismología en fallas normales y se fundamenta en los siguientes puntos:

#### *3.1 Trabajo Bibliográfico*

La primera etapa del análisis paleosismológico consiste en llevar a cabo una recopilación bibliográfica de toda la información disponible, en todas las disciplinas involucradas: Geología, Tectónica, Sismología, Geomorfología, Tectónica Activa y Paleosismología. Después de leer detalladamente toda la información disponible se realiza una síntesis, lo que permite tener un panorama global de la zona.

#### *3.2 Estudio Geomorfológico*

Geomorfología se deriva del griego, Γηος (géos) “Tierra”, μορφη (morfé) “Forma” y λογος (logos) “Estudio”. Es una disciplina de la de la Geología que tiene como objetivo el estudio de las formas de la superficie terrestre.

Un estudio de Geomorfología permite identificar fallas potencialmente activas que afectan una zona. Un análisis geomorfológico a detalle permite caracterizar las fallas, de tal manera que se pueda reconocer las estructuras de mayor potencial sismogénico y en las estructuras de mayor longitud se identificaran sitios de excavación de trincheras. En este análisis geomorfológico se integran: modelos digitales de elevación (DEM), imágenes satelitales (Google Earth), mapas geológicos y mapas de elevaciones. El tratamiento de los rasters e imágenes vectoriales, se realiza mediante softwares especializados como: Qgis, geomapapp y Adobe Illustrator. Con estas herramientas se elabora un mapa geomorfológico en donde se marcan escarpes de falla, edificios volcánicos, lineamientos etc., lo cual es muy importante para lograr estimar el grado de actividad de una falla a demás

de que permite ubicar puntos potenciales para excavar trincheras paleosismológicas. Como se mencionó anteriormente, el estudio geomorfológico utilizado en este trabajo fue realizado por Campos-Medina (2019).

### *3.3 Estudio de Paleosismología*

La paleosismología es una subdisciplina de la tectónica activa donde las tectónicas geológicas se utilizan para identificar y evaluar los terremotos prehistóricos (Wallace, 1987; McCalpin 1996). Permite ver si el desplazamiento está asociado a sismicidad y obtener las características de los terremotos (magnitud máxima, desplazamiento por evento, recurrencia y tiempo transcurrido desde el último evento).

Los estudios de Paleosismología integran disciplinas como geología estructural, estratigrafía, tectónica y geomorfología, con la finalidad de observar las fases de deformación cuaternaria (Figura 10).

En el registro geológico quedan plasmados los desplazamientos y/o deformaciones generadas por movimientos bruscos o por una deformación tectónica gradual ocurrida durante el Cuaternario. Mientras que los sismólogos trabajan con datos registrados en instrumentos durante los terremotos recientes, los paleosismólogos interpretan la evidencia geológica creada durante paleoterremotos individuales (McCalpin 1996). Cuando la sismología instrumental ó histórica es insuficiente para la caracterizar los terremotos, entonces los estudios de paleosismología son requeridos.



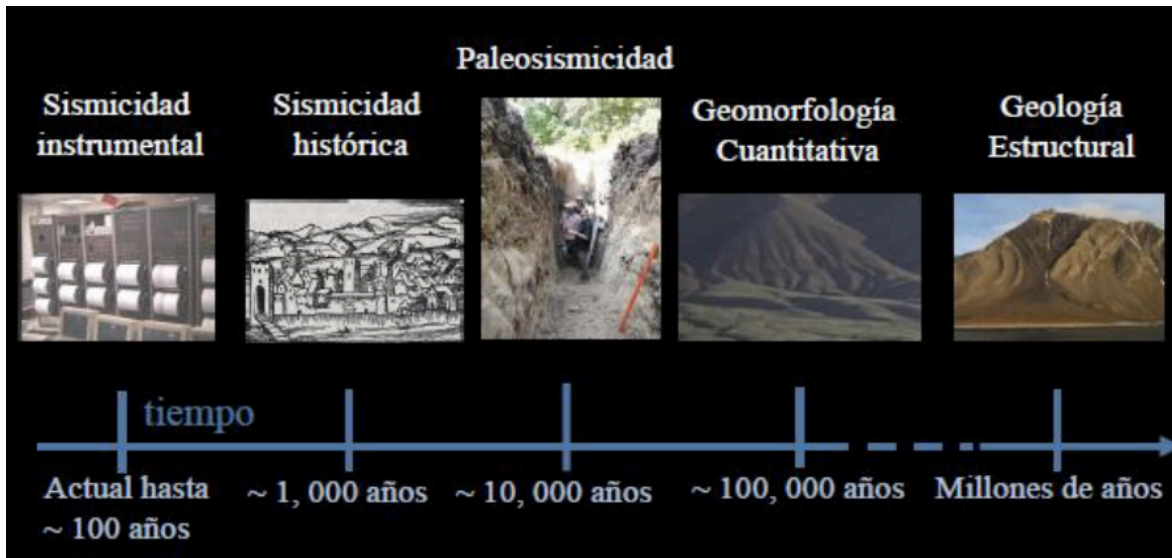


Figura 10: Rango de edades que abarcan algunas de las disciplinas relacionadas con los estudios neotectónicos (Fuente: Lacan, 2013)

Los terremotos con magnitud 6 o superior que ocurren a profundidad somera, generan deformaciones frágiles cosísmicas que son permanentes en la superficie y que quedan grabadas en el registro geológico, además de ocasionar una inestabilidad topográfica, que sirve como evidencia del sismo. Estas evidencias o estructuras en general son preservadas, sin embargo existen algunas condiciones en el entorno que las pueden llegar a destruir como lo son: la topografía, la litología del área, el clima y la erosión, siendo estas condiciones una de las limitaciones que presentan los estudios de paleosismología.

El registro geológico reciente permite identificar los paleoterremotos que rompieron hasta la superficie. La excavación de trincheras paleosismológicas exploratorias es uno de los métodos más eficaces para examinar y analizar la evolución tectono-sedimentaria de un depósito posiblemente afectado por la actividad de una falla.

Al realizar una trinchera en el terreno, se inspecciona directamente el registro geológico del subsuelo y se observa si los depósitos han sido sujetos a una deformación, cuántas veces ha ocurrido y de qué manera.

### *3.4 Trabajo de campo preliminar a la excavación*

Después de haber identificado las fallas potencialmente activas y los sitios de potencial interés para excavación de trincheras paleosismológicas mediante el estudio de geomorfología, se procede a realizar el trabajo de campo el cual permite analizar afloramientos, tomar datos estructurales, y evaluar la tasa de sedimentación de material Holoceno en los diferentes sitios para determinar sitios idóneos para la excavación de trincheras.

### *3.5 Excavación de trincheras*

El trabajo de campo relacionado con la excavación de trincheras (Figura 11) se realizó durante diez días de invierno para evitar problemas relacionados con las precipitaciones que podrían ocurrir durante los meses de verano. En este apartado se explica detalladamente el trabajo que se realizó durante el estudio de paleosismología a lo largo del segmento principal de la falla Agua Fría, en donde se analizaron tres trincheras paleosismológicas, para examinar el registro geológico.



Figura 11: Fotografía de la excavación de la Trinchera

### 3.5.1 Apertura de las Trincheras



Figura 12: Fotografía del afloramiento de la trinchera Agua Fría 1.

La primera trinchera Agua Fría 1 (se le ha llamado trinchera para facilitar las interpretaciones) (Figura 12). Corresponde a un afloramiento natural situado en el borde de la carretera que ha sido limpiado superficialmente para quitar la parte alterada y hacerlo lo más plano posible de tal manera que se facilite la observación.

La trinchera Agua Fría 2 (Figura 13), presenta una longitud de 14 metros de largo y cuatro metros de profundidad, fue excavada con la ayuda de una máquina retroexcavadora, al pie de escarpe de falla, en los coluviones.



Figura 13: Fotografía de la Trinchera Agua Fría 2, situado al pie del escarpe.

La trinchera Agua Fría 4 presenta una longitud de 9 metros de largo por 4.5 metros de profundidad, también realizada con la ayuda de una máquina retroexcavadora al pie del escarpe de la falla, a 1 km de las dos primeras trincheras.

Al momento de escavar las trincheras, se pide al conductor de la excavación alejar lo más posible el producto de la excavación de las trincheras para disminuir el peligro relacionado con la caída de bloques. De la misma forma, se le pide guardar una buena relación de proporcionalidad entre la profundidad de la trinchera y su anchura para evitar el caso de que se desestabilice una pared. A demás una vez terminada la excavación, es importante asegurarse que no haya material suelto que podría caer en la trinchera antes de bajar a trabajar en su interior. Estas medidas de seguridad son especialmente importantes en las trincheras profundas como las excavadas en el sitio Agua Fría.

### 3.5.2 Trabajo dentro de las trincheras

#### 3.5.2.1 Limpieza de las paredes



Figura 14: Fotografía del trabajo de limpieza de las paredes.

Al terminar la excavación de la trinchera, se limpian las paredes con rastrillos, para eliminar las marcas ocasionadas por la pala de la retroexcavadora. Esto se hace con el objetivo de que las unidades puedan ser identificadas con mayor claridad para observar, analizar y estudiar el registro geológico sedimentario (Figura

14). Es importante realizar la limpieza de las paredes de manera rápida, antes de que el sedimento se endurezca, ya que esto permite hacer una identificación correcta entre los materiales, las diferentes unidades y estructuras que se observan en las paredes de las trincheras.

#### 3.5.2.2 Colocación de la malla de referencia

Cuando ya están limpias las paredes, se coloca una malla de referencia (Figura 15). Esta malla de cordel debe formar líneas horizontales y verticales que forman recuadros de 0.5 x 1 m., en algunos casos de 1 m. x 1 m. Se colocan referencias a cada uno de los recuadros por ejemplo (A1, A2, A3...B2, B3 etc.) de forma que sea posible referenciar la totalidad de la trinchera para tener información precisa de la localización de las diferentes observaciones y muestras recolectadas.



Figura 15: Fotografía de la malla de referencia

#### 3.5.2.3 Marcación de horizontes y toma de muestras

Esta etapa consiste en analizar a detalle las paredes de las trincheras, identificando las unidades, las fallas, las fracturas y las discontinuidades que existen entre las diferentes litologías. Cada uno de los elementos relevantes se destacan con chinchetas de diferentes colores.

También se toman las muestras de materia orgánica encontrada (Figura 16), Estas pueden ser suelos, paleosuelos o bien trozos de cerámica (sí es que se encuentran). Con estas muestras se datarán las unidades sedimentarias de manera que permitan conocer las edades de los paleoeventos. Mientras se está realizando todo esto también se lleva a cabo una descripción detallada de los materiales y estructuras observadas.



Figura 16: Fotografía ilustrando la recolección de las muestras de materia orgánica para su fechamiento

#### 3.5.2.4 Fotografía y dibujo de las trincheras



Figura 17: Fotografía del trabajo de dibujo de las paredes de la trinchera a escala.

Una vez que todas las estructuras y las diferentes unidades han sido identificadas y caracterizadas, se toman fotografías a toda la pared mallada, recuadro por recuadro, para posteriormente generar un fotomosaico (fotolog). También se hace un esquema análogo en papel milimétrico y a escala (Figura 17), en donde se describen todos los materiales y estructuras que se observan en cada pared (unidades, fallas, bloques, rocas, cuñas coluviales etc.).

Estos dibujos tienen como finalidad analizar los detalles del registro geológico e ilustrar digitalmente los resultados de las trincheras paleosísmicas. Es sumamente importante tomar toda esta información con el máximo de precisión posible, ya que las trincheras son rellenadas después del trabajo de campo.

### 3.6 Digitalización

Posteriormente se realiza el fotomosaico (o Fotolog), con ayuda de un software de edición de fotografías como es el Adobe Photoshop con el cual se unen todas las fotografías de cada uno de los recuadros que conforman las paredes de las trincheras. Tomando en cuenta la malla de georreferencia, la deformación intrínseca a cada imagen esta corregida para que todas las imágenes sean a la misma escala. Es importante que en el fotolog se puedan distinguir claramente cada una de las unidades, estructuras y características de cada pared.

En paralelo, se hace un mosaico (o Log), de las diferentes hojas de papel milimétrico para georreferenciar toda la información obtenida en campo. Después, con ayuda del fotolog, se digitalizan las principales unidades, fallas, bloques, rocas, cuñas coluviales etc. Con la finalidad de distinguir y caracterizar los desplazamientos registrados dentro de las trincheras.

### 3.7 Interpretación

A partir de la digitalización del log y del fotolog se genera una interpretación paleosismológica, en donde se determina y caracteriza el número de eventos registrados en las trincheras. Después, gracias a las dataciones de las diferentes unidades por carbono 14 (C14), se puede acotar la edad de los desplazamientos generados por eventos paleosísmicos.

El estudio paleosismológico, a lo largo de la falla Agua Fría permite saber si la falla ha estado activa durante el Holoceno y la estimación del potencial sismogénico de la falla, permite cuantificar su actividad. A largo plazo, estos resultados se podrán utilizar para mitigar su amenaza.

A partir de la geomorfología, las evidencias primarias y los datos paleosísmicos estos últimos obtenidos en trincheras, se obtienen: *la longitud de la falla, la superficie de ruptura y el desplazamiento vertical de la falla* asociado a cada evento. La integración de estos resultados permite determinar las paleomagnitudes de los

eventos estudiados a partir de las relaciones empíricas (Wells y Coopersmith 1994, McCalpin 2006, Wesnousky 2008, Hanks y Kanamori 1979).

### *3.8 Dataciones*

En los análisis paleosismológicos es muy importante recolectar muestras de carbono para fechar diferentes unidades. Estas muestras deben tomarse en las unidades de la trinchera en donde los desplazamientos sean evidentes. De tal manera que se puedan inferir la edad en la que han ocurrido los movimientos, también son importantes para realizar cálculos de intervalo de recurrencia de grandes terremotos.

Las muestras del análisis paleosismológico fueron datadas mediante el método Carbono 14, y calibradas a partir de la interface conocida como OxCal 4.2 Ramsey, (2009) de la University of Oxford.

#### **4. Resultados del Estudio Paleosismológico**

A partir del análisis geomorfológico en el Campo Volcánico los Azufres, realizado por Campos-Medina (2019), se pudieron identificar sitios idóneos para realizar una campaña de trincheras paleosismológicas a lo largo de la Falla Agua Fría (FAF), teniendo en cuenta que el escarpe fuera suficientemente tenue para poder realizar los trabajos de paleosismología, pero también lo suficientemente conservado para tener una buena preservación del registro de terremotos.

El estudio paleosismológico de la FAF consistió en la excavación de tres trincheras en el escarpe del segmento norte de la FAF (Campos-Medina, 2019) y tres más en el escarpe principal de la FAF (Figura 18). Todas las trincheras fueron excavadas perpendicularmente a los escarpes, de manera ya clásica en los estudios paleosismológicos en fallas normales (McCalpin, 2009).

A continuación, se presenta la interpretación paleosismológica de las tres trincheras excavadas en el escarpe principal de la FAF (o segmento sur) y se comparan los resultados obtenidos con la interpretación realizada por Campos-Medina (2019) en el segmento norte de la falla (Figura 18). Cabe mencionar que desde la presentación de la tesis de Campos-Medina (2019), nuevos fechamientos han sido obtenidos sobre los dos segmentos de la FAF. Estas edades están interpretadas en este trabajo y son utilizadas para organizar cronológicamente los diferentes eventos y relacionarlos entre las diferentes trincheras.

En las siguientes secciones, se presenta la estratigrafía y las deformaciones encontradas para cada una de las tres trincheras antes de presentar los análisis por retro-deformación de cada trinchera. Estos análisis de retro-deformación permiten de caracterizar y cuantificar las deformaciones encontradas y finalmente proponer, una interpretación paleosismológica.





Figura 18: Fotografía Aérea de la cuenca de Llano Grande con la ubicación de las 6 trincheras de paleosismología. Las trincheras 1,2,4 (indicadas en tono azul marino), corresponden a las trincheras analizadas en este trabajo. Las trincheras en azul claro representan las analizadas por Campos-Medina (2019). SNFA: Segmento Norte de la Falla Agua Fría. SSFA: Segmento Sur de la Falla Agua Fría.

#### 4.1 Trincheras Agua Fría 1

La trinchera Agua Fría 1, mide 26 metros de largo y 5 metros de profundidad. Siendo excavada en la ladera de un pequeño valle que recorta el escarpe de falla, esta trinchera tienen solamente una pared, debido a que corresponde a un afloramiento natural situado en la orilla de la carretera.

##### 4.1.1 Estratigrafía

La trinchera Agua Fría 1 expone varias capas de materiales poco consolidados que se han podido dividir en 10 unidades estratigráficas por su composición, textura y colores característicos (Figura 19 log). Se han podido distinguir unidades de origen volcánicas, sedimentarias y aluviales, así como otras unidades que corresponden al desarrollo de suelos (ricas en materia orgánica). Cada una de estas 10 unidades

ha sido descrita con detalle en la tabla 2. Estas unidades presentan una geometría tabular con una ligera pendiente tanto en el sentido del valle que de la ladera en la cual la trinchera ha sido excavada.

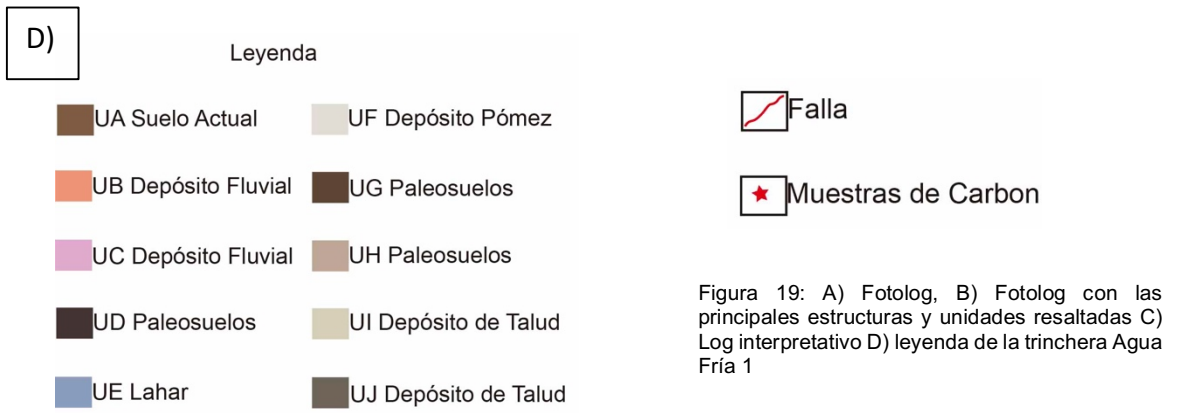
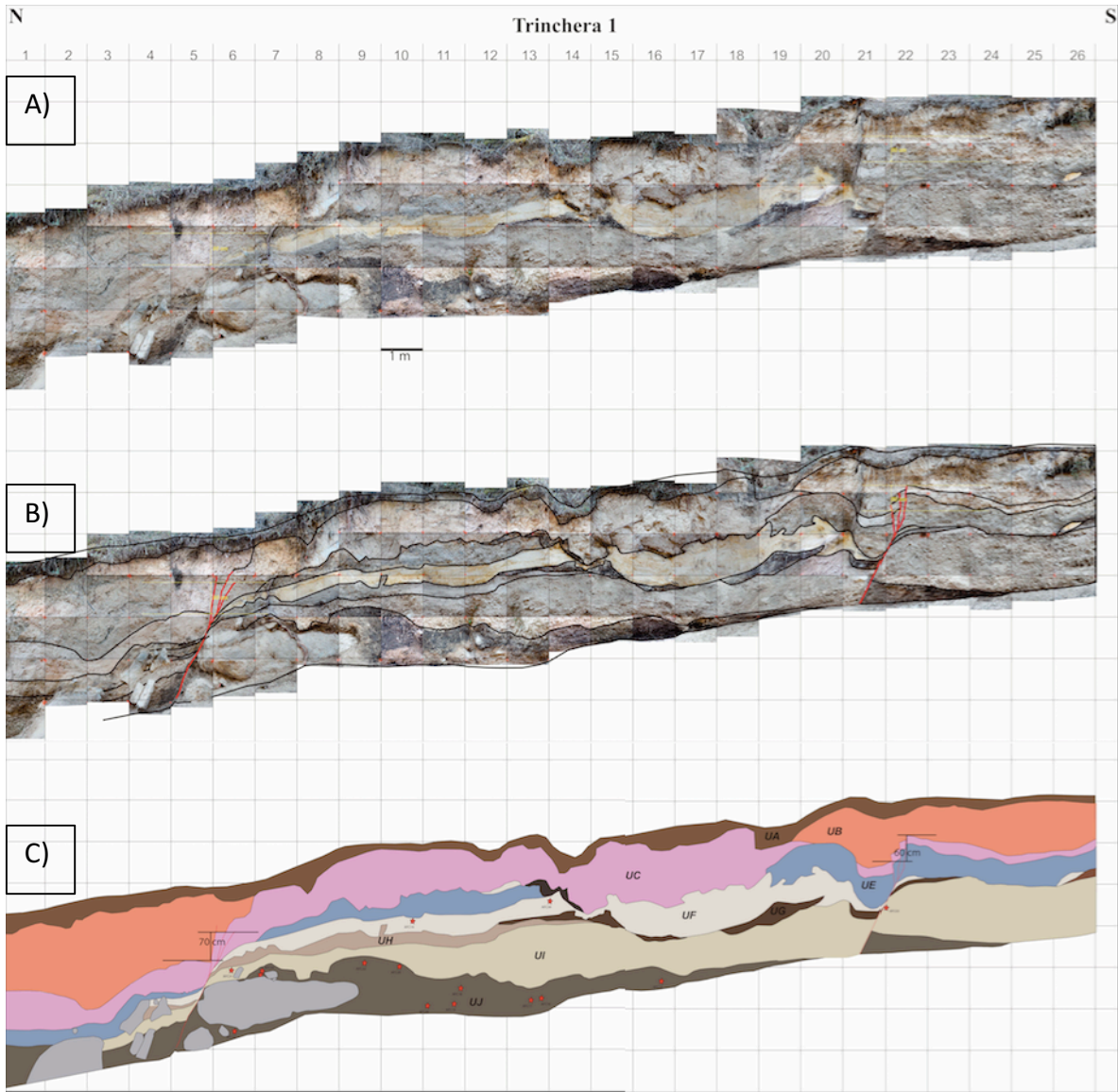


Figura 19: A) Fotolog, B) Fotolog con las principales estructuras y unidades resaltadas C) Log interpretativo D) leyenda de la trinchera Agua Fria 1

UA	Unidad arcillosa-arenosas negra, con alto contenido en materia orgánica (20-30 cm de espesor).	Suelo Actual
UB	Unidad arenosa de color blanca a beige preservada únicamente en los dos extremos de la trinchera, con alto contenido en cenizas y pómez, presencia de clastos redondeados de pequeña dimensión y ligera estratificación cruzada (100-200 cm de espesor).	Depósito Fluvial
UC	Unidad arenosa de color rosada, con alto contenido en cenizas y pómez, presencia de algunos clastos redondeados de pequeña dimensión y ligera estratificación cruzada (100 cm de espesor).	Depósito Fluvial
UD	Unidad preservada únicamente en la parte central de la trinchera. Arcillosa-arenosas obscura, con presencia de carbón y otra materia orgánica (15-20 cm de espesor).	Paleosuelo
UE	Unidad con clastos de todo tamaño, redondeados y angulosos de origen diversas, sin clasificación en una matriz arenosa de color gris a café (20 cm de espesor).	Lahar
UF	Unidad compuesta exclusivamente de pómez en tonalidad amarilla de diámetro inferior a 5 milímetros (20-40 cm de espesor).	Depósito de Pómez
UG	Unidad arcillosa muy obscura y rica en materia orgánica (5-10 cm de espesor).	Paleosuelo
UH	Unidad arcillosa clara con presencia de materia orgánica (5-10 cm de espesor).	Paleosuelo
UI	Unidad clara compuesta de clastos principalmente de riolita de todo tamaño (1 a 20 cm de diámetro) mal clasificados en una matriz arenosa. (100-150 cm de espesor).	Depósito de Talud
UJ	Unidad obscura compuesta de clastos y bloques de todos tamaños (1 cm a 3 m) de riolita en una matriz arenosa. Presencia de mucha materia orgánica que	Depósito de Talud

	indica en desarrollo de un paleosuelo (90-150 cm de espesor).	
--	---	--

Tabla 2: Descripción litológica textural e interpretación de las unidades encontradas en la trinchera Agua Fria 1.

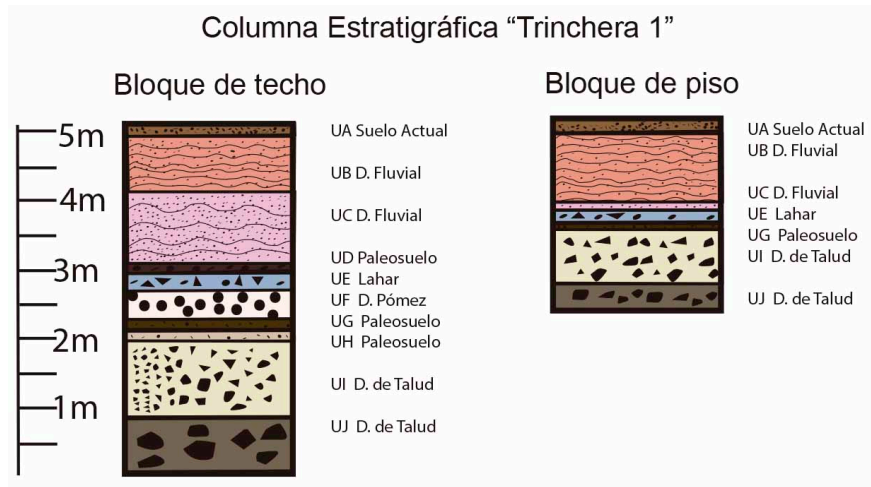


Figura 20: Columna estratigráfica de la trinchera Agua Fria 1.

En la base de la trinchera, las unidades más antiguas encontradas corresponden a depósitos de talud con una matriz arenosa y clastos de riolita de todos tamaños (Unidades I-J; Figura 19 Log y Tabla 2). Estos depósitos de talud corresponden seguramente a la erosión del escarpe de falla principal, compuestos principalmente de riolita los cuales miden varias decenas de metros y se localizan directamente al este de la Trinchera. Encima de estos depósitos se encuentran dos paleosuelos (UG y UH). Estos paleosuelos se interpretan como relacionados a una etapa de estabilidad en la erosión del escarpe, suficientemente larga para desarrollar suelos. Encima de los paleosuelos se encuentran depósitos de pómez que indican un episodio de actividad volcánica cerca de la zona de estudio (UF). Encima, un depósito de lahar, puede corresponder a la removilización de una parte de los depósitos volcánicos relacionado a la actividad volcánica (UE). Siguiendo en la secuencia hacia superficie, la presencia de un tercer paleosuelo (UD) indica un tiempo de quietud en el aporte de material nuevo. En la parte superior de la trinchera se puede observar la presencia de dos unidades fluviales, las cuales indican el

paleonivel de cause del valle (unos 5-10 metros arriba del cauce actual). Finalmente, el suelo actual sella la trinchera.

#### *4.1.2 Deformaciones tectónicas. Análisis por retro-deformación*

Dos zonas de fallamiento se pueden observar en la trinchera (Figura 19 Log). La primera al norte afecta las unidades UJ-UB, mostrando un desplazamiento vertical de aproximadamente 70 cm (medido a lo largo de las UB,UC y UE) mientras que el fallamiento en el sur afecta estas mismas unidades con solamente 60 cm de desplazamiento vertical (medido a lo largo de las UB, UC y UE). Para ilustrar el efecto del desplazamiento tectónico por las fallas y la interacción entre estos fenómenos tectónicos y formación de las unidades litológicas anteriormente descritas, se efectuó una reconstrucción tectono- sedimentaria (o retro-deformación), presentada a continuación.

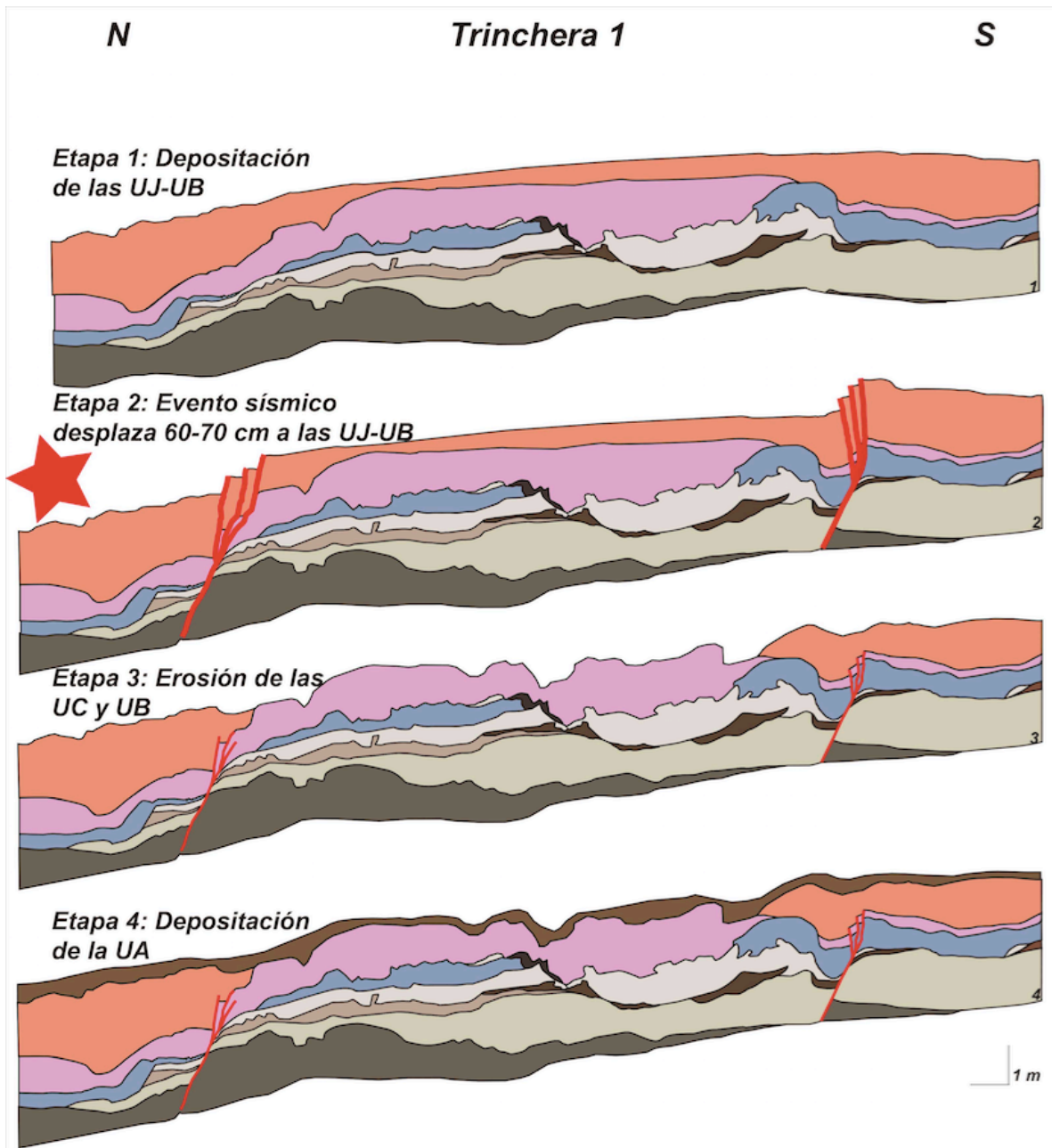


Figura 21: Análisis por retrodeformación y log de la trinchera "Agua Fría 1"

La Figura 21 muestra la retrodeformación de manera ilustrativa señalando las etapas más importantes de la evolución tectono-sedimentaria de la trinchera a través del tiempo. En concreto, la evolución de la trinchera Agua Fría 1 se puede describir en 4 etapas principales:

- 1) En el transcurso del cuaternario tardío se depositaron las UJ-UB al ritmo de la erosión de las laderas, la deformación de suelos, las erupciones volcánicas y los depósitos fluviales. En esta reconstrucción, en la falla localizada al norte de la trinchera, podría tener un escarpe basal (que no se observa), fruto de un sismo anterior y los materiales mimetizan o recubren ese escarpe.
- 2) La actividad tectónica a lo largo de la falla Agua Fría provoca una ruptura superficial que se acomoda localmente en dos subfallas sintéticas, generando respectivamente un desplazamiento de 70 cm en la zona de falla norte y 60 cm en la zona de falla sur. Todas las unidades fueron afectadas de la misma forma de UJ hasta UB.
- 3) Después del evento; se erosiona gran parte de UB y en menor proporción UC.
- 4) Encima de la trinchera y cubriendo todas las unidades antes erosionadas se forma la unidad UA, correspondiente al suelo actual.

#### *4.1.3 Interpretación*

La trinchera Agua Fría 1 presenta unidades litológicas desplazadas de 70 cm y 60 cm a lo largo de dos zonas de fallas. En estas dos zonas, todas las unidades desde UJ hasta UB se vieron afectadas por el mismo desplazamiento. Indicando que la deformación corresponde a un mismo terremoto, el cual ocurrió después de la formación de UB. El desplazamiento se puede medir claramente a lo largo de dos fallas en las UJ-UC, sin embargo UB se ve afectada solamente en su base y en la parte superior no parece ser afectada. Eso se explica por el episodio de erosión posterior al evento, el cual afecto la parte superior de la UB, bajando el registro de



la deformación. Adicionando las deformaciones medidas en dos fallas sintéticas, se obtiene un desplazamiento total de 130-132 cm.

#### *4.2 Trinchera Agua Fría 2*

La trinchera Agua Fría 2, se localiza a unos 60 metros al oeste de la trinchera Agua Fría 1, en el centro de la falla Agua Fría. Esta trinchera tiene unas dimensiones de 4 metros de profundidad por 14 metros de longitud.

##### *4.2.1 Estratigrafía*

La secuencia estratigráfica expuesta en la trinchera agua Fría “2”, está constituida principalmente por materiales volcánicos, sedimentarios, y aluviales, poco consolidados (Figura Log 22-23), que han sido divididos en 7 unidades estratigráficas. Esta división se hizo a partir de las características textural, de composición y de color de cada unidad. Las unidades preservadas en el bloque de techo presentan una inclinación aproximada de 15° hacia el norte y se describen a detalle en la tabla 3.

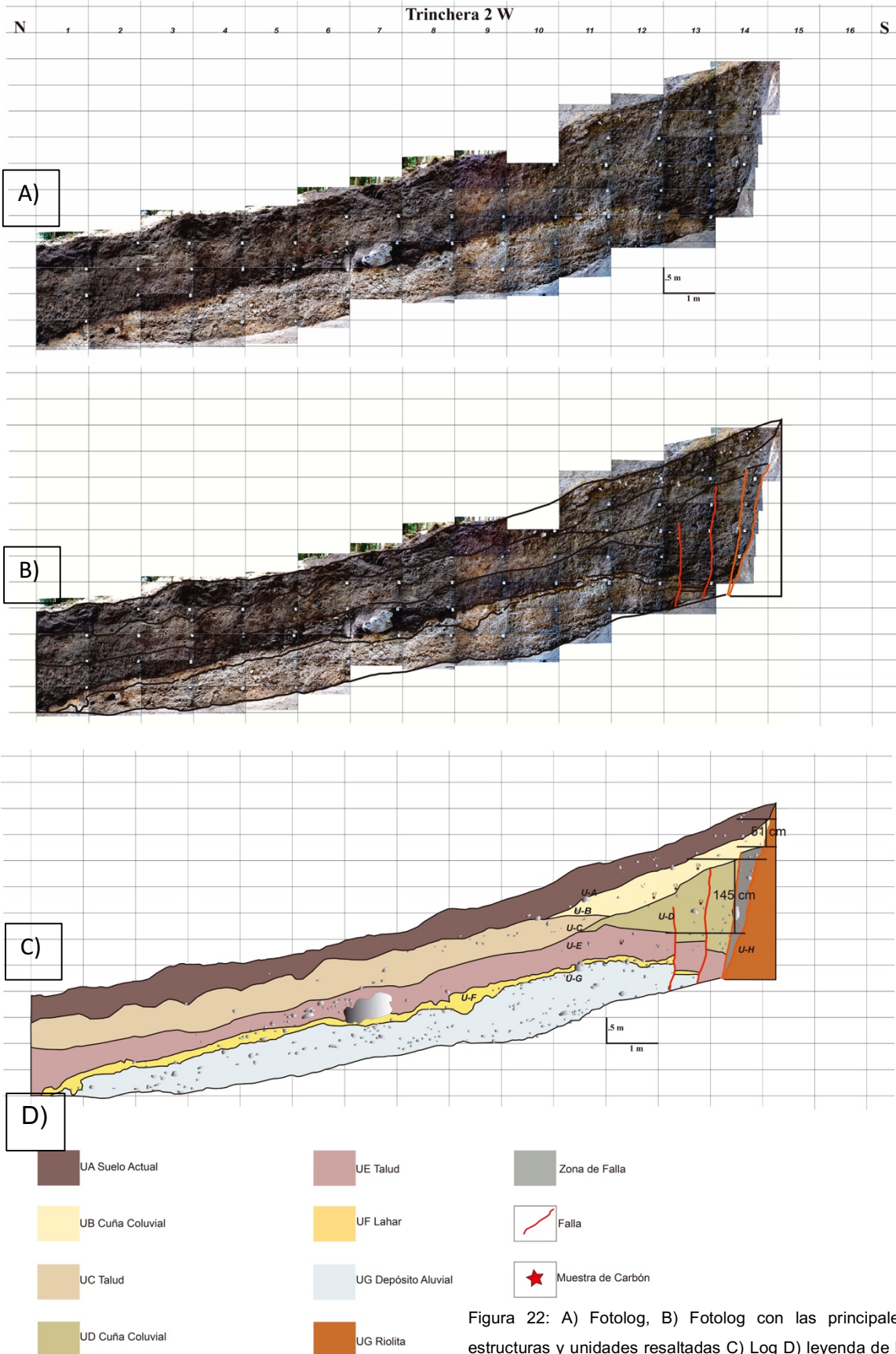


Figura 22: A) Fotolog, B) Fotolog con las principales estructuras y unidades resaltadas C) Log D) leyenda de la trinchera Agua Fria 2 W

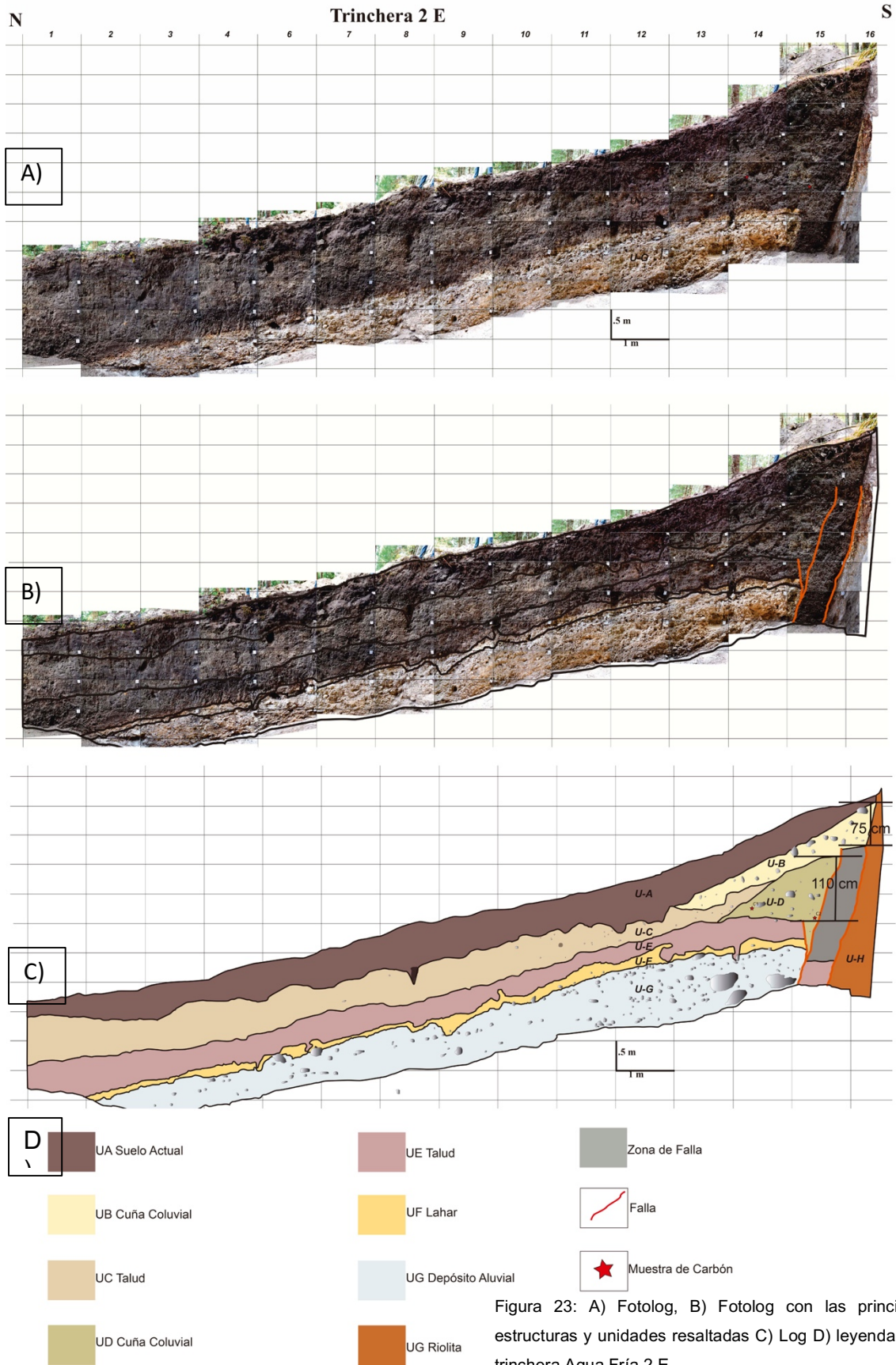


Figura 23: A) Fotolog, B) Fotolog con las principales estructuras y unidades resaltadas C) Log D) leyenda de la trinchera Agua Fría 2 E

<b>Unidades</b>	<b>Descripción sedimentológica</b>	<b>Interpretación</b>
<b>UA</b>	Unidad de material suelto compuesto principalmente por arcilla con alto contenido de materia orgánica, en tonalidad café oscuro (40-50 cm de espesor).	<b>Suelo Actual</b>
<b>UB</b>	Unidad de arcilla y arena sin organización preferencial (revuelto) con presencia de clastos angulosos de riolita de todo tamaño. Altamente pedogenizada (10-75 cm de espesor)	<b>Cuña Coluvial</b>
<b>UC</b>	Unidad arenosa de color amarilla a café oscuro (pedogenizada) con presencia de algunos clastos de riolita (50-80 cm de espesor)	<b>Depósito de Talud</b>
<b>UD</b>	Unidad en forma de cuña compuesta de bloques y partes de las unidades inferiores revueltas sin organización preferencial (10-160 cm de espesor)	<b>Cuña Coluvial</b>
<b>UE</b>	Unidad arenosa de color anaranjada a café (pedogenizada) la arena tiene la misma composición que la riolita de la UH (50-60 cm de espesor)	<b>Depósito de Talud</b>
<b>UF</b>	Unidad de grava y clastos de color claro a gris, con presencia de materia orgánica (10-20 cm de espesor)	<b>Depósito de Lahar</b>
<b>UG</b>	Unidad de capas de arenas con clastos sub-redondeados de origen diverso, de color globalmente claro (90 cm de espesor)	<b>Depósito aluvial</b>
<b>UH</b>	Con un espesor cercano a (350 cm de espesor mínimo)	<b>Riolita</b>

Tabla 3: Descripción litológica textural e interpretación de unidades encontradas en la trinchera Agua Fria 2.

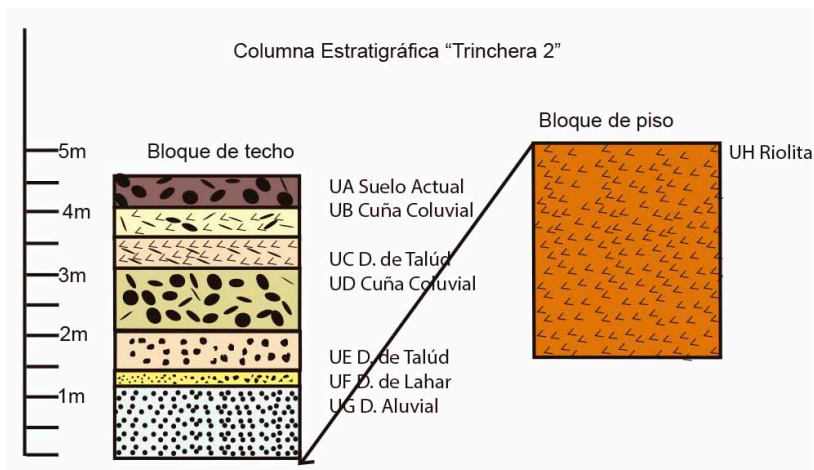


Figura 24: Columna estratigráfica de la trinchera 2. D= Depósito

Una zona de falla importante divide esta trinchera en dos bloques totalmente distintos. El bloque de piso está compuesto por una sola unidad, la UH, la cual tiene un espesor mínimo de 350 cm. Esta unidad es la más antigua de la trinchera y corresponde a una riolita maciza. Esta riolita corresponde probablemente al basamento del Campo Volcánico Los Azufres (riolita Agua Fría; De la Cruz et al., (1983); Dobson y Mahood, (1985); Cathelineau et al., (1987); Ferrari et al., (1991) y Pradal y Robin (1994); Figura 6 mapa Geológico). En el bloque de techo, la unidad más antigua encontrada en la base de la trinchera corresponde a un depósito aluvial (UG), compuesto de material detrítico. Encima, un depósito de lahar (UF), corresponde a la re-movilización y al depósito caótico de una mezcla de unidades preexistentes. Encima de la UF se observa un depósito de talud (UE) compuesto de productos de erosión del escarpe de la falla principal (bloques de riolita). Sobreyaciendo UE, se encuentra un depósito caótico, con un espesor máximo de 167 cm al nivel del escarpe y que se interpreta como una cuña coluvial (UD), esta estructura está asociada a la degradación rápida de un escarpe. Encima de esta cuña coluvial (UD), se encuentra otro depósito de talud (UC), que se formó en la prolongación de la cuña coluvial. Encima de la UC, se encuentra una segunda cuña

coluvial (UB) presente únicamente en la parte más proximal al escarpe de la falla. Finalmente sellando toda la cima de la trinchera, se encuentra el suelo actual (UA).

#### *4.2.2 Deformaciones tectónicas, análisis por retro-deformación*

En la trinchera Agua Fría 2, ninguna unidad ha sido preservada en ambos bloques separados por la falla. Por lo tanto, no se pudo medir de manera directa los desplazamientos tectónicos que han ocurrido. A sí que, la preservación de las cuñas coluviales nos dan evidencias indirectas sobre la actividad sismotectónica de la falla y los desplazamientos asociados. Una cuña coluvial se forma justo después de un terremoto (por degradación del escarpe de falla expuesto). En teoría, el desplazamiento cosísmico se puede estimar a partir del espesor máximo de la cuña coluvial (cerca de la zona de falla) estimando que el escarpe de falla mida en promedio el doble de la cuña coluvial resultante (McCalpin, 2009).

En este contexto, dos paleorupturas pueden ser analizadas a partir de los resultados obtenidos en la trinchera (Figura 22-23).

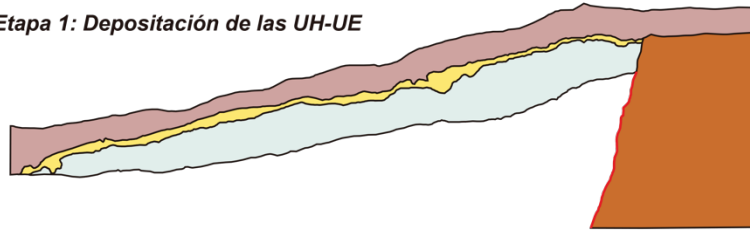
La primera cuña coluvial (UB) indica la presencia del registro del primer evento sísmico, el cual ocurrió después de la formación de la UC. La cuña coluvial mide 51-75 cm y corresponde a un escarpe de falla que medía 100-150 cm después del evento. Este primer evento provocó el fallamiento de todas las unidades anteriormente depositadas a lo largo de un ramal de falla visible en las UE-UD.

El segundo evento sísmico ocurrió después de la formación de la UE y corresponde a la formación de una cuña coluvial (UD) de 110-145 cm. Por lo tanto, el escarpe de falla a este segundo evento medía poco menos de 3 metros.

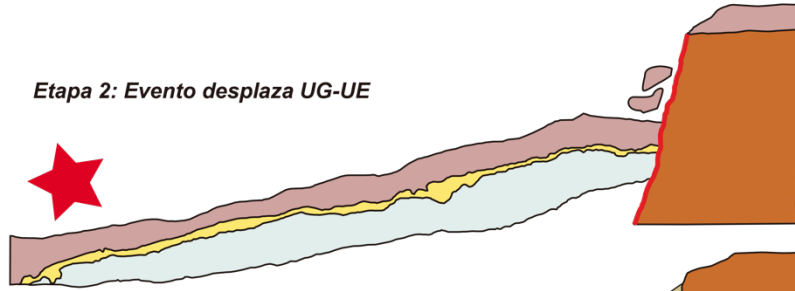
Los desplazamientos tectónicos registrados en la trinchera Agua Fría 2 se representan de manera ilustrativa en la retro-deformación de la Figura 25 retrodeformación.

N **Trinchera 2 W** S

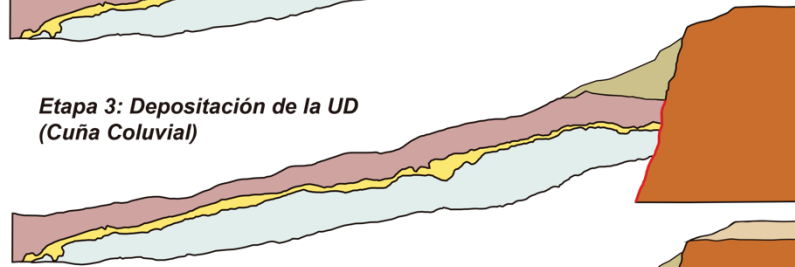
**Etapa 1: Deposición de las UH-UE**



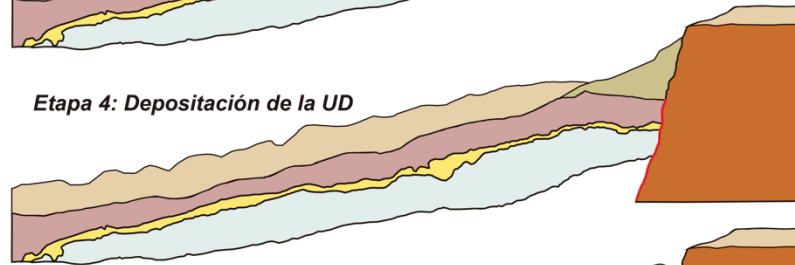
**Etapa 2: Evento desplaza UG-UE**



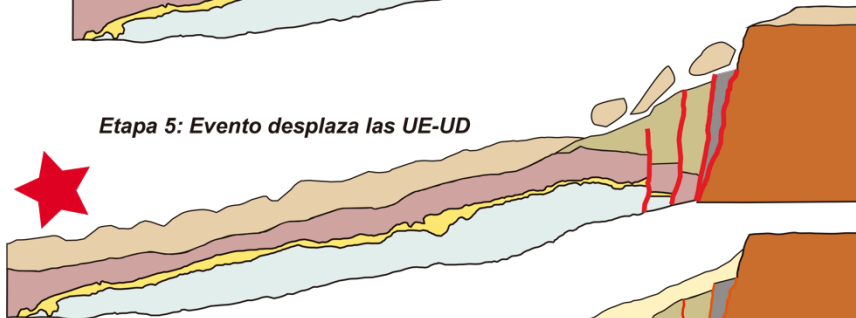
**Etapa 3: Deposición de la UD (Cuña Coluvial)**



**Etapa 4: Deposición de la UD**



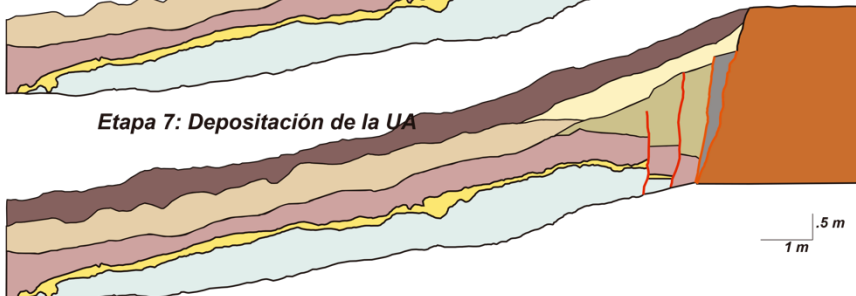
**Etapa 5: Evento desplaza las UE-UD**



**Etapa 6: Deposición de la UB (Cuña Coluvial)**



**Etapa 7: Deposición de la UA**



1 m  
0.5 m

Figura 25: Análisis por retro-deformación dividido en 7 etapas, correspondiente a la trinchera 2 W

- 1) Las unidades UG-UE se depositan en discordancia sobre la UG, seguramente en relación con eventos sísmicos anteriores, no registrados en la trinchera.
- 2) Un segundo evento sísmico está asociado al desplazamiento de unos 3 metros de las unidades UH-UE a lo largo de la falla principal.
- 3) La degradación del escarpe, durante o ligeramente posterior al evento sísmico generó la formación de la cuña coluvial UD.
- 4) La erosión de las unidades ya existentes formó un depósito de talud UC al pie del escarpe de falla.
- 5) Un primer evento sísmico asociado a un escarpe de 100-150 cm a lo largo de la falla principal y un ramal de falla que acomodan un desplazamiento de unos centímetros de las unidades preservadas en el bloque de techo de la trinchera.
- 6) La degradación de este segundo escarpe, durante o ligeramente posterior al evento sísmico generó la formación de la cuña coluvial UB.
- 7) En la cima de la trinchera y cubriendo todas las unidades, se inició la formación del suelo actual UA.

#### 4.2.3 Interpretación

Las unidades litológicas preservadas en la trinchera Agua Fría 2 han registrado las evidencias de dos desplazamientos de origen tectónico. A diferencia de la trinchera Agua Fría 1, en esta trinchera las diferentes unidades no están preservadas en ambos bloques de la falla. Por lo tanto, no ha sido posible medir los desplazamientos asociados a la actividad sísmica de manera directa. Sin embargo, la preservación de las cuñas coluviales permite dar una estimación de los desplazamientos asociados a cada evento de manera indirecta, utilizando las relaciones propuestas por McCalpin (2009).



El primer evento ocurrió después de la formación de la UE y es evidenciado por la presencia de la cuña coluvial (UD). Basado en el espesor de la cuña coluvial, el desplazamiento superficial asociado a este evento podría haber superado los 300 cm (Figura 25).

El segundo evento ocurrió después de la formación de la UC y es evidenciado por la presencia de una cuña coluvial (UB). Basado en el espesor de la cuña coluvial, el desplazamiento superficial asociado a este evento podría ser de 100 a 150 cm (Figura 25). Por otra parte, la presencia de un ramal de falla en el bloque de techo de falla indican que parte de la deformación se acomodó fuera de la zona de falla principal.

### *4.3 Trinchera Agua Fría 4*

La última trinchera analizada en este trabajo es la trinchera Agua Fría 4, ubicada un 1 km al este de las dos primeras trincheras. Esta trinchera ha sido excavada perpendicularmente al trazo de falla principal de la falla Agua Fría y tienen 9 metros de ancho por 4.5 metros de profundidad.

#### *4.3.1 Estratigrafía*

La trinchera ha permitido descubrir una secuencia estratigráfica conformada por materiales sedimentarios, volcánicos y aluviales poco consolidados (Figura Log 26-27).

La columna estratigráfica de la trinchera se ha dividido en 6 unidades a partir de la composición, la textura y el color de los materiales que las conforman. Las unidades preservadas en el bloque de techo de la falla presentan una inclinación de 20° a 30° hacia el norte, congruente con la topografía actual. Estas unidades se describen a detalle en la Tabla 4.

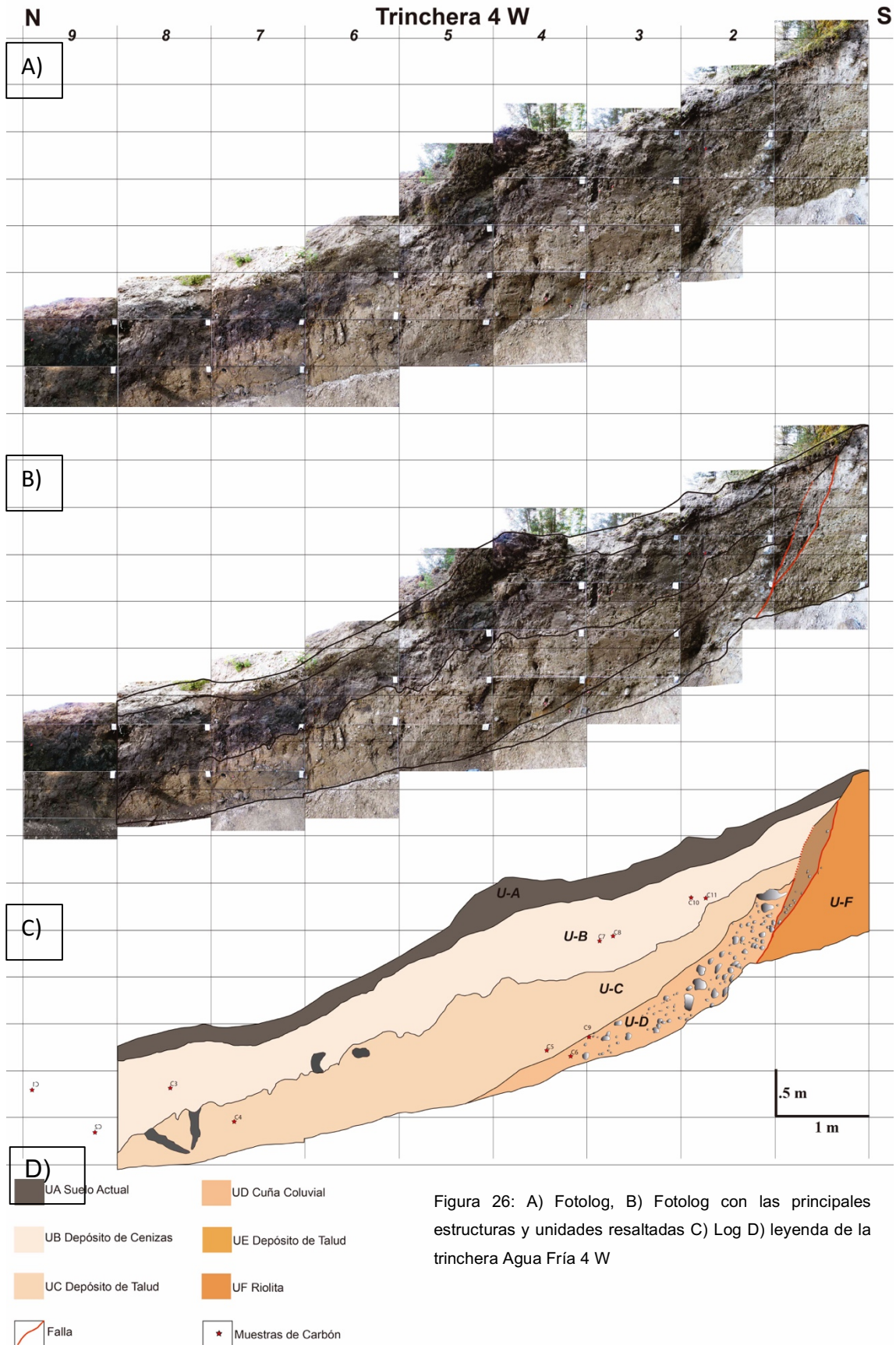


Figura 26: A) Fotolog, B) Fotolog con las principales estructuras y unidades resaltadas C) Log D) leyenda de la trinchera Agua Fría 4 W

N **Trinchera 4 E** S

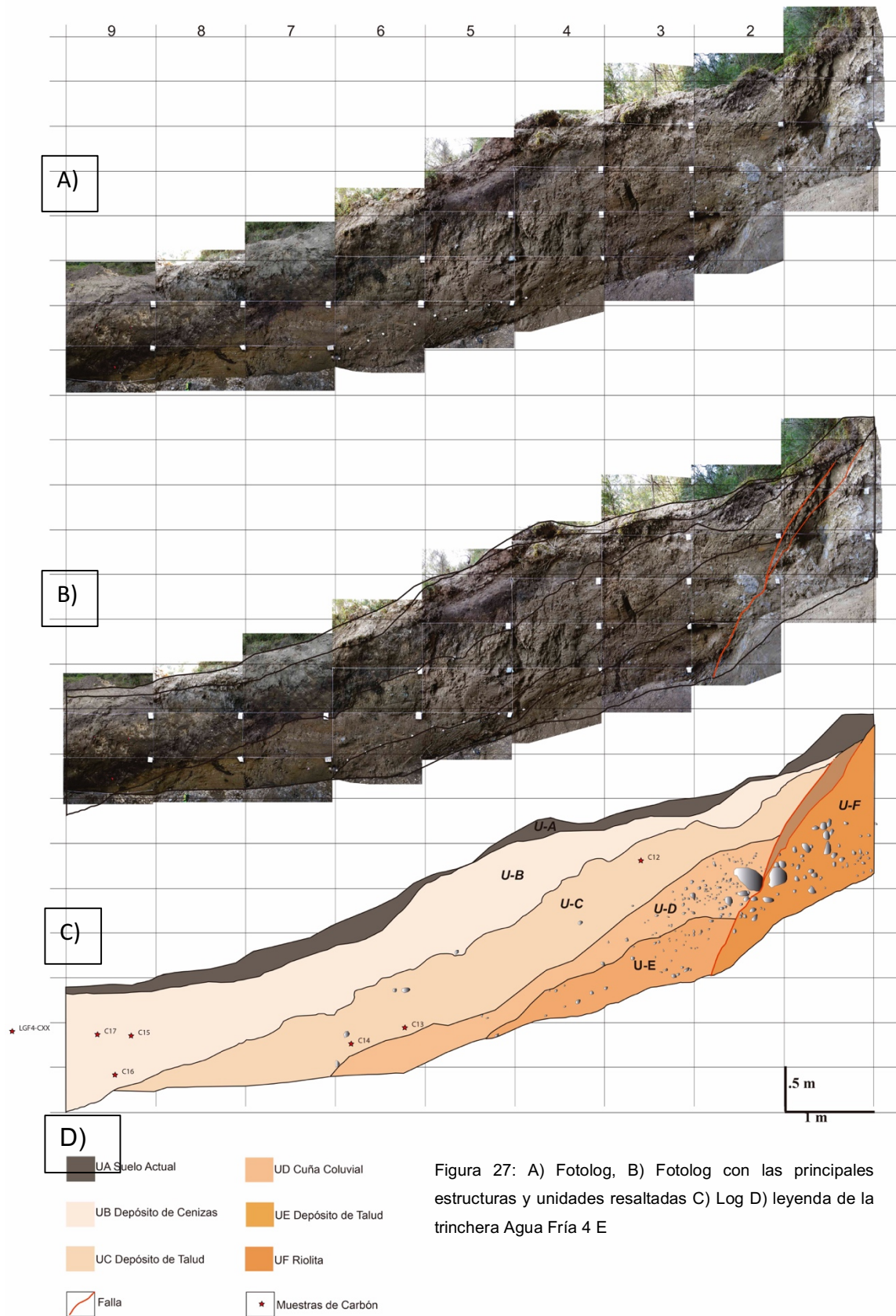


Figura 27: A) Fotolog, B) Fotolog con las principales estructuras y unidades resaltadas C) Log D) leyenda de la trinchera Agua Fría 4 E

<b>Unidades</b>	<b>Descripción sedimentológica</b>	<b>Interpretación</b>
<b>UA</b>	Unidad de arcilla negra con huella de bioturbación (30-35 cm de espesor).	<b>Suelo Actual</b>
<b>UB</b>	Unidad de material color café-amarillo compuesto de cenizas laminadas y arcilla (fuertemente pedogenizado), (40-110 cm de espesor).	<b>Déposito de cenizas</b>
<b>UC</b>	Unidad de arcillas gris oscuro a negro con depósitos de arena gruesa (Riolita), (90-100 cm de espesor).	<b>Déposito de Talud</b>
<b>UD</b>	Unidad de clastos de Riolita de todo tamaño, angulosos y sin clasificación en una matriz de arena y arcilla sin estratificación (80-90 cm de espesor).	<b>Cuña coluvial</b>
<b>UE</b>	Unidad de arcillas y arena de color café claro, con clastos de Riolita (40-50 cm de espesor).	<b>Déposito de Talud</b>
<b>UF</b>	Roca volcánica maciza con (cristales de Q, Pl, Mi) con rasgos de desertificación, contiene arena y brecha, con un (230-240 cm de espesor mínima).	<b>Riolita</b>

Tabla 4: Descripción litológica textural e interpretación de unidades encontradas en la trinchera Agua Fría 1.

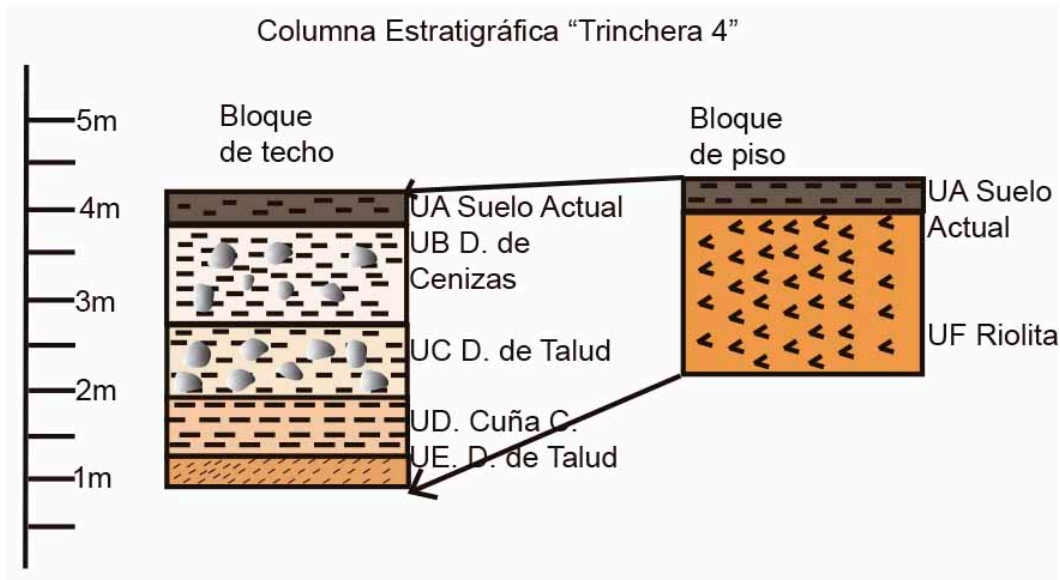


Figura 28: Columna estratigráfica de la trinchera "4". D=Depósito.

Como en la trinchera Agua Fría 2, una zona de falla importante divide esta trinchera en dos bloques totalmente distintos. El bloque de piso está compuesto principalmente por la riolita de la UF, la cual tiene un espesor mínimo de 240 cm. Esta unidad es la más antigua de la trinchera y corresponde a una riolita maciza. Esta riolita corresponde probablemente al basamento del Campo Volcánico Los Azufres (Riolita Agua Fría; De la Cruz et al., (1983); Dobson y Mahood, (1985); Cathelineau et al., (1987); Ferrari et al., (1991) y Pradal y Robin (1994); Figura 6 mapa Geológico) y está cubierta directamente por el suelo actual (UA). En el bloque de techo, la unidad más antigua encontrada en la base de la trinchera corresponde a un depósito de talud (UE), compuesto de productos de erosión del escarpe de la falla principal (bloques de riolita). Sobreyaciendo la UE, se encuentra un depósito caótico, con un espesor máximo de 80-90 cm al nivel del escarpe y que se interpreta como una cuña coluvial (UD), esta estructura está asociada a la degradación rápida de un escarpe. Encima de la UC, se encuentra UB, un depósito de ceniza que exhibe la actividad volcánica en las cercanías de la zona de la trinchera. Finalmente y sellando toda la cima de la trinchera, se encuentra el suelo actual (UA).

#### *4.3.2 Deformaciones tectónicas y análisis por retro-deformación*

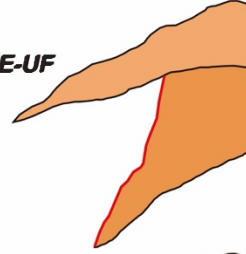
La trinchera Agua Fría 4 registró evidencias de dos eventos paleosísmicos. El primer evento ocurrió después de la formación de la UE y es evidenciado por la presencia de la cuña coluvial UD. Basado en el espesor de la cuña coluvial, el desplazamiento superficial asociado a este evento podría haber alcanzado los 180 cm (Figura 29). El segundo evento ocurrió después de la formación de la unidad UB. Este segundo evento está evidenciado únicamente por la presencia de una zona de falla que afecta a todas las unidades desde UE hasta UB. Desafortunadamente, la mala preservación de unidades en el bloque de piso de falla y la ausencia de cuña coluvial no permite calcular el desplazamiento asociado a este segundo evento. Sólo se puede evidenciar un evento sísmico, asociado a una ruptura superficial que ocurrió entre la formación de la UB y la UA. La historia tectono-sedimentaria de esta trinchera está ilustrada en la retrodeformación de la Figura 29.

N

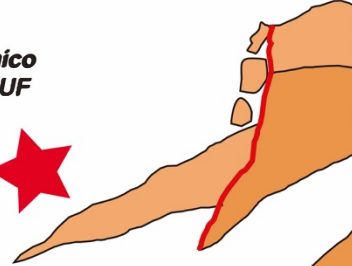
**Trinchera 4 E**

S

**Etapa 1: Deposición de las UE-UF**



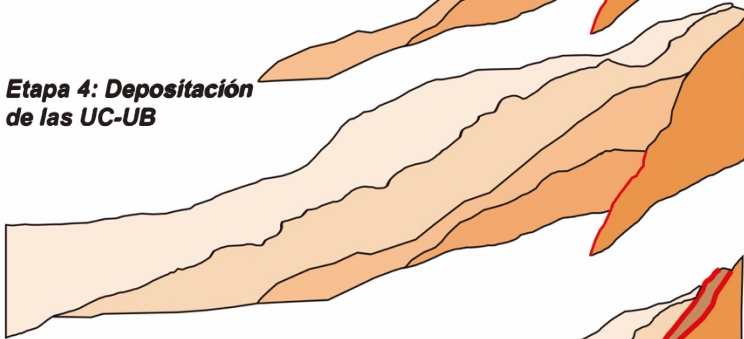
**Etapa 2: Evento sísmico desplaza 180 cm UE-UF**



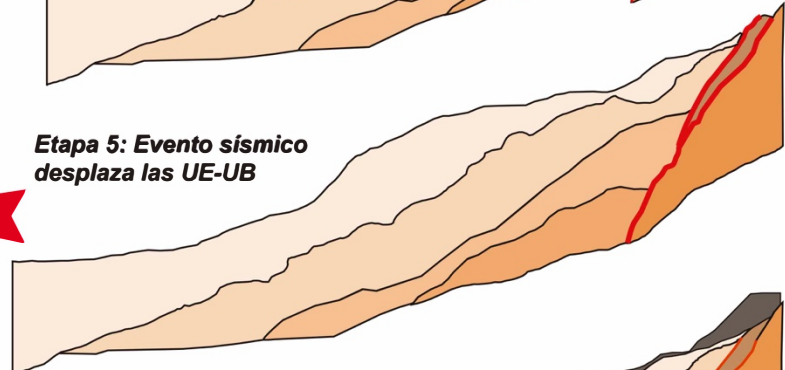
**Etapa 3: Deposición de la UD (Cuña Coluvial)**



**Etapa 4: Deposición de las UC-UB**



**Etapa 5: Evento sísmico desplaza las UE-UB**



**Etapa 6: Deposición de la UA**





Figura 29: Análisis por retro-deformación, dividido en 6 etapas, correspondiente a la trinchera 4 W

- 1) Un depósito de talud (UF) se forma encima del basamento volcánico del área (UG).
- 2) La actividad tectónica provocó un desplazamiento de hasta 180 cm en las unidades anteriormente conformadas.
- 3) La degradación del escarpe, durante ó ligeramente posterior al evento sísmico generó la formación de la cuña coluvial (UD).
- 4) Por erosión del escarpe, un depósito de talud se forma (UC) y un episodio de actividad volcánica en la zona provocó su recubrimiento por una capa de cenizas (UB).
- 5) Una ruptura superficial, ocasionada por un sismo, provoca un desplazamiento de todas las unidades anteriores a lo largo de una zona de falla.
- 6) En la cima de la trinchera y cubriendo todas las unidades, se inició la formación del suelo actual (UA).

#### *4.3.3 Interpretación*

Se ha evidenciado dos paleorupturas superficiales en la trinchera Agua Fría 4. El primer evento corresponde a un desplazamiento de la superficie que podría haber alcanzado los 180 cm de acuerdo con el espesor de la cuña coluvial resultante.

Este evento ocurrió después de la formación de la UE y contemporáneamente o ligeramente antes de la formación de UD. Posteriormente, ocurrió otro sismo asociado a una ruptura que afectó todas las unidades anteriores a UB. Desafortunadamente, la mala preservación del registro tectono-sedimentario no permite de evaluar el desplazamiento asociado a este segundo evento.

#### 4.4 Dataciones

En los análisis paleosismológicos es muy importante recolectar muestras de carbono para fechar diferentes unidades. Estas muestras deben tomarse en las unidades de la trinchera en donde los desplazamientos sean evidentes. De tal manera que se puedan inferir la edad en la que han ocurrido los movimientos, también son importantes para realizar cálculos de intervalo de recurrencia de grandes terremotos.

Las muestras de este análisis paleosismológico fueron datadas mediante el método Carbono 14 (C14), y calibradas a partir de la interface conocida como OxCal 4.2 de Ramsey (2013) de la University of Oxford.

La siguiente tabla contiene las 10 muestras que han sido tomadas en cuenta para los fechamientos:

Trinchera/ Muestra	Unidad	Type	edad calibradas cal BC	edad calibradas cal BP	edad no calibrada (BP)	edad Err
<b>T2W-C4</b>	UE (Antes del primer evento)	Charcoal	10146-9795	12096-11749	10,200	45
<b>T2W-C5</b>	UB (Cuña coluvial 2 Generada a partir del segundo evento)	Charcoal	2452-2203	4402-4153	3,840	20
<b>T2E-C2</b>	UD (Cuña coluvial 1 Generada a partir del primer evento)	Charcoal	204-46	2154-1996	2,110	30

<b>T4W-C6</b>	UD (Cuña coluvial 1)	Charcoal	13047-12262	14997-14202	12,450	65
<b>T4W-C10</b>	UB	Charcoal	5986-5837	7936-7787	7,010	30
<b>T3A-C7</b>	CW (cuña coluvial)	Charcoal	2480-2344	4430-4294	3,930	20
<b>T3C-C2</b>	UE (Base de la trinchera)	Charcoal	141-323 calAD	1799-1627	1,790	15
<b>T3C-C13</b>	CW (cuña coluvial)	Charcoal	353-166	2303-2116	2,160	15
<b>T3A-C12</b>	CW (cuña coluvial)	Charcoal	4351-4255	6301-6205	5,450	30
<b>T3A-C14</b>	UC	Charcoal	11801-11533	13751-13483	11,800	55

Tabla 5: Resultados de las dataciones de las muestras mediante el método de Carbono 14 (C14), la unidad estratigráfica donde se recolectó, la trinchera a la que corresponde, la unidad estratigráfica de donde se recolectó y las edades calibradas de las muestras, la edades calibradas en BP y BC, las edades no calibradas y el rango de error

## 5. Discusión

La excavación de tres trincheras paleosísmicas en el segmento sur de la falla Agua Fría, así como la datación de muestras en las trincheras de los dos segmentos de falla, permitieron completar los resultados preliminares obtenidos por Campos-Medina (2019) en el segmento norte de la falla.

El análisis paleosismológicos del segmento sur de la falla Agua Fría permitió la identificación de varios desplazamientos ocasionados por la actividad tectónica de la falla como se describen a continuación:

- a) En la trinchera Agua Fría 1 se ha interpretado un solo evento paleosismológico, el cual corresponde a un desplazamiento de 70 y 60 cm, acomodado en dos fallas sintéticas separadas por 15 metros. No fechamientos disponibles en esta trinchera, pero el evento ocurrió después del depósito de UB y antes de la formación de UA.
  
- b) En la trinchera Agua Fría 2 se han identificado dos eventos paleosismológicos, mediante la presencia de cuñas coluviales. En esta trinchera no se preservó el registro sedimentario reciente en el bloque de piso de falla y no se puede medir el desplazamiento de las unidades afectadas por las deformaciones tectónicas. Sin embargo, utilizando las relaciones entre desplazamientos y el espesor de las cuñas coluviales propuesta por McCalpin (2009) se ha podido identificar un evento paleosismológico ocurrido justo antes de la formación de la cuña coluvial UB, el cual corresponde a un desplazamiento a lo largo de esta falla de 102-105 cm. De la misma forma, se ha podido interpretar la ocurrencia de otro evento paleosismológico, más antiguo, ocurrido justo antes de la formación de la cuña coluvial UD, el cual corresponde a un desplazamiento a lo largo de la falla de 220-290 cm. Hay edades de radiocarbono disponibles en esta trinchera y la edad de estos eventos será discutida a continuación.

c) En la trinchera Agua Fría 4 se identificaron también dos eventos paleosismológicos, mediante la presencia de cuñas coluviales y unidades desplazadas por la falla. Un evento ocurrió después del depósito de la UB (afectado por el fallamiento) y antes de la formación de la UA.

Desafortunadamente, la mala preservación de los marcadores de la deformación no permite estimar el desplazamiento cosísmico asociado a este primer evento. Otro evento, más antiguo, corresponde a la formación de la cuña coluvial UD. Considerando el espesor de la cuña coluvial, este evento corresponde a una ruptura superficial de 180 cm.

Hay edades de radiocarbono disponibles en esta trinchera y la edad de estos eventos será discutida a continuación.

### *5.1 Dataciones y correlación de los eventos entre trincheras*

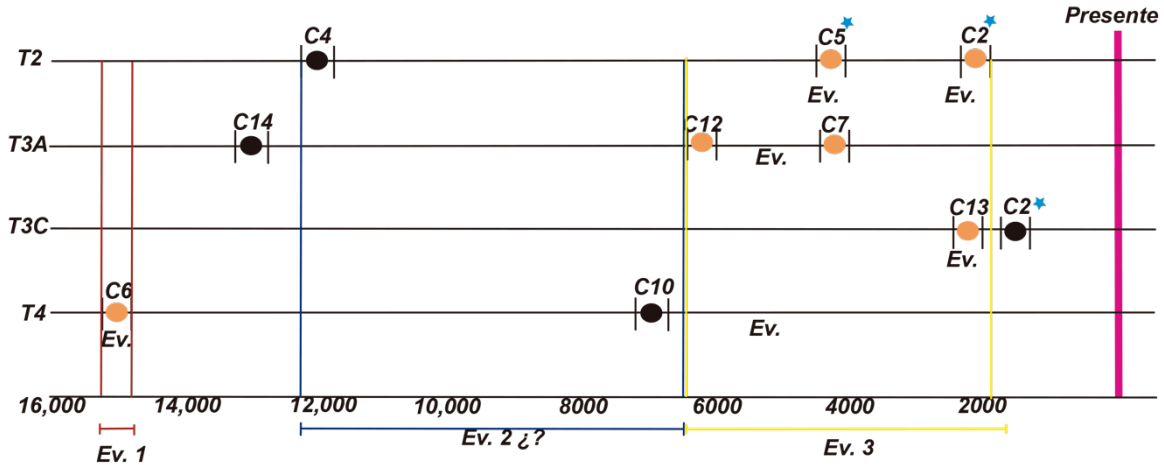
En este trabajo se fecharon 10 muestras de radiocarbono. Cinco de ellas provienen de las trincheras T2 y T4, interpretadas en el presente trabajo y otras 5 provienen de las trincheras T3A y T3A, interpretadas por Campos-Medina (2019).

A partir de los resultados del análisis paleosismológico y de las dataciones radiocarbono, se han logrado hacer correlación entre las diferentes trincheras y describir e interpretar tres eventos paleosísmicos.

Trinchera/ Muestra	edad calibradas BP
T2-C4	12096-11749
T2-C5	4402-4153
T2-C2	2154-1996
T4-C6	14997-14202
T4-C10	7936-7787
T3A-C7	4430-4294
T3C-C2	1799-1627
T3C-C13	2303-2116

T3A-C12	6301-6205
T3A-C14	13751-13483

Tabla 6: Edades calibradas. Incluye: La trinchera en la que fue recolectada; la clave de la muestra y la edad calibrada en BP.



### 5.1.1 Trinchera Agua Fría 2 (T2)

Tres muestras han sido recolectadas y fechadas en esta trinchera:

La muestra C4 pertenece a la UE y tiene una edad calibrada de *12096-11749 años BP* indicando un periodo de registro al menos Holoceno en esta trinchera.

La muestra C2 tiene una edad calibrada de *2154-1996 años BP* y corresponde a la segunda cuña coluvial, UD.

La muestra C5 pertenece a la UB y dio una edad calibrada de *4402-4253 años BP*. Esta unidad corresponde a la primera cuña coluvial derivada de un evento sísmico posterior al que generó la cuña coluvial UD. Por lo tanto, existe una incongruencia entre las edades de las dos cuñas coluviales y por lo menos una de las dos edades es incorrecta. El error en las dataciones implica proponer dos hipótesis:

- a) La primera hipótesis es que la edad de la UD (muestra C2) sea errónea y se considera que las muestras C4 y C5 representan la edad de la formación de las unidades UE y UB respectivamente. En este caso el Ev.2 ocurrió entre *12096 y 11749 años BP* provocando la formación de la cuña coluvial UD y el Ev. 1 ocurrió hace *4402-4153 años BP* Provocando la formación de la cuña coluvial UB.
  
- b) La segunda hipótesis consiste en que la edad de la UB (muestra C5) sea errónea y se considera que las muestras C2 y C4 son representativas de la edad de la formación de las unidades UD y UE respectivamente. En este caso el Ev.2 tendría una edad calibrada de *2154-1996 BP*, mientras que el Ev.1 sería más reciente.

#### 5.1.2 *Trinchera Agua Fría 3A*

Tres muestras han sido fechadas dentro de esta trinchera:

Dos muestras, C7 y C12, han sido recolectada en la cuña coluvial UB y tienen respectivamente una edad calibrada de 4430-4294 y 6301-6205 años BP.

La muestra C14 fue recolectada en la UC (unidad inferior a la cuña coluvial) y tiene un rango de edad de *13751-13483 BP*.

La edad de C7 es similar a la edad de muestra C5 (*4402-4153 años BP*) que fue recolectada en la cuña coluvial más reciente de la trinchera 2. Esta coincidencia de edades podría indicar que la última ruptura que ocurrió en el sistema de falla Agua Fría, rompió a lo largo de los dos segmentos de falla hace 4 ka. Tal hipótesis esta soportada también por la similitud del desplazamiento registrado en ambas trincheras: 161 cm en la trinchera 3A y 150 cm en la trinchera 2. Sin embargo, hay una variación considerable en las dataciones de la cuña coluvial de la trinchera 3A (muestra C7 y C12) e incertidumbre sobre la interpretación de las edades en la trinchera 2. Por lo tanto, más dataciones serán necesarias para confirmar esta

hipótesis y en este trabajo, consideraremos que el evento ilustrado por la cuña coluvial en la trinchera 3A ocurrió entre *4430-4294 BP* y *6301-6205 años BP*.

### *5.1.3 Trinchera Agua Fría 3C (T3C)*

Por los desplazamientos encontrados en las trincheras 3A, 3B y 3C, y el carácter superficial de las unidades afectadas, Campos-Medina (2019), concluyó que las rupturas encontradas en las tres trincheras corresponden a un mismo evento sísmico. En este contexto, las edades de las cuñas coluviales tendrían que ser las mismas entre la trinchera 3A y la trinchera 3C.

Dos muestras fueron recolectadas en la trinchera 3C, una dentro de la cuña coluvial (C13) dando una edad calibrada de *2303-2116 años BP* y otra en la UE, unidad anterior a la cuña coluvial, localizada en la base de la trinchera, con una edad de *1799-1627 años BP*.

La interpretación de estos resultados es complicada considerando la incongruencia de las edades encontradas. Considerando la profundidad de la trinchera y la tasa de sedimentación estimada con base a las otras trincheras para la zona, la edad encontrada para la UE puede ser descartada. La hipótesis más probable es que se muestreo una raíz, de edad posterior a la de la formación de la UE.

La edad de la cuña coluvial es también problemática porque no corresponde a ninguna de las edades encontradas en esta misma cuña coluvial en la trinchera 3A. Considerando las 3 edades obtenidas de la cuña coluvial en las 2 trincheras podemos concluir que el evento que dio origen a esta cuña ocurrió entre *6301-2116 años BP*. Más edades serán necesarias para constreñir la edad de este evento.

### *5.1.4 Trinchera Agua Fría 4 (T4)*

Dos muestras han sido recolectadas en esta trinchera buscando a constreñir la edad de los eventos encontrados. Una primera muestra C6 fue recolectada dentro de la cuña coluvial UD y la datación arrojó una edad calibrada de *14997-14202 años BP*.



C10 fue tomada dentro de la UB, unidad afectada por el evento paleosísmico más reciente y arrojó una edad de 7936-7787 años BP.

Al medir la cuña coluvial UD se obtuvo un desplazamiento de 180 cm, asociado al Ev.2. El Ev.1 no fue posible de medirse.

Con las dataciones; la cuña coluvial y el desplazamiento de unidades se evidenciaron dos eventos, dentro de la trinchera 4.

El Ev.2 tiene una edad de 14997-14202 años BP, este evento no se ha encontrado en ninguna de las otras dos trincheras.

El Ev.1 tiene una edad menor a 7936-7789 años BP. Este evento por la datación, ha sido relacionado con el evento registrado en tres trincheras anteriores, con un rango de edad de 6301-2116 años BP.

#### *5.1.5 Eventos*

Considerando las incertidumbres que persisten acerca de las edades de las unidades encontradas en las trincheras, la correlación de eventos entre las diferentes trincheras se tiene que considerar como muy preliminar y tendrá que ser confirmada con más dataciones.

El evento más antiguo encontrado en las trincheras (Ev.1) ha sido evidenciado en la trinchera 4, con una edad calibrada de 15-14 ka BP. Basado en el tamaño de la cuña coluvial, este evento podría haber tenido un desplazamiento cosísmico de 180 cm.

Para los dos eventos más recientes, dos hipótesis tienen que ser consideradas:

- a) La primera hipótesis es que la edad de la cuña coluvial UD en la T2 sea errónea. En este caso el Ev.2 ocurrió entre 12 y 4 ka BP provocando la formación de la cuña coluvial UD y el Ev.3 ocurrió hace 4 ka BP generando la formación de la cuña coluvial UB. En esta hipótesis, la ruptura encontrada en las tres trincheras podría corresponder a cualquiera de los dos eventos.
- b) La segunda hipótesis consiste en que la edad de la cuña coluvial UB en la T2 sea errónea, en este caso el Ev.2 tendría una edad de 6-2 ka BP y

corresponde a las rupturas visibles en los dos segmentos de falla en las T2 y T3 mientras el Ev.3 sería más reciente y visible únicamente en de la T2.

### *5.2 Estimación de parámetros paleosismológicos:*

A partir de los datos geomorfológicos, las evidencias primarias y los datos paleosismológicos (longitud de ruptura, desplazamiento vertical, edades de los eventos) se ha podido estimar parámetros paleosismológicos como son el intervalo de recurrencia ó retorno (ciclo sísmico) y las paleomagnitudes de los eventos.

#### *5.2.1 Intervalo de recurrencia o retorno (Ciclo sísmico)*

El intervalo de recurrencia se calculó a partir de la relación entre los eventos evidenciados en las trincheras y los años que han transcurrido. En los últimos 15 ka BP se han registrado tres eventos. El periodo de recurrencia de grandes terremotos para la falla Agua Fría es de 5 ka BP. Es muy importante mencionar que el intervalo de recurrencia es preliminar, y se ha determinado a partir de los datos que se tienen. Es importante realizar más dataciones, para tener un intervalo de recurrencia más específico.

#### *5.2.1 Paleomagnitudes*

La estimación de las paleomagnitudes se obtuvo a partir de las siguientes relaciones (teóricas y empíricas): Wells y Coopermish 1994, Wesnousky 2008, y Hanks y Kanamori 1979. Se tomaron varias formulas en cuenta para poder comprar los resultados obtenidos a partir del desplazamiento cosísmico y a partir de la longitud superficial de la falla, considerada como longitud potencial de ruptura.

### 5.2.2.1 Relación de Wells y Coopersmith (1994)

Wells y Coopersmith (1994) proponen dos relaciones empíricas para calcular una paleomagnitud en una falla normal. La primera propone calcular la paleomagnitud a partir de la longitud superficial en Km (SRL), para la cual se utilizó la longitud de la falla (15-27 km), calculada por Campos-Medina (2019) a partir de un estudio geomorfológico- estructural. Los siguientes resultados corresponden a los límites mínimo y máximo de la estimación de la longitud.

$$M_w = 5.08 + 1.16 * \log SRL \pm 0.2$$

$$M_w = 5.08 + 1.16 * \log 15 \pm 0.2$$

$$M_w = 6.45 \pm 0.2$$

$$M_w = 5.08 + 1.16 * \log SRL \pm 0.2$$

$$M_w = 5.08 + 1.16 * \log 27 \pm 0.2$$

$$M_w = 8.93 \pm 0.2$$

La segunda relación empírica propone calcular la paleomagnitud a partir del desplazamiento cosísmico vertical máximo (Dmax). La paleomagnitud se determinó a partir de la siguiente regresión lineal simple:

$$M_w = 6.69 + 0.74x \log(D_{max})$$

En este caso se uso como desplazamiento cosísmico vertical máximo al generado por el Ev. 2 medido en la T2, correspondiente a 290 cm.

$$M_w = 6.69 + 0.74x \log(290)$$

$$M_w = 8.5$$

Las paleomagnitudes calculadas a partir del desplazamiento cosísmico vertical máximo y a partir de la longitud de la falla resultaron muy diferentes y serán discutidas a continuación.

### 5.2.2.2 *Relación de Wesnousky (2008)*

La segunda relación utilizada es la que propuso Wesnousky (2008). Esta se basa en la longitud de ruptura de la falla (SRL) durante el evento, se sustituye ambos datos en los valores de la siguiente ecuación:

$$M_w = 6.12 + 0.47 \times \log \text{SRL}$$

Teniendo en cuenta que la traza morfológica es de 15 km (SRL) y la traza geomorfológica- estructural es de 27 km (SRL).

$$M_w = 6.12 + 0.47 \times \log 15$$

$$M_w = 6.67$$

$$M_w = 6.12 + 0.47 \times \log \text{SRL}$$

$$M_w = 6.12 + 0.47 \times \log 27$$

$$M_w = 6.79$$

Y se obtiene como resultado: para la traza morfológica de 15 km (SRL) una magnitud de  $M_w = 6.67$  y para la traza morfológica estructural de 27 km (SRL) una magnitud de  $M_w = 6.79$ . Resultados similares a los calculados con la primera relación empírica de Wells y Coopersmith (1994).

### 5.2.2.1 Relación de Hanks y Kanamori (1979)

La tercera relación utilizada fue la que propusieron Hanks y Kanamori (1979), estos autores hicieron los cálculos de la paleomagnitud a partir de bases teóricas y no empíricamente. Esta relación se basa en los valores de momento sísmico, área de ruptura y desplazamiento promedio, de acuerdo a lo siguiente.

$$M_w = \frac{2}{3} \log * M_o - 10.7 \text{ (Donde } M_o \text{ es el momento sísmico)}$$

El momento sísmico es  $M_o = \mu D_{prom} A = \mu D_{prom} L W = \mu D_{prom} \left(\frac{4}{3} SRL\right) W$ , donde =

La rigidez es de  $\mu = 3 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$

D prom: desplazamiento vertical promedio en cm

A: área del plano de falla

L: longitud de la ruptura subsuperficial en cm  $\left(L = \frac{4}{3} \text{ de la ruptura superficial}\right)$

SRL: longitud de ruptura superficial en cm (SRL = 15 y 27 km)

W: anchura del plano de falla en cm (15 km, dado por la simicidad)

Cuando se sustituyen los valores de  $M_o$  en la relación de  $M_w$ , resulta una magnitud de  $M_w$  para el desplazamiento promedio de los 3 eventos (210 cm).

$$\frac{M_w = \left[ \log \left( \mu \left( \frac{4}{3} SRL \right) W_{D_{prom}} \right) - (16.05) \right]}{[1.5]}$$

Para el desplazamiento promedio de los 3 eventos, considerando la longitud de ruptura de 15 km:

$$M_w 15 = \frac{\left[ \log \left( 3 \times 10^{11} \left( \frac{4}{3} 1.5 \times 10^6 \right) (1.5 \times 10^6) (210) \right) - (16.05) \right]}{[1.5]} =$$

$$M_w = 6.81$$

para la longitud de ruptura de 27 km:

$$M_w 27 = \frac{\left[ \log \left( 3 \times 10^{11} \left( \frac{4}{3} 1.5 \times 10^6 \right) (2.7 \times 10^6) (210) \right) - (16.05) \right]}{[1.5]} =$$
$$M_w = 6.98$$

### 5.3 Comparación de las paleomagnitudes calculadas

Falla	SRL (km)	Evento	Dmax m	Dprom (cm)	<sup>(1)</sup> Mw (Dmax)	<sup>(1)</sup> Mw (SRL)	<sup>(2)</sup> Mw (SRL)	<sup>(3)</sup> Mw (SRL y Dprom)
Agua Fría (traza morfológica)	15		290	200	8.5	6.45	6.67	6.81
Agua Fría (traza geomorfo-estructural)	27	-----	-----	--	-----	8.93	6.79	6.98

Tabla 7: Estimación de magnitudes utilizando las relaciones empíricas de (1) Wells y Coopersmith (1994), (2) Wesnousky (2008) y (3) Hanks y Kanamori (1979)

Las magnitudes calculadas con base a la longitud de la falla Agua Fría, mediante las diferentes relaciones indican resultados semejantes comprendidos entre Mw 6.45 y 6.79. Estos resultados corresponden a la magnitud de un evento sísmico que rompería sobre la totalidad de la falla Agua Fría.

En cambio, las variaciones en las magnitudes calculadas utilizando el desplazamiento cosísmico vertical máximo son mucho mayores (6.8-8.9), indicando una incongruencia entre el desplazamiento encontrado en las trincheras y la magnitud que podría generar una falla de esta longitud. Esta inconsistencia podría explicarse por la ocurrencia de un sismo de ruptura múltiple, que no abarca solo la falla Agua Fría, si no también abarca otros sistemas de fallas relacionados. Tal caso se ha visto en el CVTM con el sismo de Ameca de 1567 (Surte, 2015) y de Acambay de 1912 (Urbina y Camacho, 1913). Más recientemente el sismo de Mexicali en el 2010 provocó una ruptura de fallas múltiple, ocasionando un sismo de Mw 7.2, con desplazamientos que superaron los 300 cm en fallas de longitud inferior a 30 km (Fletcher et al., 2014). Tal escenario, es el de un sismo comparable a el de Mexicali, es entonces posible en el Centro del CVTM, pero esta hipótesis tendría que ser confirmada o descartada con más estudios en las fallas de la zona.

## 6 Conclusiones

El estudio neotectónico llevado a cabo en este trabajo, ha permitido confirmar la actividad tectónica reciente de la falla Agua Fría (FAF). Esta falla es la más larga y continua que afecta la geomorfología del Campo Volcánico Los Azufres. El escarpe asociado a esta falla supera los 150 metros de altura y la traza de la falla alcanza una longitud de 15 a 27 km.

En este trabajo se han presentado las interpretaciones paleosismológicas de tres trincheras realizadas en el escarpe principal, o segmento sur, de la FAF, se han fechado las unidades por medio de la recolección y el análisis de radiocarbón y se han comparado los resultados obtenidos con la interpretación realizada por Campos-Medina (2019) en el segmento norte de la falla.

Mediante el estudio paleosismológico se ha evidenciado la ocurrencia de desplazamientos importantes cosísmicos a lo largo del segmento sur de la FAF, compatibles con los desplazamientos encontrados anteriormente en el segmento norte de la falla (Campos-Medina, 2019). A partir de la excavación de tres trincheras, se han evidenciado varios desplazamientos tectónicos en cada excavación. Por correlación de las trincheras entre ellas, mediante el fechamiento de diez muestras de carbón, se ha podido interpretar la ocurrencia de tres eventos paleosísmicos en los últimos 15 mil años. De estos eventos, solo uno parece haber activado el segmento norte de la FAF, los demás han sido registrados únicamente en el segmento sur. Desafortunadamente, persisten incertidumbres importantes a cerca de la interpretación de las edades de los eventos y más dataciones radiocarbón van a ser necesarias para confirmar y precisar estos resultados.

Los datos obtenidos en este estudio, aunque preliminares, han permitido la estimación de ciertos parámetros sísmicos que caracterizan la falla Agua Fría.

Considerando la longitud de la falla (15 a 27 km) y el desplazamiento máximo vertical de 2.90 metros en un solo evento encontrado en una de las trincheras (T2),



la FAF ha sido capaz de generar terremotos importantes de magnitud comprendida entre Mw 6.45 y 6.79, con un intervalo de recurrencia aproximado de 5000 años. Lo anterior ha permitido catalogar la falla como una amenaza sísmica significativa para la población cercana al Campo Volcánico de los Azufres. Las inconsistencias entre la longitud de la falla, la longitud máxima de ruptura y los desplazamientos cosísmicos encontrados en las trincheras implica la posibilidad de considerar eventos con ruptura múltiple, es decir eventos sísmicos que rompen a lo largo de varias fallas en el mismo tiempo, generando desplazamientos superficiales correspondientes a una falla más larga como se ha visto recientemente durante el sismo de Mexicali de 2010 (Fletcher et al., 2014). Esta hipótesis tiene que ser validada con la excavación de más trincheras en las fallas del complejo Volcánico de los Azufres pero parece soportada por la presencia de ruptura en los dos segmentos de falla durante un mismo evento.

En cuanto a la estimación del peligro sísmico, los resultados de este trabajo tendrán que ser integrados al cálculo del peligro para la zona. Los tiempos de recurrencia son comparables a los encontrados en el Graben de Acambay y en la zona de Morelia, indicando que todo el sistema de fallas Morelia-Acambay sigue activo, con tiempos de recurrencia de sismos mayores que superan el registro instrumental e histórico. En este contexto, el cálculo del peligro sísmico basado únicamente en los datos instrumentales e históricos, son inefficientes para calcular el peligro real de la zona. La posibilidad de un sismo de magnitud considerable tiene que ser considerada en el Campo Volcánico de los Azufres y tal evento podría tener consecuencias desastrosas para la planta geotérmica de los Azufres, así como para la población de las ciudades cercanas al edificio volcánico como son: Morelia, Ciudad Hidalgo y Maravatío, si no están preparadas adecuadamente.

## 7 Bibliografía

- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Ferrari, L., (1988). Effect of strain rate in the distribution of monogenetic and polygenetic volcanism in the Transmexican volcanic belt. *Geology*. Vol. 26, No.7, Pág. 591-594.
- 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*. Vol. 55, No.1, Pág.12-29.
- Arce, J.L., Macías, J.L., Rangel, E., Layer, P., Garduño-Monroy, V.H., Saucedo, R., García, F., Castro, R., Pérez-Esquivias, H., (2012). Late Pleistocene rhyolitic explosive volcanism at Los Azufres Volcanic Field, central Mexico. In Aranda-Gómez, J.J., Tolson, G., Molina-Garza, R.S., (eds). *The Southern Cordillera y Beyond: Boulder, CO. Geological Society of America, Field Guide*. Vol.25, Pág. 45-82.
- Astiz-Delgado, L.M., 1980. Sismicidad en Acambay, Estado de México-el temblor del 22 de febrero de 1979. (Tesis Doctoral). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Pág. 130.
- Bull, W.B., McFaddel, L.D., (1977). Tectonic Geomorphology north y south of the Garlock fault, California. (Eds: DO Doehring). *Geomorphology of 9 the Arid Regions*. Pág. 115-138.
- Campos-Medina, J.P., (2019). Estudio Paleosismológico del segmentos norte de la falla Agua Fria, Los Azufres, Michoacan. (Tesis de Maestría). Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Pág. 82.
- Cathelineau, M., (1988). Cation site occupancy in chlorites y illites as a function of temperature. *Clay Minerals*. Vol. 23, No. 4, Pág. 471-485,
- Cruz-Noé, E., Lorenzo-Pulido, C., Soto-Peredo, J., Pulido-Arreola, S., (2013). Micro seismic monitoring during production. Utilization y case examples from Mexico. *Revista Geotermia*. Vol. 26, No.2, Pág. 33-45.
- De la Cruz, V., Aguilar, J., Sandoval, J., Ortega, D., (1983). Estudio geológico estructural a detalle del campo geotermico Los Azufres, Mich. Informe Comision de Electricidad 9/82. Pág. 33.
- Demant, A., (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista Instituto de Geología*. Vol. 2, Pág. 172-187.
- Dobson, P.F., Mahood, G.A., (1985). Volcanic Stratigraphy of the Los Azufres geothermal area, Mexico. *Journal Of Volcanology y Geothermal Research*. Vol. 25, No. 3-4, Pág. 273-287.
- Ferrari, L., (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol. 53, No. 1, Pág. 84-92.
- Ferrari, L., Garduño-Monroy, V.H., Pasquaré, G., Tibaldi, A., (1993). The Los Azufres caldera, México. The result of multiple nested collapses. Reply to a comment by Robin y Pradal. *Journal of Volcanology y Geothermal Research*. Vol. 56, No. 3, Pág. 345-349.
- Ferrari, L., Garduño, V.H., Pasquaré, G., Tibaldi, A., (1991). Geology of Los Azufres caldera, México, y its relationships wthit regional tectonics. *Journal of Volcanology y Geothermal Research*. Vol. 47, No. 1-2, Pág. 129-148.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Carrasco-Núñez, G., (1999). Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central México: From the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology*, Vol. 27, No. 4, Pág. 303-306.
- Ferrari, L., Rosas-Elguera J., (1999a), Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico the Tepic-Zacoalco rift revised. *Geological Society America Special Paper*. Vol. 334, No. 3, En prensa.
- Fletcher, J., Teran, O.J., Rockwell, T.K., Oskin, M., Hudnut, K.W., Mueller, K.J., Spelz, R. M., Akciz, S. O., Masana, E., Faneros, G., Fielding, E.J., Leprince, S., Morelan., A.E., Stock, J. L., Elliott, E.K., Gold, A.J., Liu-Zeng, J., González-Ortega, Hinojosa-Corona A.,González-García, J., (2014). Assembly of large earthquake from a complex fault system: Surdave rupture kinematics of the 4 April 2010 El Mayor-Cucapah (Mexico) Mw. 7.2 earthquake. *Geosphere*. Vol. 10, No. 4, Pág. 797-827.
- Garduño-Monroy, V.H., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I., Rogríguez-Torres, G.M., (2001). Efectos de las fallas asociadaas a sobre explotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 18, No. 1, Pág. 37-54.
- Garduño-Monroy, V.H., Pérez-Lopez, R., Israde-Alcantara, I., Rodríguez-Pascua, M.A., Szykaruk, E., Hernandez-Madrigal, V. M., García-Estrada, G., (2009). Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central México. *Geofísica internacional*. Vol. 48, No. 3, Pág. 319-335.
- Gómez-Vasconcelos, M. G., Garduño-Monroy, V. H., Macías, J. L., Layer, P. W., & Benowitz, J. A. (2015). The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 301, Pág. 128-147.

Gómez-Vasconcelos, M. G., Garduño-Monroy, V. H., Macías, J. L., Layer, P. W., & Benowitz, J. A. (2015). The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 128-147.

Hanks, T.C., Kanamori, H., (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. 84, No. B5. Pág. 2348-2350.

Johnson, C.A., Harrison, C.G.A., (1990). Neotectonics in central Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. Vol. 64, No. 2-4, Pág. 187-210

Lacan, P., Ortuño, M., Audin, L., Pera, H., Baize, S., Aguirre-Díaz, G., Zúñiga, F.R., (2018). Sedimentary evidence of historical y prehistorical earthquakes along the Venta de Bravo Fault System, Acambay Graben (central México). *Sedimentary Geology*. Vol. 365, Pág. 62-77.

Lacan, P., Zúñiga, F.R., Ortuño, M., Persaud, M., Aguirre, G., Langridge, R., Villamor, P., Perea, H., Štěpánčíková, P., Carreon, D., Cerca, M., Suñé-Puchol, I., Corominas, O., Audin, L., Baizer, S., Lawton, T., Rendón, A., (2013). Paleoseismological History of the Acambay Graben (Central México). AGU Fall Meeting. American Geophysical Union, San Francisco. Vol. 94, No. 49, Resúmen T23C-2591.

Langridge, R.M., Persaud, M., Zúñiga, F.R., Aguirre-Díaz, G., Villamor, P., Lacan, P., (2013). Preliminary paleoseismic results from the Pastores fault y its role in the seismic hazard of the Acambay Graben. *Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 30, No. 3, Pág. 463-381.

Langridge, R.M., Weldon, R.J., Moya, J.C., Suárez, G., (2000). Paleoseismology of the 1912 Acambay earthquake y the Acambay-Tixmadejé fault, Trans-Mexican volcanic belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. 105, No. B2, Pág. 2019-3037.

Lermo, J., Cruz, E., Hernández, P., Núñez, F., Urban, E., Espitia, G., (2009). Estudio de sismica pasiva de Tres Virgenes, BCS. Período 2009: México. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Federal de Electricidad, reporte técnico. Pág. 33.

Macías, J.L., Arce, J., Garduño-Monroy, V.H., Castro, R., García-Tenorio, F., Saucedo, R., (2008). Estudio volcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y la zona geotérmica de los Azufres, Mich. Comisión Federal de Electricidad, reporte interno. Pág. 73.

Martínez, J., (2010). Fallas estructurales comunes en las edificaciones de Mexicali, B, C, debido al sismo de 4 de abril 2010. In XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Guanajuato, México. Pág. 115.

McCalpin, J., (2006). Quaternary Faulting y Seismic Source Characterization in the El Paso-Juarez Metropolitan Area: Collaborative Research with the University of Texas at El Paso. GEO-HAZ Consulting.

McCalpin, J., (2009). Paleoseismology. Second Edition. Academic Press-Elsevier, Amsterdam. Pág. 629.

McCalpin, J., Nelson, A.R. (1996). Introduction to paleoseismology. Pág. 1-32.

Mooser, F., (1972). The Mexican Volcanic Belt, structure y tectonics: *Geofísica internacional*. Vol.12. Pág. 55-70.  
Norato-Cortéz, T.A., (1998). Estudio Estratigráfico-Volcanológico-Estructural de los Volcanes San Pedro y Altamirano (Estados de México y Michoacán) y su Relación con la evolución tectónica del sector central del Cinturón Volcánico Mexicano: México, Linares, Nuevo León. Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León. Pág. 77.  
Norini, G., Capra L., Borselli L., Zúñiga, F.R., Solari, L., Sarocchi D., (2010). Large-scale gravitational-tectonic deformations and landslides in the Acambay graben, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 35, Pág. 1445-1455.

Ortega-Gutiérrez, F., Miltre-Salazar, L.M., Roldan-Quintana, J., (1992). Carta geológica de la República Mexicana. Consejo de Recursos Minerales y el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Ortuño, M., Colominas, O., Villamor, P., Zúñiga, R.F., Lacan, P., Aguirre-Díaz, G., Ramírez-Herrera, M.T., (2019). Evidence of recent ruptures in the central faults of the Acambay Graben (central México). *Geomorphology*. Vol. 326, Pág. 17-37.

Ortuño, M., Zúñiga, F. R., Corominas O., Perea H., Ramirez- Herrera, H.Y., Stepacikova, P., Villamor, P., Aguirre-Díaz, G., Norini, G., (2011). Caracterización de fallas sismogénicas en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. Resultados Preliminares, Congreso Latinoamericano de Geología.

Ortuño, M., Zúñiga, F.R., Aguirre-Díaz, G.J., Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Roverato, M., (2015). Holocene paleo-earthquakes recorded at the transfer zona of two major faults: the Pastores y Venta de Bravo faults (Trans Mexican Volcanic Belt). *Geosphere*. Vol. 11. No. 1, Pág. 160-184.

Ortuño, M., Zúñiga, F.R., Aguirre, G., Carreón D., Cerca, M., Roverato, M., (2012). Holocene earthquakes recorded at the tip of the Pastores fault system (central México). Abstract volumen of the 3rd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Earthquake Archeology y Paleoseismology.

Pasquaré, G., Garduño-Monroy, V.H., Tibaldi, A., Ferrari, M., (1988). Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*. Vol 149, No. 1-4, Pág. 353-364.

Pérez-Esquivas, H., Macías-Vázquez, J.I., Garduño-Monroy, V.H., Arce Saldaña, J.L., García Tenorio, F., Castro Govea, R., Valdés, G., (2010). Estudio volcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y del campo geotérmico de los Azufres, Mich. *Geotermia*. Vol. 23, No. 2, Pág. 51-63.

Pradal, E., Robin, C., (1985). Découverte d' une caldera majeure associée au champ géothermique de Los Azufres (Mexique). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*. Vol. 132, Pág. 135-142.

Pradal, E., Robin, C., (1994). *Long-lived magmatic phases at Los Azufres volcanic center, Mexico*. *Journal of volcanology y geothermal research*. Vol. 63, No. 3-4, Pág. 201-2015.

Ramírez, S., Reyes V., 1873. Informe sobre los temblores de Agua Fría y Jariepo : Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística. Época 3.1. Pág. 67-68.

Ramsey, C.B., (2009). Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*. Vol. 51, No.1, Pág. 337-360.

Reyes-Martínez, J., Nieto-Samaniego, A. F., (1990). Efectos Geológicos de la Tectónica Reciente en la Parte Central de México. *Revista Mexicana de ciencias geológicas*. Vol. 9, No.1, Pág. 33-50.

Suárez, G., (1992). El sismo de Jalpan del 3 de Enero de 1920. *Revista de Ingeniería Sísmica*. Vol. 42, Pág. 3-15.

Sunye-Puchol, I., Lacan, P., Ortuño, M., Villamor, P., Audin, L., Zúñiga, F.R., Lawton, T., (2015). La falla San Mateo : nuevas evidencias paleosismológicas de fallamiento activo en el graben de Acambay, México, *Revista mexicana de ciencias geológicas*. Vol. 32, No.3, Pág. 361-376.

Suter, M., (2015). Rupture of the Pitaycachi fault in the 1887 Mw 7.5 Sonora, Mexico earthquakes (southern Basin-and-Range Province): Rupture kinematics y epicentre inferred from rupture branching patterns. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. 120, No.1, Pág. 617-641.

Suter, M., (2016). Early 19<sup>th</sup> century geologic studies of the Zimapán region, central Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol. 68, No.2, Pág. 215-230.

Suter, M., (2018). The 2 October 1847 Ml 5.7 Chapala graben triggered earthquake (trans-Mexican volcanic belt, west-central Mexico). *Macroseismic observations y hazard implications*. *Seismological Research Letters*. Vol. 89, No.1, Pág. 35-46.

Suter, M., Carillo-Martínez, M., López-Martínez, M., Farrar, E., (1995b). The Aljibes half-graben –Active extension at the boundary between the trans-Mexican volcanic belt y the Basin y Range province, Mexico. *Geological Society of American Bulletin*. Vol. 107. Pág. 627-641.

Suter, M., Carillo-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., (1996). Macroseismic study of shallow earthquakes in the central eastern parts of the trans-Mexican volcanic belt, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of Americana*. Vol. 88, No.6, Pág. 1952-1963.

Suter, M., López-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., Carrillo-Martínez, M., (2001). Quaternary intra-arc extension in the central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geological Society American Bulletin*. Vol. 113, Pág. 693-703.

Suter, M., Quintero-Legorreta, O., Johnson, C.A., (1992). Active faults y state of stress in the central part of the Trans-Mexican Volcanic belt, Mexico. The venta Bravo fault: *Journal of Geophysical Research*. Vol. 97, Pág. 11983-11993.

Suter, M., Quintero-Legorreta, O., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Farrar, E., (1995). The Acambay graben: Active intraarc extension in the Trans-Mexican volcanic belt, México. *Tectonics*. Vol. 14, No.6, Pág. 1245-1262.

Urbina, F., Camacho, H., (1913). La zona megasísmica Acambay-Tixmadejé, Estado de México, conmovida el 19 de noviembre del 1912. *Boletín del Instituto Geológico de México*. Vol. 32, Pág. 1-125.

Urquiza, M., (1872). Informe de ingeniero encargado de reconocer la Sierra de Ucareo para averiguar las probabilidades de una erupción volcánica. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y estadística*. Época 2.4. Pág. 586-588.

Valdés-Gonzáles, C., (2009). Estudios de sísmica pasiva en el campo geotérmico de los Azufres Michoacán, México. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Comisión Federal de Electricidad, reporte técnico DEZ DGF-AZ-16-19.

Valdés-Gonzáles, C., Pérez-Esquivas, H., (2007). Tres años de monitoreo sísmico pasivo en el campo geotérmico de Los Azufres Michoacan, México. *Geotermia*. Vol. 20, No.2, Pág. 55-65.

Wallece, R. E., (1987). A perspective of paleoseismology. *Direction in paleoseismology*. Vol. 22, No. 25, Pág. 7-16.

Wells, D. L., Coppersmith, K. J., (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, y surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*. Vol. 84, No.4, Pág. 1002.

Wesnousky, S. G., (2008). Displacement y geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues y implications for seismic-hazard seismological society of America. Vol. 98, No. 4, Pág. 1609-1632.

Zúñiga, F.R., Lacan P., Rodríguez-Pérez Q., Márquez-Ramírez., V.H., (2019). Temporal and Spatial Evolution of instrumented Seismicity in the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of South America Earth Sciences*, in press.

Zúñiga, F.R., Suárez, G., Figueroa-Soto, A., Mendoza A., (2017). A first order seismotectonic regionalization of México for seismic hazard y risk estimation. *Journal of Seismology*. Vol. 21, No.6, Pág. 1296-1322.