



---

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE GEOGRAFÍA

**“GEOLOGÍA AMBIENTAL Y PELIGROS GEOLÓGICOS A LO LARGO DE LAS  
FALLAS DE TENANGO, ESTADO DE MÉXICO”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**LICENCIADA EN GELOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS**

**PRESENTA**

RUTH ARACELI OLIVARES SÁNCHEZ

**ASESOR:**

Dr. en C.T. EDGAR ANGELES MORENO

**REVISORES:**

Dr. en C. HECTOR VICTOR CABADAS BÁEZ

Dr. en C.T. ALEXIS ORDAZ HERNÁNDEZ

Toluca, Estado de México, 2020



## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>ABREVIATURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>x</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xii</b>
<b>CAPITULO 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento y justificación del problema.....	1
1.2 Hipótesis.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Área de estudio.....	3
<b>CAPITULO 2. Metodología.....</b>	<b>4</b>
2.1 Método científico.....	4
2.2 Investigación documental.....	5
2.3 Fotointerpretación geológica.....	5
2.4 Geología de campo.....	5
2.5 Cartografía geológica.....	6
2.6 Análisis e interpretación de resultados.....	6
<b>CAPITULO 3. Marco teórico.....</b>	<b>8</b>
3.1 Marco geológico.....	8
3.1.1 Faja Volcánica Transmexicana Centro-Oriental.....	8
3.1.2 Sistema de fallas Tenango.....	10
3.1.3 Volcán Nevado de Toluca.....	11
3.1.4 Sector Occidental del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin.....	13
3.1.5 Basalto Tenango.....	14
3.1.6 Sismicidad a lo largo de la traza del SFT.....	16

3.2 Marco geológico-ambiental.....	18
3.2.1 Geología ambiental.....	18
3.2.2 Riesgo geológico.....	18
<b>CAPITULO 4. Resultados: Estratigrafía y Geología estructural.....</b>	<b>20</b>
4.1 Estratigrafía.....	20
4.1.1 Andesitas Tecamatlán-San Simonito.....	21
4.1.2 Complejo Volcánico Sierra de las Cruces.....	25
4.1.3 Campo Volcánico Chichinautzin.....	25
4.1.4 Domos Volcánicos de Andesita Putla.....	30
4.1.5 Flujos piroclásticos Calimaya.....	32
4.1.6 Complejo de domos Cerro Tenango .....	34
4.1.7 Unidad Cerro Muntepec.....	35
4.1.8 Complejo de domos Santa María Jajalpa.....	35
4.1.9 Domos Joquicingo.....	37
4.1.10 Unidad Acatzingo.....	38
4.1.11 Pómez Toluca.....	39
4.1.12 Cenizas Volcánicas no diferenciadas.....	40
4.1.13 Basalto Tenango.....	41
4.1.14 Secuencia fluvio-lacustres Chignahuapan.....	44
4.1.15 Depósitos fluviales del río Santiaguito.....	45
4.2 Geología Estructural.....	47
4.2.1 Sistema de fallas Tenango .....	48
4.2.2 Sistema de fallas Tlanixco.....	51
4.2.3 Sistema de fallas Jajalpa.....	54
4.2.4 Sistema de fallas Tenancingo.....	55
4.2.5 Sistema de fallas de la Sierra de las Cruces.....	56

4.2.6 Lineamientos Chichinautzin.....	57
4.2.7 Lineamiento Holotepec.....	58
4.2.8 Lineamiento Rayón.....	58
4.2.9 Lineamiento Santiaguito.....	59
<b>CAPITULO 5. Resultados: Peligros geológicos.....</b>	<b>60</b>
5.1 Sismicidad.....	60
5.2 Vulcanismo.....	65
<b>CAPITULO 6. Conclusiones.....</b>	<b>70</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>80</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Mapa de ubicación del área de estudio con las fallas Tenango.....	3
<b>Figura 2.1</b> Esquema metodológico de la elaboración de este trabajo.....	7
<b>Figura 3.1</b> (A) Ubicación del área de estudio de este trabajo (rectángulo amarillo) dentro de la FVTM (D' Antonio, 2008) y (B) en el contexto de los sistemas de fallas (Norini et al., 2006).....	9
<b>Figura 3.2</b> Conjunto de fallas comprendidas a lo largo de la traza de la falla Tenango (Norini et al., 2006).....	11
<b>Figura 3.3</b> Ubicación de los tres sistemas de fallas que intersectan al VNT (Norini et al. 2008). Sistema de fallas Taxco- Querétaro (SFTQ), Sistema de fallas San Antonio (SFSA) y Sistema de fallas Tenango (SFT).....	12
<b>Figura 3.4</b> Mapa de ubicación del CVMCh con sus estructuras volcánicas correspondientes.....	14
<b>Figura 3.5</b> Mapa geológico-estructural del Basalto Tenango ubicado al norte de la traza de la falla Tenango (Bloomfield, 1973).....	15
<b>Figura 4.1</b> Mapa geológico del área de estudio.....	20
<b>Figura 4.2</b> Bloques de roca andesita con abundante pirolusita aflorando al NW de la comunidad El Guarda de Guerrero.....	22
<b>Figura 4.3</b> Derrame de lava de roca andesita-basáltica muy fracturada.....	23
<b>Figura 4.4</b> Derrame de lava de roca andesita-basáltica a unos cuantos metros de una secuencia de flujos piroclásticos de ceniza volcánica y pómez.....	23
<b>Figura 4.5</b> (a) Flujo piroclástico de roca andesita intemperizada aflorando en la parte sur de la comunidad Acatzingo. (b) Se encuentra cubierta por depósitos de caída de pómez blanca y ceniza volcánica.....	24
<b>Figura 4.6</b> (A) Deposito de flujo de lava tipo a'a de composición basáltica aflorando al NW del Volcán Tres Cruces, entre las poblaciones San Pedro Techuchulco y Texcalyacac (B) Los bloques presentan espesores entre 30 y 40m, (C) con una textura vesicular afanítica.....	26

**Figura 4.7** (A) Afloramiento ubicado al SE del municipio Almoloya del Rio, se aprecia un dique atravesando un flujo de brechas volcánicas basálticas con clastos subangulosos. (B) Afloramiento localizado en la comunidad de San Lorenzo Huehuetitlán, se observan bloques de roca basáltica con abundantes diaclasas de enfriamiento.....27

**Figura 4.8** Secuencia de depósitos piroclásticos, en la capa 1 se encuentra un depósito de caída de pómez y ceniza volcánica, en la capa 2 se presenta otra capa piroclástica con líticos de basalto más pequeños en granulometría, y en la capa 3 se encuentran un depósito de ceniza volcánica transformada a suelo.....28

**Figura 4.9** (A) Flujo piroclástico de bloques y ceniza de roca andesita aflorando al SW de la población Zaragoza de Guadalupe. (B) Los bloques de andesita se encuentran en una matriz de ceniza volcánica.....30

**Figura 4.10** Domos volcánicos de andesita cubiertos por depósitos de caída de pómez color blanca y ceniza volcánica muy fina (Pómez Toluca).....31

**Figura 4.11** Domos volcánicos de andesita cubiertos por depósitos de caída de pómez color blanca y ceniza volcánica muy fina (Pómez Toluca).....32

**Figura 4.12** (A) Afloramiento que presenta un Lahar subyaciendo a un depósito fluvial. (B) El depósito de lahar presenta clastos de roca volcánica dentro de una matriz de ceniza volcánica. (C) Y el depósito fluvial en algunas partes prevalece una oxidación termal que le confiere una coloración rojiza.....33

**Figura 4.13** Afloramiento ubicado al NW del Complejo de domos Santa María Jajalpa, sobre la carretera Tenango - Jajalpa. (A) Se encuentra un flujo de lava tipo bloques subangulosos de medianos a grandes de roca dacita, en el acercamiento (zoom) se puede observar a la dacita con fenocristales de plagioclasas, biotita, mica y en menor cantidad cuarzo. (B) Subyace en un depósito de caída de ceniza volcánica y pómez color blanco, en el acercamiento (zoom) se puede observar a la ceniza volcánica con un color pardo- amarillento.....36

**Figura 4.14** Afloramiento ubicado al NW de la población San Bartolomé Atlatlahuca, (a) presenta depósitos de caída de ceniza volcánica y (b) pómez contacto grano a grano de color crema a blanco.....38

<b>Figura 4.15</b> Secuencia de flujos piroclásticos de pómez y ceniza volcánica. (A) Deposito de caída de piedra pómez andesítica y ceniza volcánica. (B) Depósito de caída de ceniza volcánica y oleadas piroclásticas intercaladas con el flujo de pómez y ceniza. (C) Capa de oleada piroclástica de ceniza volcánica con pómez de un color amarillo.....	40
<b>Figura 4.16</b> Depósito de flujo de lava tipo bloque de roca andesita-basáltica, en el acercamiento (zoom) se pueden observar a las plagioclasas de la roca.....	42
<b>Figura 4.17</b> La andesita-basáltica de los boques correspondientes al Basalto Tenango contienen fragmentos líticos de otras rocas volcánicas tales como, limonitas (a) y epidotitas con xenolitos de pómez blanca (b).....	42
<b>Figura 4.18</b> Bloque de roca andesita- basáltica del Basalto Tenango con estrías, escalones y medias lunas.....	43
<b>Figura 4.19</b> Depósitos de turba de color gris oscuro a blanco con presencia de arcillas y restos de raíces, troncos y tallos de plantas.....	45
<b>Figura 4.20</b> (A) Depósito fluvial con clastos de roca andesita y pómez intercaladas con gravas y arenas de grano fino. (B) Material epiclástico con pómez y líticos andesíticos rodeados de una matriz limo- arenoso. (C) Material de lahar y epiclástico correspondiente a clastos con forma redondeada y subangulosa rodeados por cenia volcánica antigua y pómez.....	46
<b>Figura 4.21</b> Mapa geológico-estructural del área de estudio.....	47
<b>Figura 4.22</b> Falla Tenango afectando a rocas del basalto Tenango, presenta una orientación al NW- SE.....	49
<b>Figura 4.23</b> Afloramiento ubicado en la parte este de la comunidad Acatzingo a un costado de la autopista Ixtapan de la Sal. Se encuentra depósitos de flujos de lava de roca andesita-basáltica correspondiente a las andesitas Tecamatlán-San Simonito a unos cuantos metros de la unidad Pómez Toluca.. ..	51
<b>Figura 4.24</b> Flujo de lava tipo bloques de roca andesita- basáltica perteneciente a la andesita Tecamatlán-San Simonito, presenta abundantes fracturas con orientación tanto al NE-SW como al NW-SE.....	52

<b>Figura 4.25</b> Depósitos de flujo de lava tipo bloques de roca andesita-basáltico del Basalto Tenango. (A) Sistema de fallas Tenango (NW-SE) intersectando al sistema de fallas Tlanixco (NE-SW), forman arreglos de cizallamiento en X. (B) Las andesitas-basálticas de los boques presentan indicadores cinemáticos tales como estrías, medias lunas y escalones que muestran el movimiento de los dos sistemas de fallas.....	53
<b>Figura 4.26</b> Fractura con orientación NE-SW con bloques rotados de roca andesítica del Complejo de domos Santa María Jajalpa.....	55
<b>Figura 5.1</b> Mapa de peligro por sismicidad.....	61
<b>Figura 5.2</b> Derrumbe de bloques asociado a una falla con orientación NE-SW del sistema de fallas Jajalpa.....	64
<b>Figura 5.3</b> Fracturamiento en la iglesia “El Calvario” de la población Joquicingo, la fractura (línea segmentada) está orientada NW-SE.....	65
<b>Figura 5.4</b> Mapa de peligro por vulcanismo.....	66
<b>Figura 5.5</b> Mapa de densidad de estructuras volcánicas del Campo Volcánico Chichinautzin Occidental.....	67
<b>Figura 5.6</b> Mapa de interpolación de edades de las estructuras volcánicas del Campo Monogenético Chichinautinz.....	68
<b>Figura 5.7</b> Mapa de densidad de fallas y lineamientos correspondiente al área de estudio de este trabajo.....	68



## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Etapas del método científico en relación con la elaboración del presente trabajo.....	4
<b>Tabla 3.1</b> Riesgos geológicos originados por procesos geológicos internos y externos.....	18
<b>Tabla 4.1</b> Edad de las estructuras volcánicas correspondientes al CVMCh en su sector occidental.....	29

## **ABREVIATURAS**

**FVTM** – Faja Volcánica Transmexicana

**SFTSMA** – Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende

**VTN** – Volcán Nevado de Toluca

**SFT** – Sistema de fallas Tenango

**SFTQ** – Sistema de fallas Taxco-Querétaro

**SFSA** – Sistema de fallas San Antonio

**CVMCh** – Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin

**SSN** – Servicio Sismológico Nacional

**CENAPRED** – Centro Nacional de Prevención de Desastres

**CVSC** - Complejo Volcánico Sierra de las Cruces

**SFTL** – sistema de fallas Tlanixco

**SFJ** – sistema de fallas Jajalpa

**SFTN** – sistema de fallas Tenancingo

**SFSC** – sistema de fallas Sierra de las Cruces

## RESUMEN

Las fallas Tenango son estructuras tectónicas activas con una longitud aproximadamente de 50 km, que se encuentran dentro del sector occidental del Campo Volcánico Chichinautzin y limitan a la cuenca del Valle de Toluca en la parte Sur. Las fallas de acuerdo a trabajos antecedentes publicados, han controlado durante el Pleistoceno tardío-Holoceno el vulcanismo monogenético del Campo Chichinautzin, los colapsos en el flanco este del Volcán Nevado de Toluca y la actividad sísmica del área a estudiar en este trabajo. Existen trabajos en la literatura referente a las fallas Tenango como la de Garcia-Palomo et al. (2000) y Norini et al. (2006) que describen su morfología y cinemática, sin embargo, son trabajos regionales, puramente geológicos y que no profundizan a escala de la propia falla desde un punto de vista geológico-ambiental, de los peligros geológicos que existen entorno a estas fallas como los de índole sísmica, volcánica, derrumbes y del propio fallamiento. El presente trabajo permite generar un conocimiento geológico-estructural básico sobre la actividad de las fallas Tenango, situadas geográficamente dentro de los municipios de Tenango del Valle, Tenancingo de Degollado, Joquicingo, Malinalco y Ocuilan. El objetivo principal de este trabajo es analizar los peligros geológicos a lo largo de las trazas de las fallas de Tenango y zonas adyacentes con base en la cartografía geológico-ambiental. Las metodologías empleadas comprendieron las referentes a la investigación documental, fotointerpretación documental, geología de campo, cartografía geológica e integración y análisis de resultados.

Se definieron varias unidades geológicas informales con base en el análisis estratigráfico (andesitas Tecomatlán-San Simonito, flujos piroclásticos de Calimaya, complejo de domos Cerro Tenango, unidad Cerro Muntepec, complejo de domos Santa María Jajalpa, domos Joquicingo, unidad Acatzingo, secuencia fluvio-lacustre Chignahuapan) cuyas rocas volcánicas varían predominantemente de andesitas a andesitas-basálticas y en menor proporción rocas volcánicas dacitas, que van en edad desde el Mioceno-tardío al Plio- Cuaternario para el bloque del alto y del bajo de las fallas Tenango. Así como también, se definieron varios sistemas de fallas, fracturas y lineamientos estructurales, denominados: Sistema de Fallas Tenango (E-W), sistema de fallas Tlanixco (N-S), sistemas de fallas Jajalpa (NE-SW), sistema de fallas Tenancingo con orientación NW-SE y NE-SW, sistema de fallas de la Sierra las Cruces con orientaciones preferenciales al NE-SW y E-W, lineamiento Chichinautzin (E-W), lineamiento Holotepec (N-S), lineamiento Santiaguito (E-W) y lineamiento Rayón (E-W).

Y por último se analizaron los peligros geológicos por sismicidad y vulcanismo identificados a lo largo de las fallas Tenango, y algunos peligros geológicos relacionados a la inestabilidad de laderas como la presencia de derrumbes de bloques asociados al movimiento de las fallas Tenango. Estos peligros identificados indican que, para los municipios de Tenango del Valle, Calimaya, Santa María Rayón y San Antonio La Isla toman el carácter de riesgos geológicos, ya que varias poblaciones se encuentran asentadas en los municipios mencionados y son particularmente vulnerables al riesgo sísmico y volcánico.

## ABSTRACT

The Tenango faults are active tectonic structures with a length of approximately 50 km, which are located within the western sector of the Chichinautzin Volcanic Field and limit the Toluca Valley basin in the southern part. The failures according to published background work have controlled during the late Pleistocene-Holocene the monogenetic volcanism of the Chichinautzin Field, the collapses on the east flank of the Snowy Volcano of Toluca and the seismic activity of the area to be studied in this work. There are works in the literature regarding Tenango faults such as Garcia-Palomo et al. (2000) and Norini et al. (2006) that describe its morphology and kinematics, however, are regional works, purely geological and that do not deepen the scale of the fault itself from a geological- environmental point of view, of the geological hazards that exist around these failures such as seismic, volcanic, landslides and the fault itself. The present work allows to generate a basic geological-structural knowledge about the activity of the Tenango faults, located geographically within the municipalities of Tenango del Valle, Tenancingo de Degollado, Joquicingo, Malinalco and Ocuilan. The main objective of this work is to analyze the geological hazards along the traces of the Tenango faults and adjacent areas based on geological-environmental mapping. The methodologies used included those related to documentary research, documentary photointerpretation, field geology, geological mapping and integration and analysis of results.

Several informal geological units were defined based on the stratigraphic analysis (Tecomatlán-San Simonito andesites, pyroclastic flows from Calimaya, Cerro Tenango dome complex, Cerro Muntepec unit, Santa María Jajalpa dome complex, Joquicingo domes, Acatzingo unit, fluvio sequence) lacustrine Chignahuapan) whose volcanic rocks vary predominantly from andesites to andesites-basaltic and to a lesser extent dacite volcanic rocks, ranging in age from the Miocene-late to Plio-Quaternary for the upper and lower block of Tenango faults. As well as, several fault systems, fractures and structural guidelines were defined, called: Tenango Failure System (EW), Tlanixco Failure System (NS), Jajalpa Failure Systems (NE-SW), Tenancingo Failure System with orientation NW- SE and NE-SW, fault system of Sierra las Cruces with preferential orientations to NE-SW and E-W, Chichinautzin (E-W), Holotepec (N-S), Santiaguito (E-W) and Rayón (E-W).

And finally, the geological hazards by seismicity and volcanism identified along the Tenango faults, and some geological hazards related to the instability of slopes such as the presence of block landslides associated with the movement of the Tenango faults were analyzed. These identified hazards indicate that, for the municipalities of Tenango del Valle, Calimaya, Santa María Rayón and San Antonio La Isla, they take on the nature of geological risks, since several populations are settled in the mentioned municipalities and are particularly vulnerable to seismic and volcanic.

## **CAPITULO 1. Introducción**

### **1.1 Planteamiento y justificación del problema**

Las fallas Tenango son estructuras tectónicas activas con una longitud aproximadamente de 50 km, que se encuentran dentro del sector occidental del Campo Volcánico Chichinautzin en una dirección predominante E-W y ESE-WNW en el extremo este del Volcán Nevado de Toluca (VNT) (Norini et al., 2006). De acuerdo con Yamamoto y Mota (1988), García-Palomo et al. (2000) y Norini et al. (2008) estas fallas Tenango han controlado durante el Pleistoceno tardío-Holoceno el vulcanismo monogenético del Campo Chichinautzin, los colapsos en el flanco este del Volcán Nevado de Toluca y la actividad sísmica del área a estudiar en este trabajo.

Existen trabajos en la literatura referente a las fallas Tenango como la de García-Palomo et al. (2000) y Norini et al. (2006) que describen su morfología y cinemática, sin embargo, son trabajos regionales, puramente geológicos y que no profundizan a escala de la propia falla desde un punto de vista geológico-ambiental, de los peligros geológicos que existen entorno a estas fallas como los de índole sísmica, volcánica, derrumbes y del propio fallamiento.

El presente trabajo permite generar un conocimiento geológico-estructural básico sobre la actividad de dichas fallas y su relación con otros peligros geológicos tales como, sismicidad, fallamiento y vulcanismo, considerando que se encuentra cerca de regiones densamente pobladas lo que puede significar un riesgo para la población.

## 1.2 Hipótesis

Las afectaciones a la infraestructura de los poblados que están ubicados a lo largo de las trazas de las fallas de Tenango se deben al movimiento de éstas, teniendo también una sismicidad y vulcanismo asociados.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Analizar los peligros geológicos a lo largo de las trazas de las fallas de Tenango y zonas adyacentes con base en la cartografía geológico-ambiental que abarca parte de los municipios de Tenango del Valle, Tenancingo de Degollado, Joquicingo y otros municipios del Estado de México.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Elaborar la cartografía geológico-ambiental de la zona adyacente a las fallas de Tenango mediante aplicación de metodologías de la geología de campo y geología ambiental al área de estudio para definir las características geológico-ambientales.
- Identificar los peligros geológicos en la zona adyacente a las fallas de Tenango mediante verificación en campo y análisis en gabinete para evaluarlos desde el punto de vista de la geología ambiental.
- Elaborar un mapa de peligros geológicos con base en los resultados de este trabajo para que los poblados conozcan cuales son las áreas de mayor peligro.

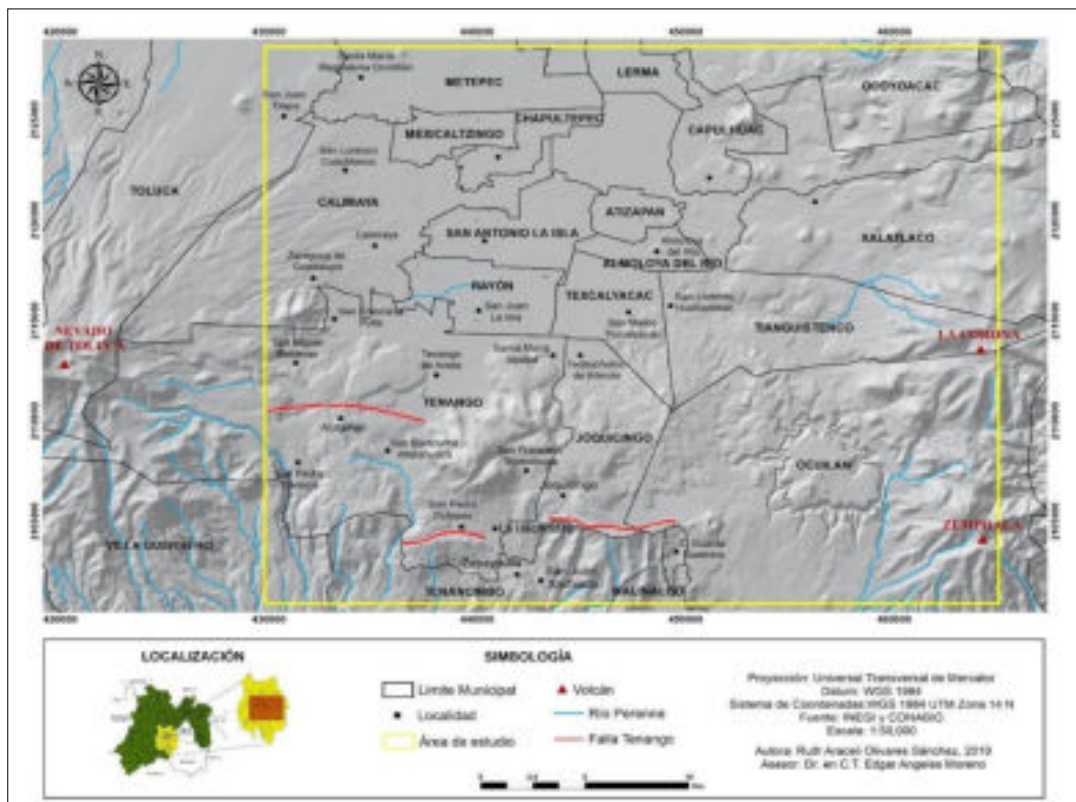


#### 1.4 Área de estudio

Las fallas Tenango geográficamente se sitúan en la porción centro-sur del estado de México, comprenden los municipios Tenango del Valle, Tenancingo de Degollado, Joquicingo, Malinalco y Ocuilan. A su vez, las fallas se encuentran fisiográficamente ubicadas en la parte occidental con respecto al Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin (CVMCh), y al este del Volcán Nevado de Toluca (VNT) (Figura 1.1).

Las fallas Tenango se caracterizan por presentar trazas de falla con geometrías de curvas y discontinuas de forma escalonada con una orientación preferencial E-W e inclinación hacia el norte. En conjunto llegan a presentar una longitud de al menos 50 km y un ancho máximo inferior a 10 km (Norini, 2006).

El área de estudio está delimitada en un área rectangular con las siguientes coordenadas de cada esquina, UTM-Datum WGS84: 429828.054mE, 2128672.749mN y 465000.563mE, 2128672.749mN.



**Figura 1.1** Mapa de ubicación del área de estudio con las fallas Tenango.

## CAPITULO 2. Metodología

En este capítulo se exponen las diferentes metodologías empleadas para resolver el problema planteado y acorde a los objetivos perseguidos. Las metodologías comprenden: método científico, investigación documental, fotointerpretación geológica, geología de campo, cartografía geológica e integración y análisis de resultados.

### 2.1 Método científico

El método científico constituye un conjunto de procedimientos que orientan los esfuerzos de la investigación hacia la solución de los problemas científicos con un máximo de eficiencia (Asensi y Parra, 2002). El método se basa en el desarrollo de distintas etapas (observación, planteamiento del problema, hipótesis, experimentación y análisis) que conducen al establecimiento de una conclusión válida sustentada en la verificación de una hipótesis y supuestos de la investigación realizada (Asensi y Parra, 2002). Durante la elaboración del presente trabajo se hizo uso del método científico, en la Tabla 2.1 se mencionan los diferentes métodos utilizados en cada una de las etapas del método científico.

**Tabla 2.1** Etapas del método científico en relación con la elaboración del presente trabajo.

<b>Método científico</b>	<b>Métodos utilizados en la elaboración del presente trabajo</b>
<b>Observación</b> Permite obtener información acerca de los objetos, hechos o fenómenos	Investigación documental y fotointerpretación geológica
<b>Planteamiento del problema</b> Consiste en definir de manera minuciosa el problema o fenómeno a investigar.	
<b>Hipótesis</b> Se intenta explicar el fenómeno observado, hacer suposiciones creíbles e indiscutibles para explicar el problema.	
<b>Experimentación</b> Servirá para comprobar o refractar la hipótesis planteada	Geología de campo y cartografía geológica
<b>Análisis de resultados</b> Los resultados que se obtienen son sometidos a un proceso de análisis e interpretación para llegar a una conclusión.	Integración y análisis de resultados

La descripción de cada uno de los métodos utilizados para llegar al objetivo deseado en cuanto al problema planteado en este trabajo se presenta a continuación:

## 2.2 Investigación documental

La investigación documental como parte esencial de un proceso sistemático de investigación científica fue necesaria para recopilar y analizar información previa referente al área de estudio. Para tal efecto, se consultaron fuentes bibliográficas (libros), hemerograficas (artículos científicos y periódicos) e iconográficas (mapas geológicos y topográficos) (Ramírez y Zwerg, 2012).

## 2.3 Fotointerpretación geológica

La fotointerpretación geológica es una técnica empleada para identificar y deducir rasgos geológicos representados en fotografías aéreas con el fin de señalar las zonas de mayor interés (Guerra, 2003).

Con base en la carta topográfica (E14A48) a escala 1: 50 000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) e imágenes de satélite de Google Earth, se llevó a cabo la fotointerpretación geológica delimitando posibles contactos litológicos según los cambios pronunciados en las curvas de nivel y trazando posibles lineamientos que pudiesen ser zonas de fracturamiento.

Los resultados de la fotointerpretación geológica se integraron en un solo mapa geológico de gabinete tomando como mapa base el mapa topográfico. Este mapa geológico de gabinete fue utilizado de guía y de partida para seleccionar puntos de muestreo y análisis de campo detallado.

## 2.4 Geología de campo

Con la finalidad de verificar y afinar el mapa geológico fotointerpretado en gabinete, se realizó el trabajo en campo consistiendo en la toma de datos en puntos específicos de afloramientos geológicos y algunos puntos de muestreo, para muestras de mano definidos.

Durante el recorrido en campo se ubicaron los puntos de observaciones geológicas con las coordenadas (UTM) y elevación (msnm) correspondientes, haciendo uso del receptor GPS. Se dibujaron esquemas descriptivos de cada afloramiento indicando la litología, rasgos estructurales, relaciones de corte e interpretando eventos posibles que dieron origen a la litología observable. Se tomaron datos estructurales de fallas, fracturas, líneas de flujo y otras estructuras geológicas que se encontraron.

## 2.5 Cartografía geológica

La cartografía geológica es una representación gráfica de una parte de la superficie de la tierra donde los atributos proyectados en el plano deben guardar entre si las mismas relaciones espaciales que tiene en el terreno, con una distribución que estará controlada por la escala en la que el mapa ha sido construido (Echeveste, 2018).

Con base en los datos geológicos obtenidos en campo se elaboró la cartografía geológica-estructural del área de estudio, integrando las relaciones de contactos geológicos, relaciones de corte entre fallas, fracturas y litologías, para establecer una secuencia de unidades geológicas en el tiempo y formación de fracturas también en el tiempo geológico.

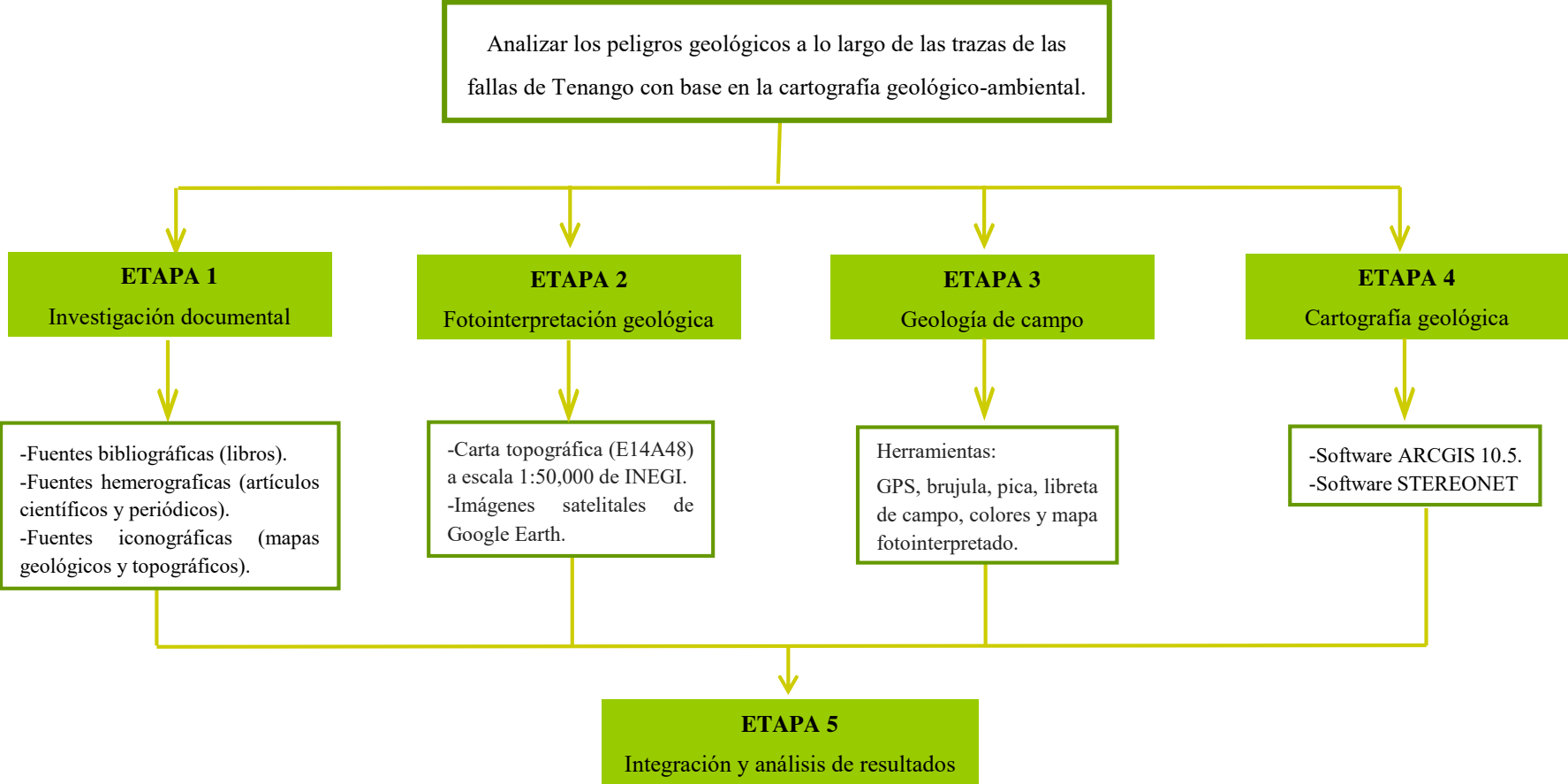
El software ARCGIS 10.5 se empleó como herramienta para integrar dicha cartografía y el software STERONET se utilizó para el análisis estructural en cuanto a orientaciones de fracturas y representación gráfica de las fallas y fracturas encontradas.

## 2.6 Integración y análisis de resultados

Los resultados de las metodologías anteriores (investigación documental, fotointerpretación geológica, geología de campo y cartografía geológica) se integraron y analizaron para identificar zonas susceptibles a presentar actividad sísmica, fallamiento, derrumbes y vulcanismo futuros; estos eventos asociados con la actividad de las fallas Tenango.

El análisis de los peligros geológicos asociados a la actividad de las fallas Tenango llevo a la construcción de escenarios, es decir, a la representación de los efectos del fenómeno en el área a estudiar.

En el siguiente esquema metodológico de la figura 2.1 se resumen las metodologías empleadas en la elaboración de este trabajo con los materiales utilizados.



**Figura 2.1** Esquema metodológico de la elaboración de este trabajo.

## CAPITULO 3. Marco teórico

### 3.1 Marco Geológico

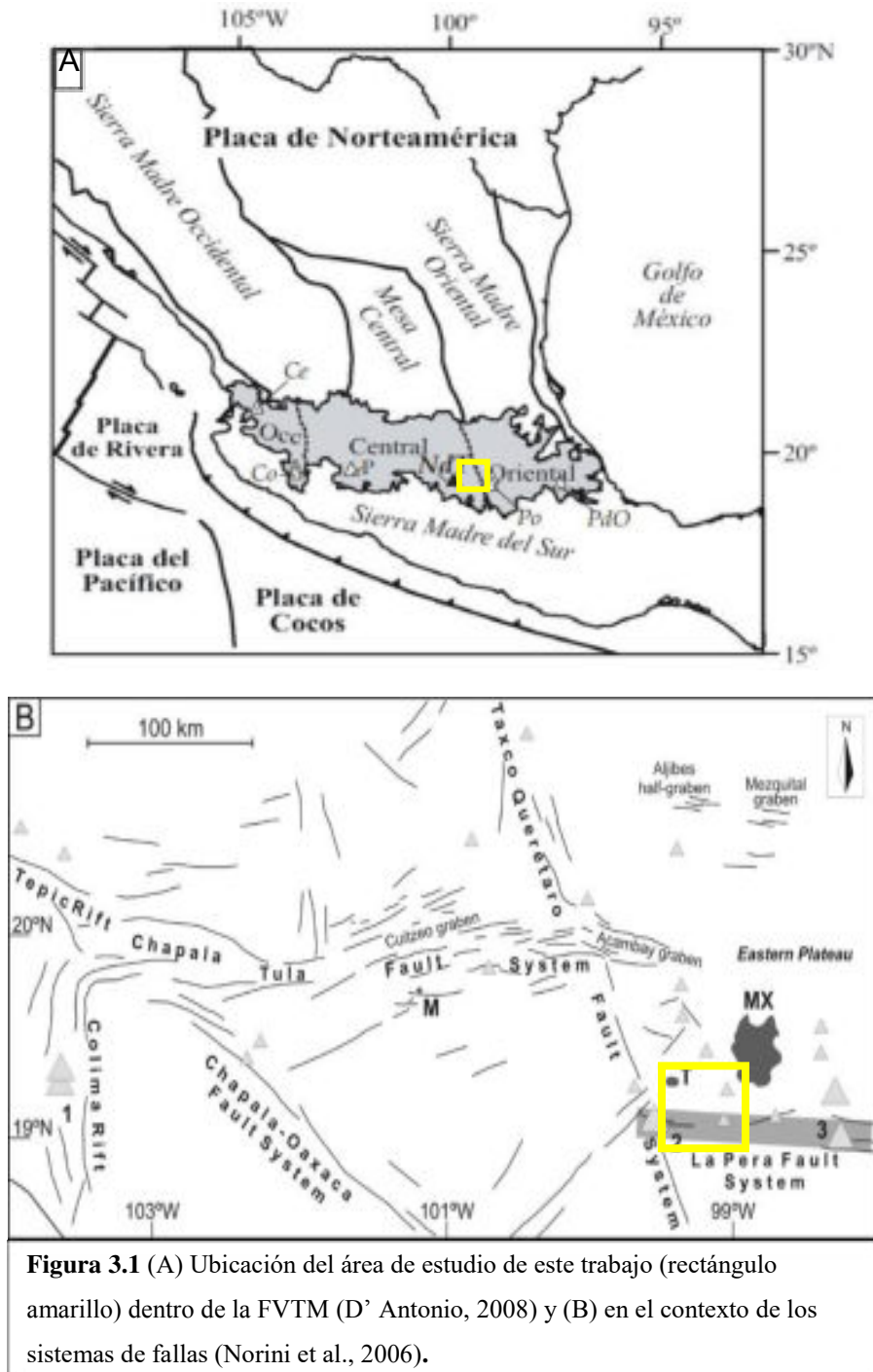
#### 3.1.1 Faja Volcánica Transmexicana Centro – Oriental

El área de estudio de este trabajo se encuentra en el límite del sector central y el sector centro-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) (Figura 3.1). La FVTM es un arco volcánico continental con una longitud de 1,000 km y un ancho que varía de 50 km a 250 km, se extiende desde las costas del Pacífico en el estado de Nayarit hasta las costas del Golfo de México en el estado de Veracruz, con una dirección predominante E-W en su sector central y oriental, y WNW-ESE en su sector occidental (Campos-Enríquez et al., 2015; D' Antonio, 2008; García-Palomo, 2000).

A escala regional, la FVTM se ha dividido en tres grandes sectores con diferentes características estructurales y volcánicas (Pasquaré et al., 1987; Ferrari, 2000). El sector occidental se caracteriza por la intercepción de tres fosas tectónicas denominadas: Tepic, Colima y Chapala. El sector central se denomina zona de falla Chapala-Tula y está caracterizado por un sistema de fallas principales E-W a ENE-WSW (Johnson y Harrison, 1990). Y el sector oriental se caracteriza por presentar alineamientos de grandes estratovolcanes en dirección general N-S (Pasquaré et al., 1987). Estos dos últimos sectores (central y oriental) están separados por el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) presentando una orientación predominante NNW-SSE (Demant, 1978; Nixon et al., 1987; Pasquaré et al. 1987) (Figura 3.1).

La actividad tectónica reciente dentro del sector central de la FVTM correspondiente al sistema de fallas Chapala-Tula está representada por fallas normales activas con un pequeño desplazamiento lateral izquierdo (Pasquaré et al., 1988; Johnson y Harrison, 1990; Ferrari et al., 1991, 1994; Suter et al., 1992, 1995a, 1995b, 1996, 2001; Ramírez-Herrera, 1998; Langridge et al., 2000; Szykaruk et al., 2004; Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2005).

García-Palomo et al. (2000) relacionó este sistema de fallas Chapala-Tula con las fallas Tenango, convirtiéndose en un elemento importante en la compleja historia de deformación en el sector centro-este de la FVTM que influyo en el comportamiento del vulcanismo Pleistoceno-tardío y Holoceno en el área de estudio de este trabajo.



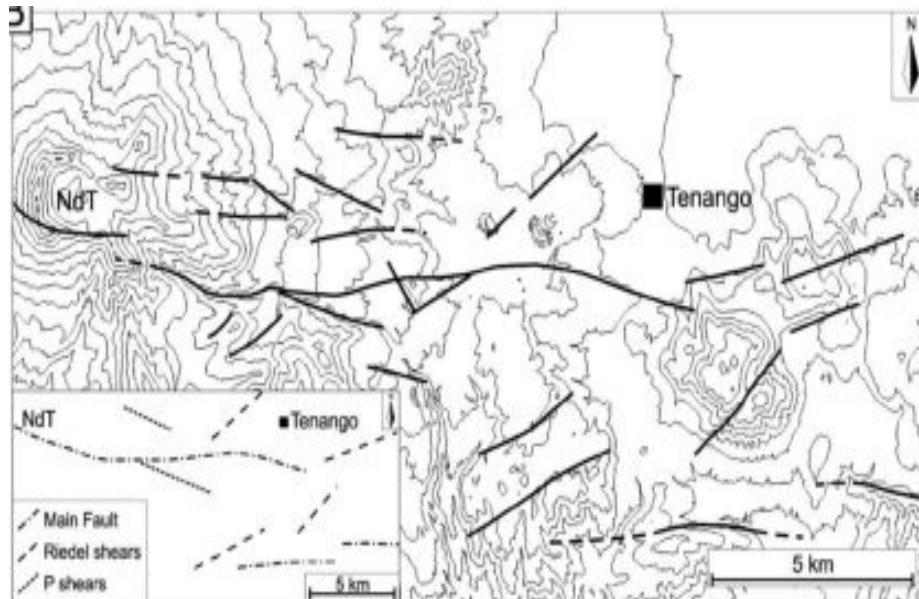
### 3.1.2 Sistema de fallas Tenango

El sistema de fallas Tenango (SFT) fue originalmente identificado por Mooser y Maldonado-Koerdell (1961) en García-Palomo et al. (2000) y después descrito con un énfasis estructural por García-Palomo (1998) y García-Palomo et al. (2000). El SFT se describen como un conjunto de fallas y fracturas con una orientación E-W y, planos de falla hacia N90°E y N30°E a N60°E. Se caracterizan por presentar movimientos laterales izquierdos asociados con un desplazamiento normal cuya inclinación es hacia el norte (Norini et al., 2006). El informe sobre un enjambre sísmico al norte del SFT entre el 18 al 31 de agosto de 1980 con magnitudes de 2.6 a 3.5, proporcionó datos sobre la geometría subsuperficial del SFT, indicando la presencia de una falla subvertical sísmicamente a escala de la corteza así con la inferencia de fallas tipo normal escalonadas hacia el Norte (Yamamoto y Mota, 1988).

Se reconocen dos conjuntos principales de fallas como parte del SFT (Figura 3.2), el primero presenta una orientación E-W y el segundo interpretado como fallas secundarias en cizallas de tipo riedel con fracturas tipo T y que presentan una orientación NE-SW (Norini et al., 2006). Otros lineamientos menos prominentes con una orientación NW-SE forman arreglos de cizallamiento con fracturas tipo P y X (Norini et al., 2006).

De acuerdo a García-Palomo et al., (2000) el SFT ha sufrido dos episodios de movimiento. El evento más antiguo, ocurrió a finales del Plioceno, el cual se acomodó por extensión oblicua lateral derecha. Posteriormente en el Pleistoceno-Holoceno una fase extensional reactivó las estructuras del SFT como fallas normales. Sin embargo, Norini et al. (2006), muestra que la geometría y el estilo de deformación a lo largo del SFT en el Pleistoceno- Holoceno es típica de un movimiento lateral izquierdo asociado con un desplazamiento normal.





**Figura 3.2** Conjunto de fallas comprendidas a lo largo de la traza de la falla Tenango (Norini et al., 2006).

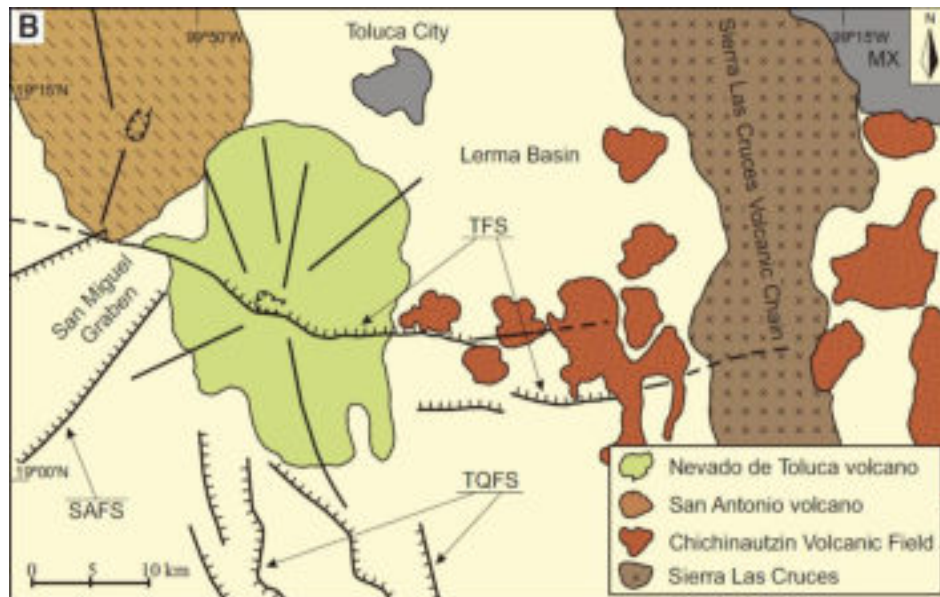
### 3.1.3 Nevado de Volcán Toluca

El Volcán Nevado de Toluca (VNT) con una elevación de 4680 metros sobre el nivel del mar (msnm) se ubica en el sector centro-este de la FVTM, es un volcán compuesto de edad Plioceno-Holoceno constituido por andesitas y dacitas calcialcalinas (Bloomfield y Valastro, 1974; Cantagrel et al., 1981; García-Palomo et al., 2002).

De acuerdo a García-Palomo et al. (1998), el VNT se construyó sobre la intersección de los siguientes tres sistemas de fallas que han influido a lo largo de su historia volcánica: (a) Sistema de Fallas Taxco-Querétaro (SFTQ) ubicadas al sur del VNT con una orientación NNW–SSE; (b) Sistema de Fallas San Antonio (SFSA) localizadas entre el Volcán San Antonio y el NVT con una orientación preferencial NE-SW y (c) Sistema de Fallas Tenango (SFT) con una orientación E-W (García-Palomo, 1998 y García-Palomo et al., 2000 y 2002) (Figura 3.3).

De acuerdo con García-Palomo et al. (2002), el SFT es considerado como el sistema de fallas más joven comparado con los sistemas de fallas Taxco-Querétaro y San Antonio. El SFT en su actividad de fallamiento parece haber influido en la actividad volcánica del VNT (García-Palomo et al., 2000). Durante los últimos 50,000 años la tectónica en el VNT estuvo dominada por el SFT, controlando el sistema de alimentación del magma a la superficie y generando el crecimiento de un complejo de cúpulas en la cima del volcán para su posterior desestabilización (Norini et al., 2008).

La distribución de al menos tres depósitos de avalancha de escombros en el sector este (área de estudio de este trabajo), este-sureste y oeste del VNT han sido correlacionadas con el SFT (Norini et al., 2008).



**Figura 3.3** Ubicación de los tres sistemas de fallas que intersectan al VNT (Norini et al. 2008). Sistema de fallas Taxco- Querétaro (SFTQ), Sistema de fallas San Antonio (SFSA) y Sistema de fallas Tenango (SFT).

### 3.1.4 Sector occidental del campo volcánico monogenético Chichinautzin

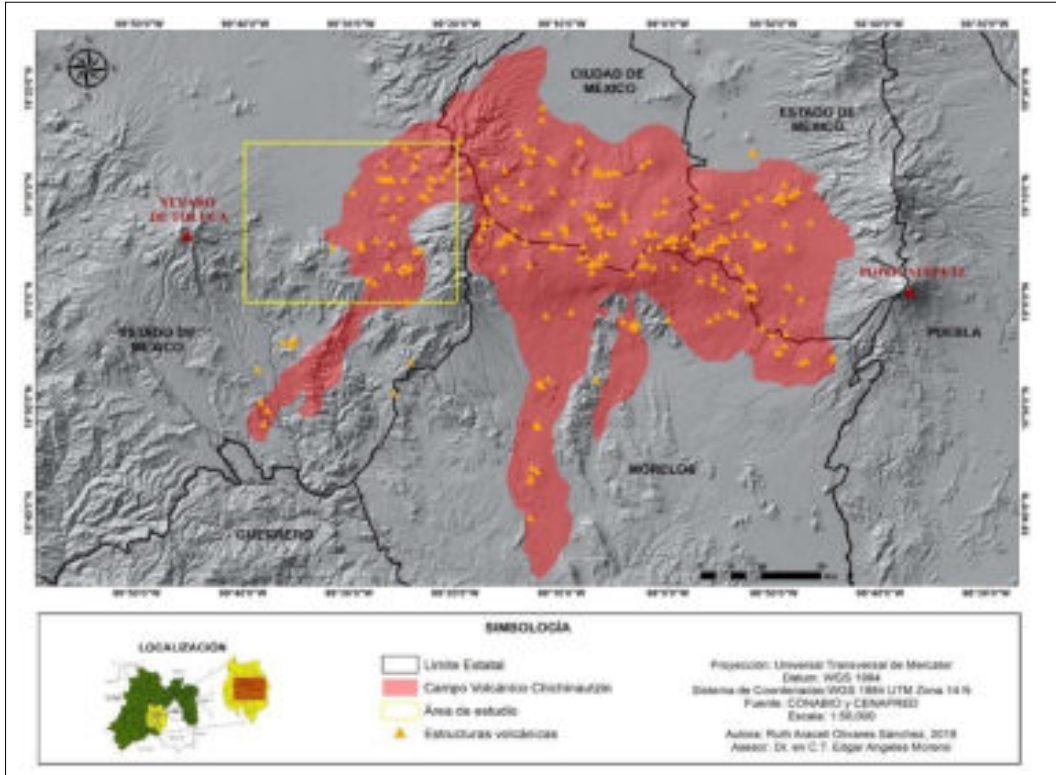
El Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin (CVMCh) cubre una zona de 90 km de longitud y un ancho de 30 km, se extiende desde los flancos del volcán Popocatepetl en el lado poniente hasta las faldas del VNT en sus partes oriente y sur (Delgado-Granados y Villalpando-Cortés, 2008; Velasco-Tapia y Verma, 2001) (Figura 3.4).

El CVMCh está compuesto por más de 220 estructuras volcánicas cuaternarias principalmente con erupciones que han sido del tipo estromboliano cuyas rocas varían desde andesitas-basálticas a dacitas, que en su conjunto llegan a cubrir un área de aproximadamente 2,400 km<sup>2</sup> en una dirección predominante E-W y un volumen total de 470 km<sup>3</sup> (Martín del Pozo, 1982; Márquez et al., 1999; García-Palomo et al., 2002; Norini et al., 2006).

La tasa de emisión de magma del CVMCh se ha calculado en 11.75 km<sup>3</sup>/1000 años (Márquez et al., 1999). Fries (1960) estimó el espesor del CVMCh de 1,800 m con base en la diferencia de elevación con el valle de Cuernavaca.

De acuerdo con Bloomfield (1975) el sector occidental del CVMCh (área de estudio de este trabajo) está conformado por 41 conos volcánicos y lavas, principalmente conos de ceniza (por ejemplo, volcán Cuauatl, Tezontle, Tres Cruces y Santa Fe Mezapa) y conos con derrames de lava tipo bloques y AA (por ejemplo, Cerros Tlacotepec, Pehualtepec, Chapultepec y Texontepec), con alturas de 15 m a 260 m y espesores de lava promedio que varían entre 10 m y 70 m, así como longitudes máximas de los derrames lávicos entre 1 km a 13.5 km.

Las alineaciones de más de 15 estructuras volcánicas con una orientación E-W llevaron a inferir la existencia de una falla principal a lo largo del CVMCh (Márquez et al., 1999), que junto con fallas preexistentes NW-SE y NE-SW habrían fracturado intensamente la corteza debajo del CVMCh y permitido el rápido emplazamiento de grandes cantidades de material volcánico que dio origen al mismo (Campos-Enríquez et al., 2015).



**Figura 3.4** Mapa de ubicación del CVMCh con sus estructuras volcánicas correspondientes.

### 3.1.5 Basalto Tenango

El basalto Tenango se localiza dentro de área de estudio de este trabajo, a una distancia de cerca 19 km al sur de la ciudad de Toluca. Se compone de lava fisural basáltico-andesítica extruida aproximadamente hace 8,500 años B.P. (Bloomfield, 1973). Los flujos de lava se formaron a partir de al menos cuatro a cinco centros de emisión, dos más antiguos (1a y 1b en la Figura 3.5) con longitudes de lava que varían de 1.5 km a 1.6 km, y uno más joven (2 en la Figura 3.5) con una longitud de 2.6 km, éste último generó una ruptura y se extendió hacia el norte sobre la llanura formando una lengua de lava con bloques de 8 cm de altura (Bloomfield, 1973; Norini et al., 2006).

Los flujos de lava del basalto Tenango ocupan un área de 16,5 km<sup>2</sup> con un volumen aproximado de 0.15 km<sup>3</sup>, se elevan abruptamente desde la llanura circundante hasta una altura máxima de 250 m, cubriendo depósitos aluviales y lacustres no consolidados derivados del VNT (Bloomfield, 1973). Los flujos de lava del Basalto Tenango forman crestas de presión que al ser convexas en pendiente indican claramente la dirección del movimiento de lava (Bloomfield, 1973).

De acuerdo con Norini et al. (2006) los depósitos de flujo de lava del Basalto Tenango fueron extruidos a partir de fisuras eruptivas con una orientación que varía entre N60°E y N70°E, subparalelas a la falla Tenango (Figura 3.5). Según lo sugerido por García- Palomo (2000 y 2002) la edad y ubicación del basalto de Tenango está relacionada con la actividad del SFT.



**Figura 3.5** Mapa geológico-estructural del Basalto Tenango ubicado al norte de la traza de la falla Tenango (Bloomfield, 1973).

### 3.1.6 Sismicidad a lo largo de la traza del SFT

Yamamoto y Mota (1988) estudiaron la presencia de un enjambre sísmico de 29 pequeños temblores al norte del SFT entre el 18 al 31 de agosto de 1980 con magnitudes ( $M_L$ ) de 2.2 a 3.5, la profundidad que calcularon de los focos sísmicos fue entre 5 km y 23 km con un plano E-W que separa concentraciones de eventos sísmicos los eventos al norte del plano más profundos (18-23 km) y los del sur menos profundos (5-14 km) proporcionó datos sobre la geometría subsuperficial del SFT, indicando la presencia de una falla subvertical sísmicamente a escala de la corteza, así con la inferencia de fallas tipo normal escalonadas hacia el Norte.

Campos-Enriquez et al. (2015) realizaron estudios gravimétricos y sísmicos en algunas partes del Campo Volcánico Monogenético de Chichinautzin (CVMCh) y determinan que en este campo volcánico existen fallas tipo de normal con escalonamientos al sur y norte de CVMCh, con orientaciones E-W y con segmentos de falla activas con sismicidad como Ximulco, Azteca, Xochimilco, Chalco y La Pera, y sistemas de fallas que ellos denominan fallas Aztlán. Ellos sugieren que las fallas pueden alcanzar profundidades de entre 15 km a 40 km. En su análisis de registros de eventos sísmicos desde 1970 colectados de varias fuentes muestran que en el sur de la ciudad de Toluca a la altura de Zacango se registraron sismos con un alineamiento E-W durante agosto de 1980.

Durante el sismo del 17 de septiembre de 2017 en varias poblaciones en la región de Tenancingo, Tenango y Amecameca y de acuerdo a comunicación personal con el profesor-investigador Edgar Ángeles Moreno de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx) (Sol de Toluca, 2018), varias fallas se activaron, provocando daños en las construcciones de los poblados como Tecamatlán, Ocuilan, Joquicingo, San Simón el Alto, etc.

En septiembre-agosto de 2018 se registraron varios sismos perceptibles en los municipios de Rayón, San Antonio La Isla, Tenango y Calimaya (Sol de Toluca, 2018). Uno de estos sismos fue de magnitud 3.1 y una profundidad de 7 km ubicado a 8 km al noroeste de Tenango de acuerdo al Servicio Sismológico Nacional (SSN).

Ángeles-Moreno (2018) (comunicación personal) mencionó que la sismicidad en esta zona es histórica, debido a que se encuentra dentro de una zona volcánica y por ende existen diferentes fallas geológicas en los municipios de Acambay, Ixtlahuaca y Tenango del Valle. Añade Ángeles-Moreno, que los sismos recientes se deben a la liberación de energía del sismo del 19 de septiembre de 2017, por lo que las poblaciones están asentadas en una zona con fallas activas (El Sol de Toluca, 2018), mejor conocidas como Sistema de Fallas Tenango (Norini, et al., 2006; García-Palomo, et al., 2000, 2002).

De acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el 31 de julio de 2018 alrededor de las 22:50 horas, se registró un sismo con una magnitud de 2.9 en el municipio de Rayón, al sureste del Valle de Toluca, movimiento que fue perceptible en las localidades de San Lucas Tepemajalco, San Juan la Isla y Calimaya; testigos afirmaron que se sintió un movimiento como una onda explosiva, por lo que alertaron a las autoridades vía telefónica, quienes realizaron un recorrido por ríos, vialidades, puentes peatonales y minas municipales e informaron que no hubo daños materiales. El SSN informó que el sismo tuvo una profundidad de 3 kilómetros, con epicentro de 7 kilómetros al norte de la región de Tenango del Valle (El Informante, 2018).

Un segundo sismo tuvo una magnitud de 2.5, registrado a las 00:33 horas, ubicado al noroeste de Tenango del Valle y un tercer sismo con una magnitud de 3.1, registrado a las 7:42 horas, perceptible en los municipios de Rayón, San Antonio la Isla, Calimaya y Tenango del Valle (El Sol de Toluca, 2018).

Por otra parte, Luis Quintanar, investigador de sismología del Instituto de Geofísica de la Universidad Autónoma del Estado de México (UNAM), mencionó que los sismos con epicentros en el Estado de México son normales, debido a pequeñas fallas geológicas activas que atraviesan la entidad y producen sismos con una magnitud de 2.8 hasta 3 (El Sol de Toluca, 2018).

## 3.2 Marco geológico-ambiental

### 3.2.1 Geología ambiental

La geología ambiental es la aplicación del conocimiento geológico a la investigación del medio ambiente, se ocupa del estudio de los riesgos generados por los fenómenos naturales o antropogénicos, contribuyendo a su diagnóstico y mitigación, para minimizar el posible impacto y que no signifiquen un trastorno para el desarrollo económico y social (Keller, 1988).

### 3.2.2 Riesgo geológico

La definición de riesgo ha sido abordada por diferentes autores en la que plantean que su existencia implica la presencia de un agente perturbador que tenga la probabilidad de ocasionar daños a un sistema afectable (bienes materiales y/o servicios, así como vidas humanas) en un grado tal, que constituya un desastre (CENAPRED, 2006).

Los riesgos geológicos se definen como el conjunto de amenazas o peligros para los recursos y las actividades humanas, derivados de procesos geológicos de origen interno (endógenos), externos (exógenos) o de una combinación de ambos (Bell, 1999; Zuloaga, 2017). De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2017) los riesgos en el campo de la geología se clasifican en tres tipos; los originados directamente por la dinámica interna de la tierra, los derivados directamente de la dinámica externa de la tierra y los inducidos, provocados por la intervención y modificación directa del ser humano sobre el medio geológico (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1** Riesgos geológicos originados por procesos geológicos internos y externos.

<b>Riesgos originados por la dinámica de los procesos geológicos internos.</b>	<b>Riesgos originados por la dinámica de los procesos geológicos externos.</b>
Sismos	Inestabilidad de laderas
Vulcanismo	Derrumbes
Terremotos	Hundimientos
Tsunamis o Maremotos	Subsidencia y Colapsos
	Suelos expansivos
	Agrietamientos
	Erosión del suelo



Los principales riesgos geológicos endógenos son el riesgo sísmico y el riesgo volcánico, mientras que los principales riesgos geológicos exógenos son los ocasionados por los movimientos en masa en las laderas y los riesgos costeros. Otros ejemplos de riesgos geológicos son: falla hidráulica, erosión, licuefacción, disolución de rocas y cavernas, colapso de la estructura del suelo, subsidencia del terreno, hinchamiento de suelos y rocas, inestabilidad de taludes, contaminación, terremotos, volcanes, congelación del terreno, gases en el subsuelo y estallido de rocas.

Para el estudio de los peligros y la identificación de los riesgos, es importante definir los fenómenos perturbadores mediante parámetros cuantitativos con un significado físico preciso que pueda medirse en una escala numérica, en la mayoría de los fenómenos se distinguen dos medidas, una de magnitud y otra de intensidad (CENAPRED, 2006). La magnitud suele ser una medida del tamaño del fenómeno, de su potencial destructivo y de la energía que libera, representa una característica precisa del fenómeno físico. La intensidad es una medida de la fuerza con que se manifiesta el fenómeno en un sitio dado dependiendo de muchos factores que se relacionan con condiciones locales (CENAPRED, 2006).

La intensidad de un determinado fenómeno geológico en una región pobre tiene menos riesgo económico que una rica, pero, generalmente las pérdidas en vidas humanas son mayores en las zonas pobres que en las zonas ricas.

## CAPITULO 4. Resultados

En este capítulo se presentan parte de los resultados que comprenden a la estratigrafía de las unidades informales definidas y la geología estructural del área de estudio en el presente trabajo.

### 4.1 Estratigrafía

En el área que comprende a las fallas Tenango se han reconocido 15 unidades estratigráficas representadas en el siguiente mapa geológico (Figura 4.1 y Anexo 1). A continuación, se describen cada una de ellas.

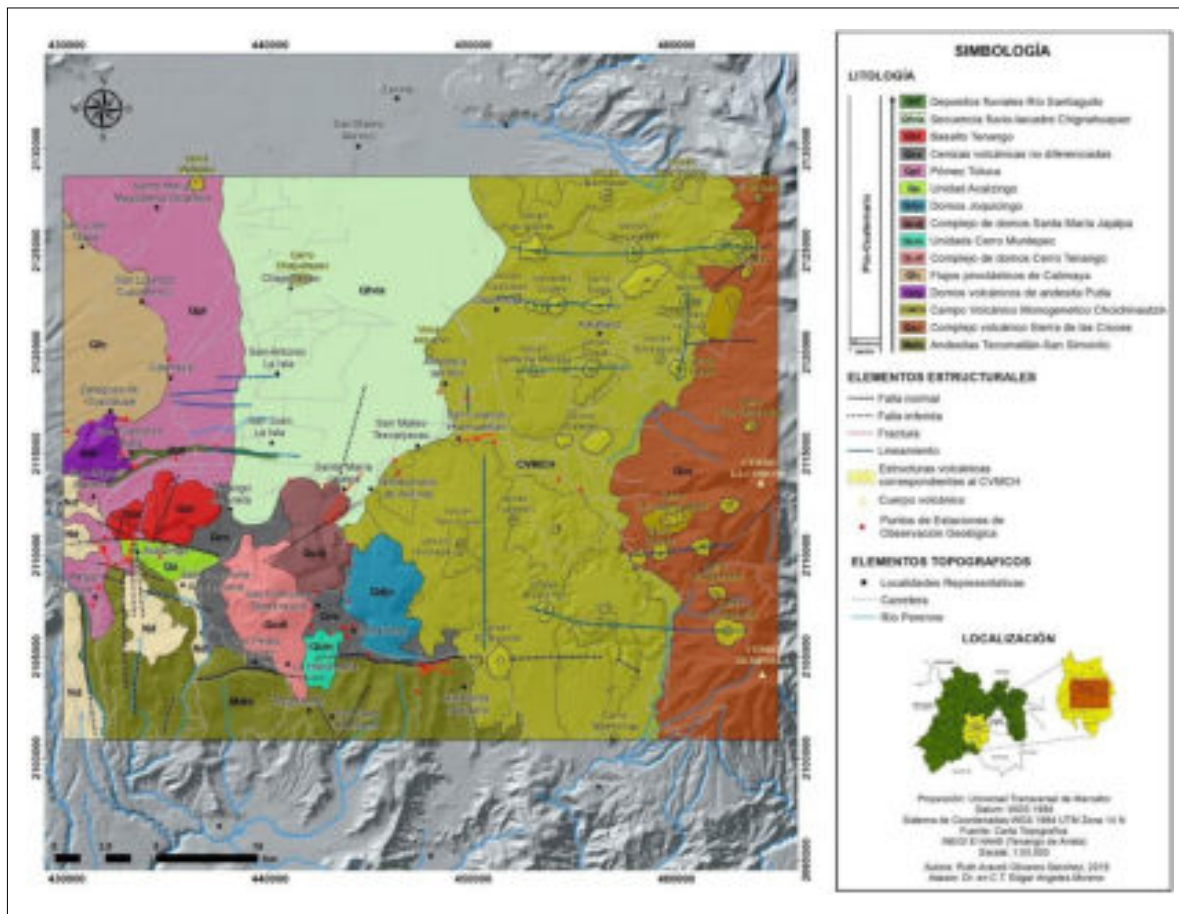


Figura 4. 1 Mapa geológico del área de estudio.

#### 4.1.1 Andesitas Tecamatlán-San Simonito

Las Andesitas Tecamatlán- San Simonito fue definida inicialmente como secuencia máfica basal por García- Palomo et al. (2000), aflorando a lo largo del escarpe del sistema de fallas Tenango y fue descrita por estos autores como lavas andesíticas con brechas intemperizadas a un color rojizo. En este trabajo se cartografió con una extensión abarcando desde el oeste del Volcán El Tezontle hasta las poblaciones entre San Pedro Tlanixco y San Bartolomé Atlatlahuca (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1). Se propone el nombre de andesitas Tecamatlán-San Simonito ya que estas andesitas/basaltos afloran extensivamente en los alrededores de estas poblaciones.

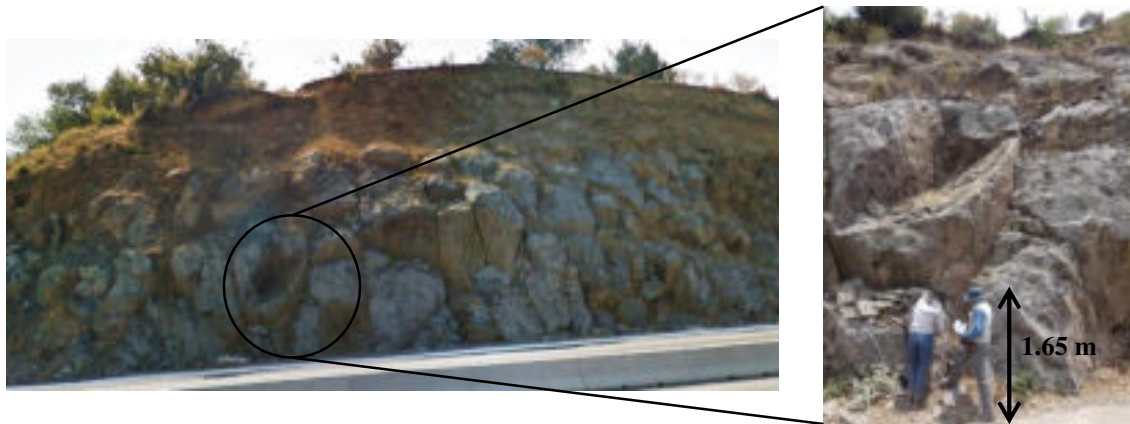
La unidad consiste en depósitos de flujos de lava andesítico-basáltica con estructura masiva y a veces definiendo unidades de flujo con diaclasas de enfriamiento, así también presenta flujos de tipo bloques. La roca andesita-basáltica de los bloques presenta en su mayoría un color gris oscuro con una textura afanítica por lo regular, contienen fenocristales de epidota, clorita, limonita intemperizada y en algunos afloramientos abunda principalmente la pirolusita (Figura 4.2).

En algunos afloramientos se observaron derrames con presencia de diaclasas de enfriamiento, y en otros afloramientos que estaban cercanos a la zona de las fallas Tenango (El Guarda de Guerrero) se observaron fracturas en esta unidad que pueden ser asociadas al sistema de fallas Tenango.



**Figura 4.2** Bloques de roca andesita con abundante pirolusita aflorando al NW de la comunidad El Guarda de Guerrero.

En la parte este de la comunidad Acatzingo a un costado de la autopista a Ixtapan de la Sal, se observó la presencia de coladas de lava andesítica-basáltica con estructura masiva y tipo bloques. Las lavas en bloques presentan bloques subangulosos de roca andesita-basáltica muy fracturada (Figura 4.3). Las andesitas-basálticas presentan una textura afanítica con fenocristales de plagioclasas, piroxeno, idingsita y olivino. En contacto por fallas se presentan en contacto con depósitos de caída de pómez y oleadas piroclásticas con pómez y ceniza volcánica (Figura 4.4).



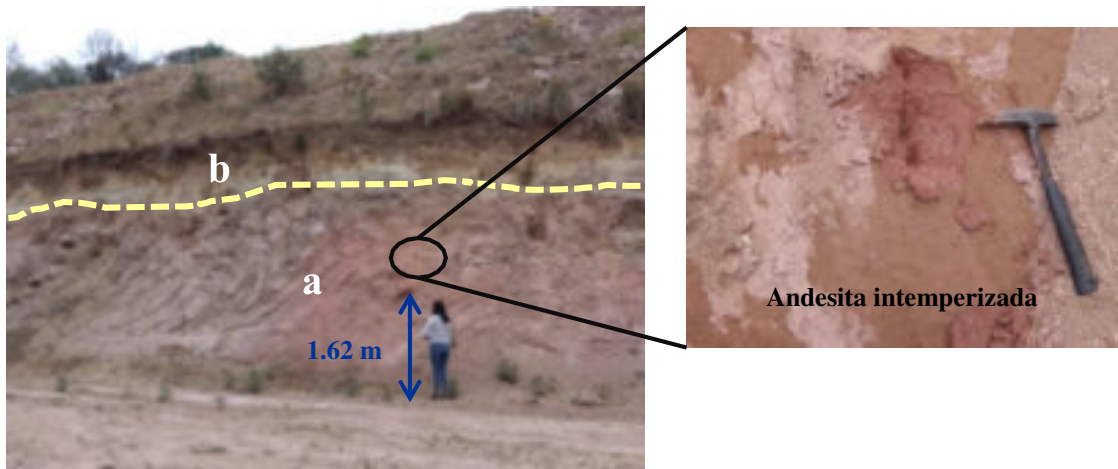
**Figura 4.3** Derrame de lava de roca andesita-basáltica muy fracturada.



**Figura 4.4** Derrame de lava de roca andesita-basáltica a unos cuantos metros de una secuencia de flujos piroclásticos de ceniza volcánica y pómez.

De acuerdo con las observaciones geológicas se sugiere que debido al movimiento de fallas se haya desplazado el derrame de lava de roca andesita-basáltica colocándose en contacto estructural con depósitos de caída más recientes de pómez y oleadas piroclásticas de pómez y ceniza volcánica.

Las andesitas Tecomatlán-San Simonito también afloran a lo largo de la carretera de San Pedro Tlanixco. En algunos afloramientos se encontraron flujos de lava de roca andesítica cubiertas por depósitos de caída de pómez blanca y ceniza volcánica (Figura 4.5). La roca andesítica presenta un color rosa con textura porfídica y fenocristales de plagioclasas.



**Figura 4.5** (a) Flujo piroclástico de roca andesita intemperizada aflorando en la parte sur de la comunidad Acatzingo. (b) Se encuentra cubierta por depósitos de caída de pómez blanca y ceniza volcánica.

La edad de las andesitas Tecomatlán-San Simonito es de  $7,5 \pm 0,4$  Ma, colocándose en el Mioceno tardío, de acuerdo a García-Palomo (1998). En el área de estudio se observaron cubiertas por derrames lávicos basálticos del CVMCh, por derrames lávicos del Complejo de Domos Cerro Tenango y varios depósitos piroclásticos del Nevado de Toluca en el poniente de Zictepec. Así también llama la atención que las andesitas están afectadas por las fallas Tenango y que se expresa como un bloque grande de piso con respecto a la falla en la parte sur de Zictepec. Estas andesitas por su edad quedarían ubicadas por debajo del Nevado de Toluca y subyaciendo también a la Sierra de Las Cruces. Se correlaciona con la secuencia basáltica de las regiones de Querétaro, Morelia y Río Grande (6-8 Ma), las cuales se infiere que se formaron durante los primeros episodios de formación de la Faja Volcánica Transmexicana (Pasquaré et al., 1991; Ferrari et al., 1994).

#### 4.1.2 Complejo Volcánico Sierra de las Cruces

El Complejo Volcánico Sierra de las Cruces (CVSC) se localiza en el sector oriental del área de estudio de este trabajo. Está conformado por varios estratovolcanes entre ellos La Corona y El Cerro Zempoala (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1), cuyos picos presentan una alineación N-S y son caracterizados por presentar colapsos de gran extensión dirigidos hacia el sur (Macías, 2006).

Extensos derrames de lava y domos de composición andesítico-dacítica prevalecen en este Complejo Volcánico Sierra de las Cruces (Gunn y Mooser, 1970), se alternan con flujos piroclásticos de bloques y cenizas, flujos de pómez, oleadas piroclásticas, depósitos de caída, flujos de detritos y lodo, así como repetidos colapsos que originaron depósitos de avalanchas de escombros (García- Palomo et al., 2008).

Las estructuras volcánicas del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin (CVMCh) y sus derrames asociados (descritas más adelante) cubren una extensa parte de este Complejo Volcánico.

La actividad del Complejo Volcánico Sierra de las Cruces abarca desde el Plioceno tardío hasta el Pleistoceno, de acuerdo a Osete et al. (2000) se encuentran sus edades entre 3,7 y 1,8-0.7 Ma. La actividad del volcán Zempoala se ha fechado en 0.7 Ma, y la del volcán La Corona en 1.0 Ma (Arce et al., 2013).

#### 4.1.3 Campo Volcánico Chichinautzin

El Campo Volcánico Chichinautzin fue nombrado originalmente como Grupo Chichinautzin por Fries (1960) en Campos-Enríquez et al. (2015). Este campo volcánico comprende una serie de conos monogenéticos que se distribuyen desde el oriente del sistema de fallas Tenango hasta el municipio de Ocoyoacac al norte. Sus derrames asociados cubren una extensa parte del Complejo Volcánico Sierra de las Cruces en el sector oriente y limitan la Cuenca del Alto Lerma al oeste (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1).

El Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin consiste en flujos de lava y conos de escoria y ceniza, predominantemente de composición andesítica y en menor proporción basáltico y dacítica (Bloomfield y Valastro, 1974; Martín de Pozzo, 1982; Márquez et al., 1999; García-Palomo et al., 2000). La mayoría de los flujos son de tipo a'a y, en menor proporción tipo bloques y pahoehoe (Bloomfield y Valastro, 1974).

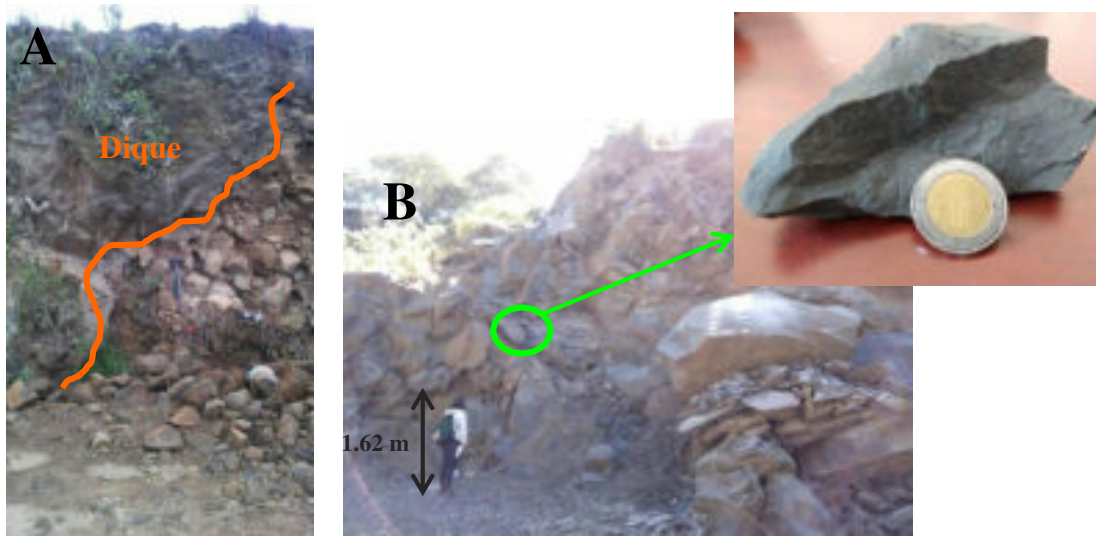
En este trabajo se observaron depósitos de flujos de lava tipo a'a y en bloques, de composición basáltica en las localidades Texcalyacac, Almoloya del Río y Xalatlaco. Los basaltos de los bloques son subangulosos con un color gris claro a oscuro, presentan una textura afanítica y en ocasiones vesicular, alcanzando espesores de 30 y 40 m, contienen fragmentos de vidrio volcánico y fenocristales de olivino y magnetita (Figura 4.6).

Algunos afloramientos presentan diaclasas de enfriamiento que se formaron durante el emplazamiento de la lava y brechas volcánicas basálticas asociadas con la formación de diques (Figura 4.7).



**Figura 4.6** (A) Deposito de flujo de lava tipo a'a de composición basáltica aflorando al NW del Volcán Tres Cruces, entre las poblaciones San Pedro Techuchulco y Texcalyacac. (B) Los bloques presentan espesores entre 30 y 40m, (C) con una textura vesicular afanítica.

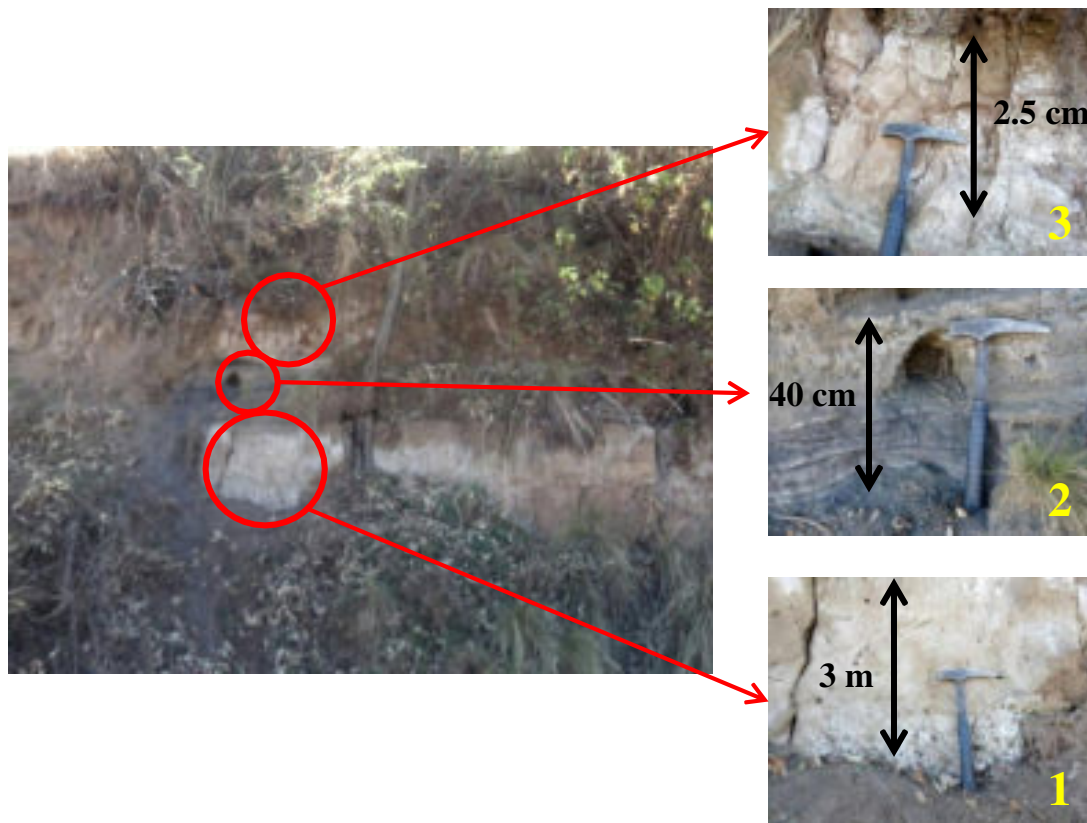




**Figura 4.7** (A) Afloramiento ubicado al SE del municipio Almoloya del Rio, se aprecia un dique atravesando un flujo de brechas volcánicas basálticas con clastos subangulosos. (B) Afloramiento localizado en la comunidad de San Lorenzo Huehuetitlán, se observan bloques de roca basáltica con abundantes diaclasas de enfriamiento.

En la parte noreste del Volcán Tres Cruces, a 2 km de la comunidad de San Lorenzo Huehuetitlán se encontró una secuencia de depósitos piroclásticos de caída que comprenden capas piroclásticas con líticos basálticos más pequeños en granulometría, y depósitos de caída de pómez y ceniza volcánica (Figura 4.8).

El depósito de pómez y ceniza volcánica presenta una estructura granular y un espesor aproximado de 3 cm, la pómez tiene un color blanco y la ceniza un color pardo amarillento. La oleada piroclástica contiene magnetita, presenta una estructura laminar y un espesor aproximado de 40 cm.



**Figura 4.8** Secuencia de depósitos piroclásticos, en la capa 1 se encuentra un depósito de caída de pómez y ceniza volcánica, en la capa 2 se presenta otra capa piroclástica con líticos de basalto más pequeños en granulometría, y en la capa 3 se encuentran un depósito de ceniza volcánica transformada a suelo.

La edad de las estructuras volcánicas del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin occidental y que comprende parte del área de este trabajo varía de 8,390 años a 40,000 años B.P. (Bloomfield y Valastro, 1974). Campos-Enríquez et al. (2015) ha interpretado el registro de edades en el campo volcánico como de naturaleza episódica de 0.8, 0.2 y 0.08 Ma. Su etapa inicial fue paralela y coetánea al sector sur del Complejo Volcánico Sierra de las Cruces (Osete et al., 2000) y esto también ha sido señalado por Arce et al (2013) en el que en algún punto de edades es contemporáneo el vulcanismo del CVMCh y el CVSC.

En la siguiente Tabla 4.1 se muestran algunas de las edades recopiladas de las estructuras volcánicas que pertenecen al CVMCh occidental:

**Tabla 4.1** Edad de las estructuras volcánicas correspondientes al CVMCh en su sector occidental.

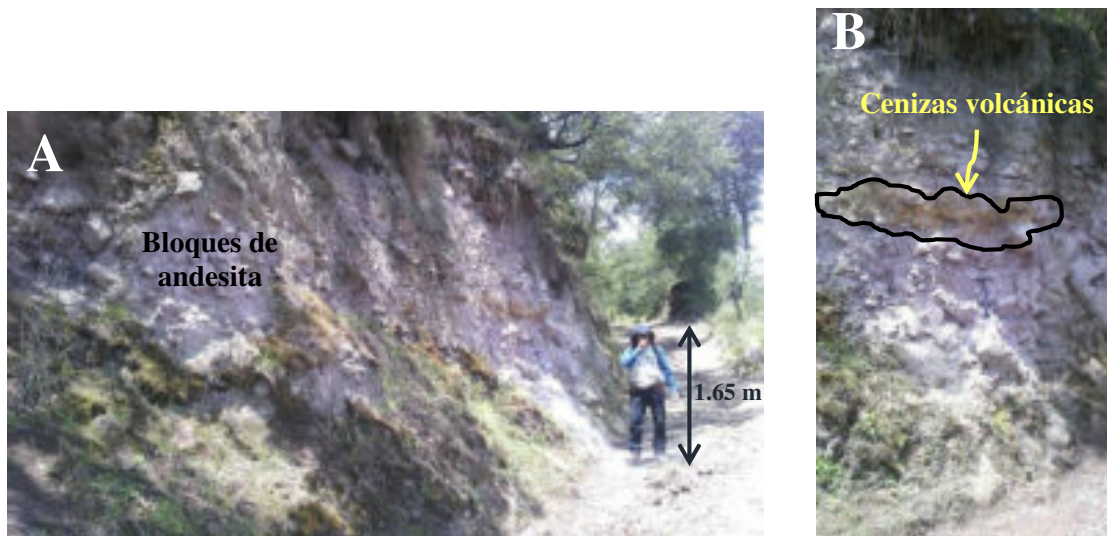
<b>ESTRUCTURA VOLCÁNICA</b>	<b>EDAD</b>
Volcán Tres Cruces	< 8440 años BP <sup>(a)</sup>
Volcán Holotepec	< 8,440 ± 70 años BP <sup>(a)</sup>
Volcán Texontepec	< 8,440 ± 70 años BP <sup>(a)</sup>
Volcán Tepetzingo	< 8,440 ± 70 años BP <sup>(a)</sup>
Volcán Cuautl	<19,530 ± 160 años BP <sup>(a)</sup>
Volcán Negro	<19,530 ± 160 años BP <sup>(a)</sup>
Volcán Tuxtepec	<19,530 ± 160 años BP <sup>(a)</sup>
Volcán Tezontle	21,860 ± 380 años BP <sup>(a)</sup>
Cerro Boludo	21, 860 ± 380 años BP <sup>(a)</sup>
Cerro Tepecingo	21, 860 ± 380 años BP <sup>(a)</sup>
Volcán San Fe Mezapa	~ 30, 000 años BP <sup>(b)</sup>
Chapultepec	~ 30, 000 años BP <sup>(b)</sup>
Metepec	~ 30, 000 años BP <sup>(b)</sup>
Coaxusco	>38,590 ± 3210 años BP <sup>(a)</sup>
Volcán La Silva	>38,590 ± 3210 años BP <sup>(a)</sup>
Cerro Tilapa	>38,590 ± 3210 años BP <sup>(a)</sup>
Volcán Emerinciano	~ 40,000 años BP <sup>(b)</sup>
Volcán Pehualtepec	~ 40,000 años BP <sup>(b)</sup>
Volcán El Quilotzi	~ 40,000 años BP <sup>(b)</sup>
Volcanes Cuates	~ 40,000 años BP <sup>(b)</sup>
Volcán Tecontó	~ 40,000 años BP <sup>(b)</sup>
Volcán Tomasquillo	~ 40,000 años BP <sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> Bloomfield, K. (1975) y <sup>(b)</sup> García-Palomo, A. et al. (2002).

#### 4.1.4 Domos Volcánicos de Andesita Putla

Los domos volcánicos de andesita Putla, se encuentran en el extremo poniente del sistema de fallas Tenango y del área de estudio en general, entre las poblaciones de Zaragoza de Guadalupe y San Miguel Balderas (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1). Estos domos volcánicos incluyen al Cerro Putla encontrándose en sus faldas la población de San Francisco Putla.

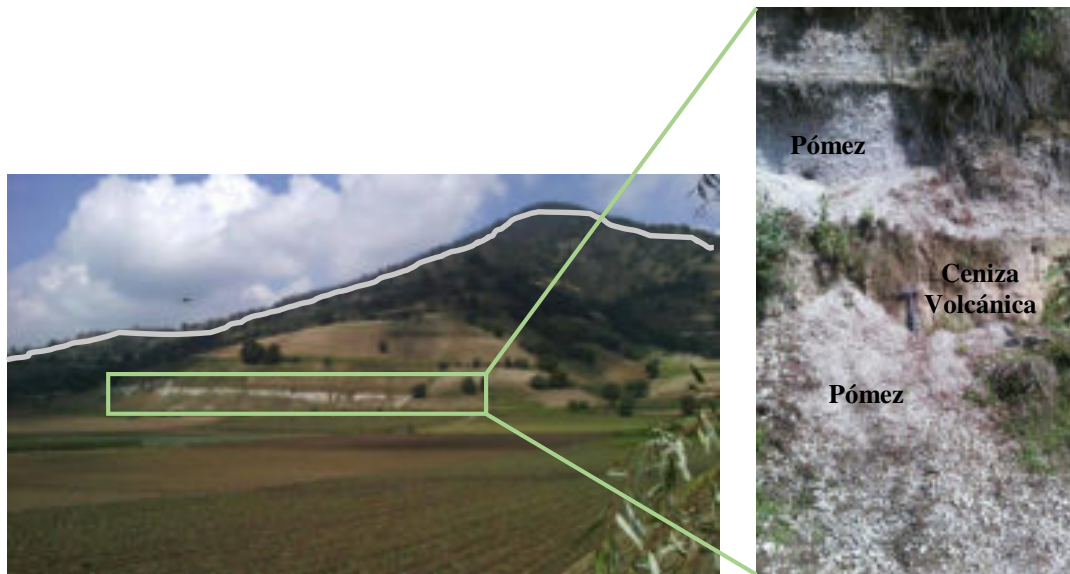
Los depósitos volcánicos de los domos comprenden flujos de bloques y ceniza andesíticos, derrames lávicos de domos andesíticos y otros depósitos de caída piroclástica. Los flujos de bloques y ceniza presentan bloques subangulosos de roca andesítica con ceniza volcánica color pardo-amarillento. Las andesitas de los bloques se encuentran muy fragmentadas, presentan un color rosa claro con una textura de afanítica a porfídica con fenocristales de plagioclasas y anfíboles (Figura 4.9).



**Figura 4.9** (A) Flujo piroclástico de bloques y ceniza de roca andesita aflorando al SW de la población Zaragoza de Guadalupe. (B) Los bloques de andesita se encuentran muy fragmentados y en una matriz de ceniza volcánica.

Los domos volcánicos de andesita Putla se encuentran principalmente cubiertos por depósitos de caída de ceniza volcánica muy fina y pómez andesítica de un color blanco (Figura 4.10). Se infiere que la pómez blanca pueda ser un nivel de la unidad de pómez Toluca que generó el Volcán Nevado de Toluca hace 12,100 años B.P en una erupción pliniana (Macías et al., 1997, Arce et al., 2003 y García-Palomo et al., 2002).

De acuerdo con la carta geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano (SGM) a escala 1: 250 000 clave E14-2, los domos volcánicos de andesita se consideran del Pleistoceno. Los domos volcánicos Putla se consideran cercanos o anteriores a 40 000 años ya que son cubiertos por el Flujo Calimaya y la pómez Toluca.



**Figura 4.10** Domos volcánicos de andesita cubiertos por depósitos de caída de pómez color blanca y ceniza volcánica muy fina (Pómez Toluca).

#### 4.1.5 Flujos piroclásticos Calimaya

Los flujos piroclásticos Calimaya fueron por vez primera reconocidos en el valle de Zacango por Macías et al. (1997) que lo nombró como flujo Calimaya y después descrito también varias en columnas estratigráficas por D'Antonio (2008). Estos flujos afloran en el extremo poniente del área de estudio y de la falla Tenango, su extensión abarca las poblaciones de San Juan Tilapa, San Lorenzo Cuauhtenco, Calimaya y Zaragoza de Guadalupe (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1).

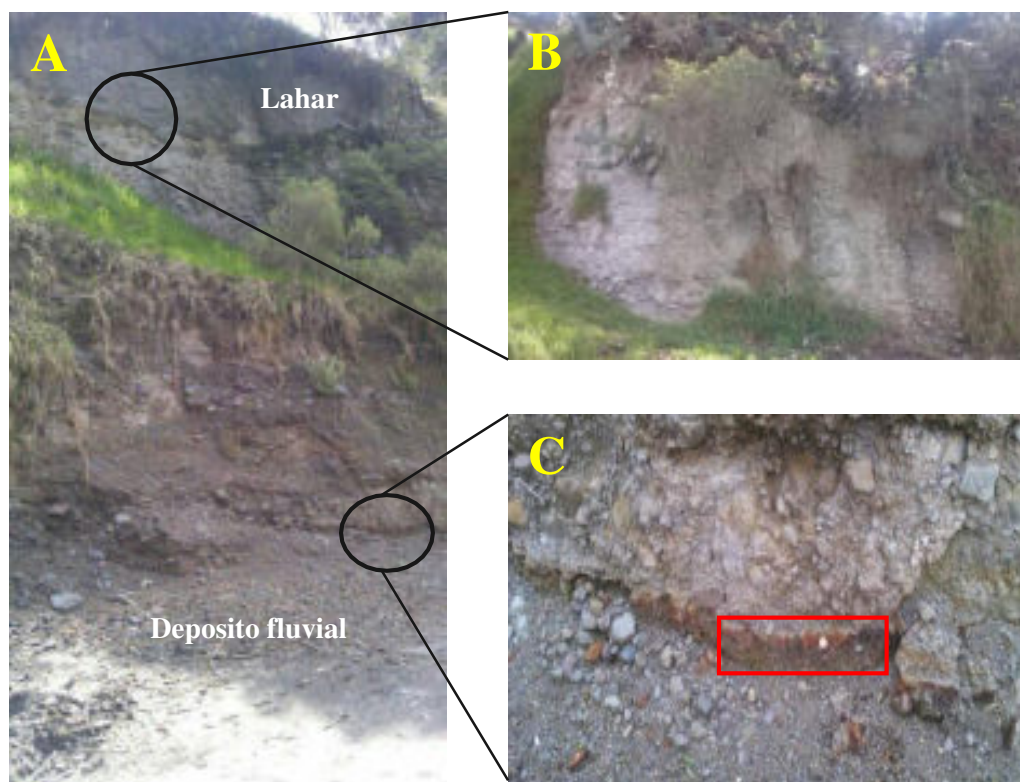
La unidad consiste de depósitos de flujos piroclásticos de bloques soportados por una matriz que varía en granulometría de ceniza a arenas muy gruesa a fina. Los clastos que conforman el depósito están constituidos por: (1) bloques subangulosos a angulosos de roca andesítica de un color que va de gris claro a rosado con una textura porfídica con fenocristales de plagioclasas y anfíbol, y; (2) pómez de un color gris claro con densidad variable (pómez densa a muy vesiculada) más pequeña en granulometría (Figura 4.11).



**Figura 4.11** Afloramiento localizado al norte de la población Calimaya, presenta bloques de roca andesítica y pómez más pequeña en granulometría inmersas en una matriz de ceniza volcánica.

Estos depósitos piroclásticos son aprovechados como materiales de la construcción ya que es abundante la existencia de bancos de material en los alrededores de Calimaya. Estos depósitos en su parte oriente hacia el valle fluvio-lacustre parece que son cubiertos en parte por algunas capas de la secuencia fluvio-lacustre Chignahuapan y también son cubiertos por depósitos de pómez y ceniza que pertenecen a la pómez Toluca.

La unidad de depósitos piroclásticos Calimaya parece estar cubierta en la parte sureste (cercanías a la población Zaragoza de Guadalupe) por un depósito de Lahar que presenta una estructura masiva y abundantes clastos de roca volcánica (Figura 4.12). Los clastos, en este Lahar, son de subredondeados a subangulosos, se encuentran inmersos en una matriz de ceniza volcánica con un color pardo-amarillento y de tamaño arena-limo. El depósito Lahar sobreyace en un depósito fluvial el cual, en algunas partes se observa una oxidación termal con presencia de hematita lo que le confiere una coloración rojiza (Figura 4.12).



**Figura 4.12** (A) Afloramiento que presenta un Lahar subyaciendo a un depósito fluvial. (B) El depósito de lahar presenta clastos de roca volcánica dentro de una matriz de ceniza volcánica. (C) Y el depósito fluvial en algunas partes prevalece una oxidación termal que le confiere una coloración rojiza.

Los flujos piroclásticos Calimaya se correlacionan con la destrucción de grandes domos centrales originados a partir del Volcán Nevado de Toluca de acuerdo a D' Antonio (2008) entre edades de 13 000 años y 40 000 años. Estos flujos piroclásticos Calimaya (Flujo Calimaya) fueron fechados en cerca de 28 000 años por Macías et al. (1997) y confirmado por D'Antonio (2008).

#### 4.1.6 Complejo de domos Cerro Tenango

El complejo de domos Cerro Tenango se localiza entre las poblaciones San Pedro Zictepec y San Francisco Tepexoxuca, ocupando un espacio entre dos segmentos del sistema de fallas Tenango (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1). De acuerdo con Bloomfield (1975), García-Palomo et al. (2002) y Márquez et al. (1999) forma parte del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin, sin embargo, en este trabajo no se considera esta aseveración y relación con base en la cartografía geológica.

La carta geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano (SGM) a escala 1: 250 000 clave E14-2 considero a este complejo de domos como derrames de lava compuestos de basaltos y andesitas, cuya edad fue considerada del Pleistoceno tardío- Holoceno.

En este trabajo el complejo de domos Cerro Tenango se describe como flujos de lava tipo domo de andesitas/dacitas con una textura porfídica, se observan varios centros de emisión con formación de domos. La ubicación de este complejo de domos entre dos segmentos de falla de las fallas Tenango hace suponer que su formación puede estar ligada a varios períodos de fallamiento en el sistema de fallas. Se correlaciona en edad con los domos volcánicos andesíticos Putla. En la parte sur, cerca de la comunidad La Haciendita algunos derrames están encima de la traza de la falla Tenango.



#### 4.1.7 Unidad Cerro Muntepec

La unidad Cerro Muntepec se localiza al suroeste de la población Joquicingo, a menos de 200 m de la salida. Las estructuras volcánicas que lo comprenden traslapan dos segmentos de la falla Tenango (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1).

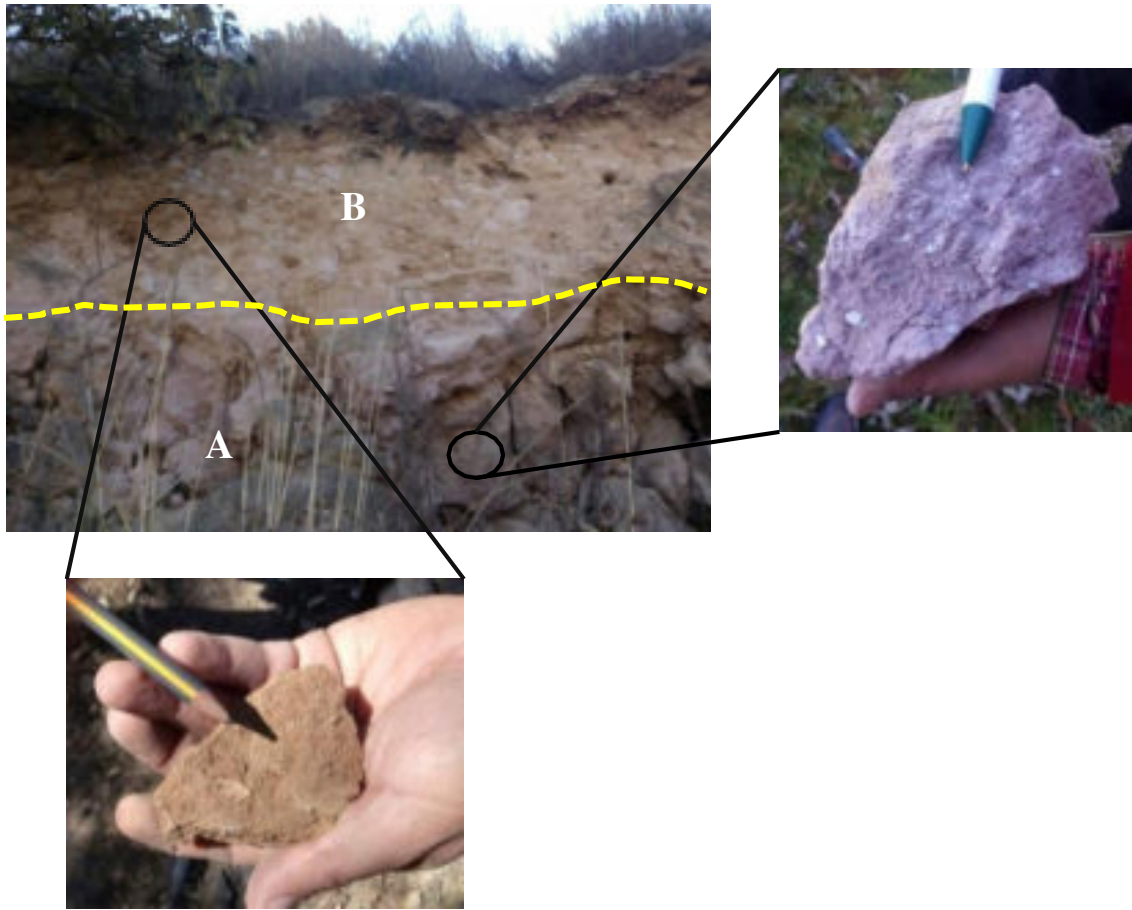
En este trabajo la unidad Cerro Muntepec se considera como un conjunto de estructuras volcánicas de posibles conos cineríticos los cuales están cubiertos por cenizas volcánicas más recientes, por lo que no se pueden observar los afloramientos internos de las estructuras. De acuerdo a las composiciones basálticas de la unidad podría correlacionarse con los volcanes del CVMCh.

#### 4.1.8 Complejo de domos Santa María Jajalpa

El Complejo de domos Santa María Jajalpa, se encuentra entre el complejo de domos Cerro Tenango y el complejo de domos Joquicingo (descrito más adelante). Se distribuye principalmente a lo largo de la carretera que va de Santa María Jajalpa a San Francisco Tepexoxuca, en sentido norte-sur (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1).

Consiste en depósitos de flujos de lava tipo a'a y en bloques de roca dacita y andesita, con menor cantidad de flujos de bloques y ceniza. Los bloques en las lavas son en su mayoría bloques subredondeados a subangulosos con espesores de 3m y a escala de centímetros, algunos de estos se encuentran muy fracturados. Las andesitas y dacitas de los bloques presentan un color rosado con una textura afanítica y en ocasiones presenta una textura porfídica, contienen fenocristales de plagioclasas, feldespato, biotita, anfíbol y en menor cantidad cuarzo (Figura 4.13).

Los depósitos de flujos de lava sobreyacen en depósitos piroclásticos de pómez y ceniza volcánica correspondientes a depósitos de caída, los cuales presentan una estructura granular semi-fina compuesta de piedra pómez de color crema a blanco de composición andesítica y ceniza volcánica con la misma granulometría que una arcilla, de color pardo- amarillento (Figura 4.13). La piedra pómez contiene fenocristales de plagioclasas, hornblenda y fragmentos de vidrio volcánico.



**Figura 4.13** Afloramiento ubicado al NW del Complejo de domos Santa María Jajalpa, sobre la carretera Tenango - Jajalpa. (A) Se encuentra un flujo de lava tipo bloques subangulosos de medianos a grandes de roca dacita, en el acercamiento (zoom) se puede observar a la dacita con fenocristales de plagioclasas, biotita, mica y en menor cantidad cuarzo. (B) Subyace en un depósito de caída de ceniza volcánica y pómez color blanco, en el acercamiento (zoom) se puede observar a la ceniza volcánica con un color pardo-amarillento.

En algunos afloramientos de depósitos piroclásticos de pómez y ceniza se encuentran cubiertos por capas piroclásticas de caída de escoria con estructura laminar y de composición basáltica.

Estos domos son cortados por fallas NE-SW del conjunto de fallas de Tenango. La edad que se le asigna al complejo de domos Santa María Jajalpa es Pleistoceno tardío- Holoceno, casi contemporánea con los Complejos de domos Cerro Tenango y domos Joquicingo, descrito enseguida.

#### 4.1.9 Domos Joquicingo

Los domos Joquicingo afloran a lo largo de las laderas en la parte oeste del Volcán Tres Cruces, cerca del bloque del bajo de la falla Tenango (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1). De acuerdo con la cartografía de Márquez et al. (1999) y García-Palomo (2002) estas estructuras volcánicas se incluyen como parte del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin, sin embargo, en este trabajo se diferencia por su litología y posición geográfica.

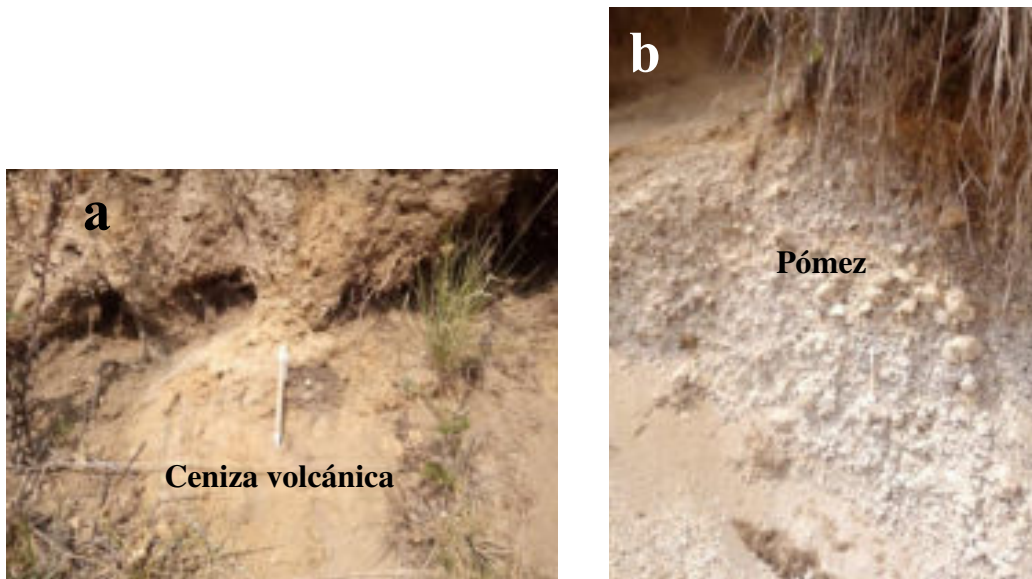
Consiste en depósitos piroclásticos andesíticos y de flujos de lava tipo bloques de roca andesita. La andesita de los bloques se encuentra intemperizada y presentan una textura porfídica con fenocristales de plagioclasas. Los derrames lávicos son sobreyacidos por depósitos piroclásticos de escoria basáltica con estructura laminar.

La edad de los domos Joquicingo es considerada de acuerdo a la carta geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano (SGM) a escala 1: 250 000 clave E14-2 del Pleistoceno tardío -Holoceno. En este trabajo, los domos Joquicingo, se consideran anteriores a los derrames lávicos del volcán Holotepec de cerca 8440 años (Bloomfield, 1975) del Complejo Volcánico Monogenético Chichinautzin ya que son sepultados por estos derrames y casi contemporáneos con los domos volcánicos Putla y domos Santa María Jajalpa que pueden ser cercanos a 40 000 años por interpretación.

#### 4.1.10 Unidad Acatzingo

La unidad Acatzingo se localiza a lo largo del escarpe de la falla Tenango, cerca de la población San Bartolomé Atlatlahuca (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1). En trabajos anteriores esta unidad fue cartografiada como parte de la Secuencia Máfica Basal del Mioceno-Tardío (García-Palomo, 2000) sin embargo, en este trabajo se decide separar a la Unidad Acatzingo debido a que existen variaciones en la estratigrafía, su expresión morfológica y variaciones litológicas.

La unidad Acatzingo comprende depósitos de caída compuestos de piedra pómez de color crema a blanco de composición andesítica y ceniza volcánica fina de color pardo amarillento (Figura 4.14). La piedra pómez presenta una textura fibrosa con fenocristales de anfíbol.



**Figura 4.14** Afloramiento ubicado al NW de la población San Bartolomé Atlatlahuca, (a) presenta depósitos de caída de ceniza volcánica y (b) pómez contacto grano a grano de color crema a blanco.

La unidad Acatzingo se correlaciona con la Pómez Toluca Inferior del Volcán Nevado de Toluca extruida hace 21.700 años A.P., la cual se compone por depósitos de caída gradados inversamente rico en pómez de un color amarillo y fragmentos de esquistos (Macías et al., 1997 y García-Palomo et al., 2002).

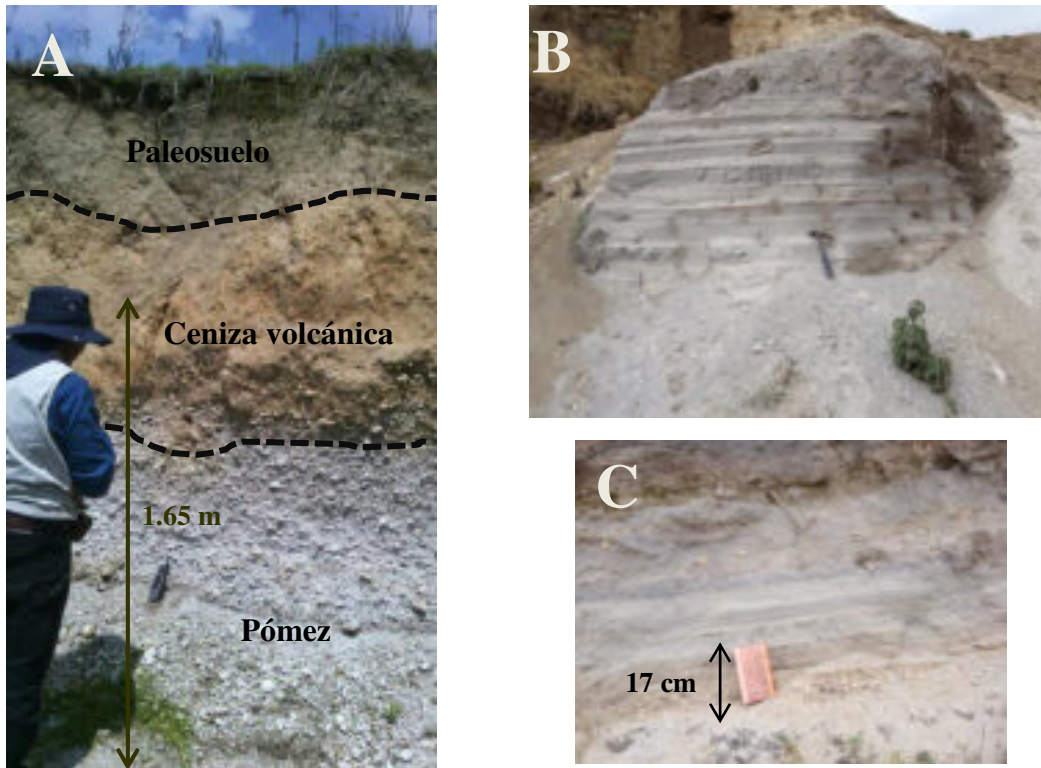
#### 4.1.11 Pómez Toluca

La pómez Toluca aflora en el bloque del bajo y escarpe de la falla Tenango, su extensión abarca desde las poblaciones de Caputitlán y Santa María Magdalena Ocotitlán hasta San Pedro Tlanixco, en sentido norte-sur (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1).

Arce et al. (2003) representa a esta unidad como la Pómez Toluca Superior extruida aproximadamente hace 10,500 años por una erupción pliniana en el Volcán Nevado de Toluca.

La unidad Pómez Toluca en este trabajo se describe como una secuencia de flujos piroclásticos de pómez y ceniza volcánica, correspondientes a depósitos de caída y algunas intercalaciones de oleadas piroclásticas.

Los depósitos de caída están compuestos de piedra pómez de un color amarillo a blanco de composición andesítica, líticos de roca volcánica andesítica más pequeña en granulometría, y ceniza volcánica muy fina de un color pardo-amarillento y gris claro (Figura 4.15). En algunos afloramientos estos depósitos están acompañados en la base y en la parte superior por capas paralelas de oleadas piroclásticas de ceniza volcánica con estructura laminar y pómez color amarilla (Figura 4.15).



**Figura 4.15** Secuencia de flujos piroclásticos de pómez y ceniza volcánica. (A) Deposito de caída de piedra pómez andesítica y ceniza volcánica. (B) Depósito de caída de ceniza volcánica y oleadas piroclásticas intercaladas con el flujo de pómez y ceniza. (C) Capa de oleada piroclástica de ceniza volcánica con pómez de un color amarillo.

#### 4.1.12 Cenizas Volcánicas no diferenciadas

Las cenizas volcánicas no diferenciadas afloran a lo largo del bloque del bajo del sistema de fallas Tenango y en afloramientos dispersos y aislados como se puede ver en el mapa geológico de la Figura 4.1 y Anexo 1.

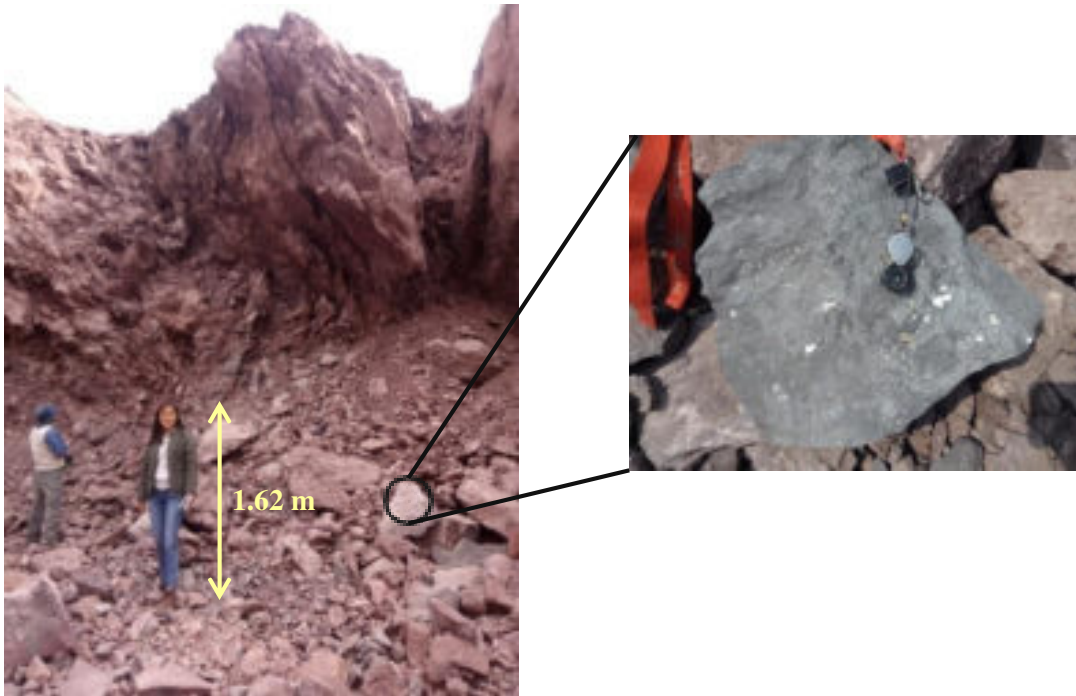
Son antiguos depósitos de ceniza volcánica cubiertos por capas de arcillas, grava y limo, que son de abanicos aluviales recientes y suelos recientes.

#### 4.1.13 Basalto Tenango

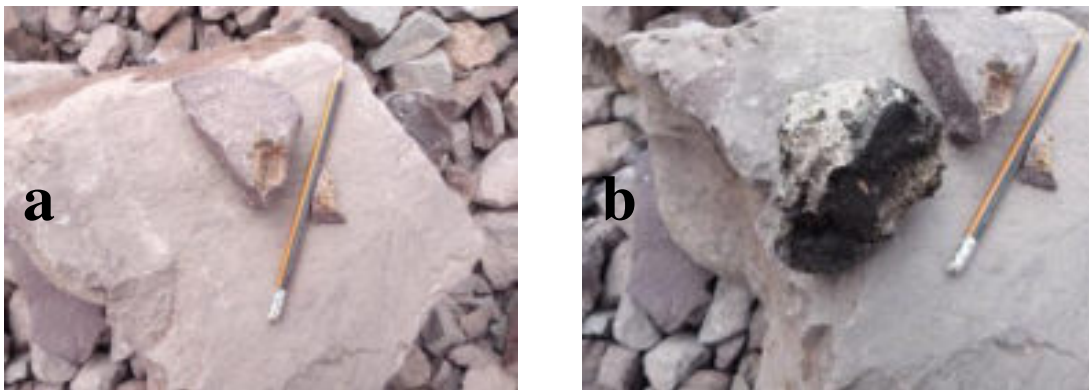
El Basalto Tenango que aflora en el Cerro Tetepétl y El Pedregal, se encuentra al oeste de la población Tenango de Arista. También aflora en el bloque del bajo y a lo largo de la traza del sistema de fallas Tenango (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1).

Fue descrito por Bloomfield (1973) como flujos de lava tipo bloques de composición basáltico-andesítica extruida a partir de cuatro fisuras eruptivas, cubriendo depósitos piroclásticos retrabajados derivados del Volcán Nevado de Toluca y sobrepasando localmente el escarpe de la falla Tenango.

En este trabajo se describe a la unidad como flujos de lava andesítico-basáltica de estructura masiva, en unidades de derrame y con brechas volcánicas asociadas a flujo. La andesita-basáltica de los bloques presenta un color rosado y gris claro con una textura que varía de afanítica a porfídica, contiene fenocristales de plagioclasas, xenolitos de pómez y fragmentos líticos de otras rocas volcánicas tales como, limonitas y epidotas (Figura 4.16 y 4.17). Se sugiere que las andesitas-basálticas hayan atravesado otras rocas volcánicas más antiguas. En las cercanías con la falla Tenango se presentan los derrames de lava muy fracturados y formando bloques dimensionados por la intersección de fracturas.



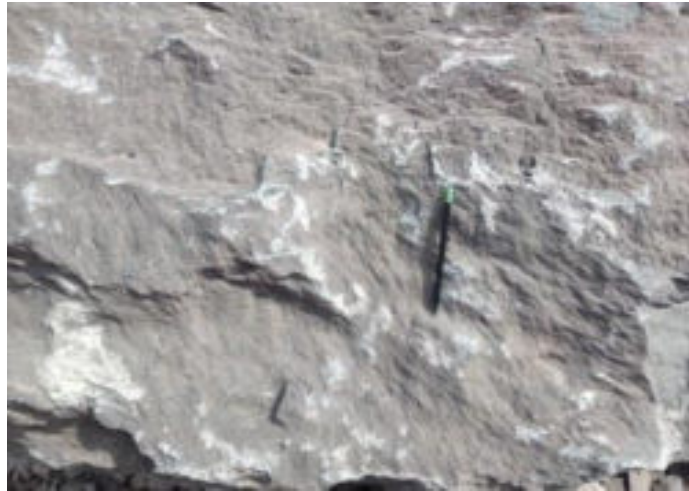
**Figura 4.16** Depósito de flujo de lava tipo bloque de roca andesita-basáltica, en el acercamiento (zoom) se pueden observar a las plagioclasas de la roca.



**Figura 4.17** La andesita-basáltica de los boques correspondientes al Basalto Tenango contienen fragmentos líticos de otras rocas volcánicas tales como, limonitas (a) y epidotitas con xenolitos de pómez blanca (b).



En los bloques de las andesitas-basálticas limitados por fracturas y fallas presentan indicadores cinemáticos como: microbrechamiento, estrías, medias lunas y escalones de falla (Figura 4.18). Estos indicadores sugieren diferentes movimientos de rocas y bloques que produjo la falla.



**Figura 4.18** Bloque de roca andesita- basáltica del Basalto Tenango con estrías, escalones y medias lunas.

De acuerdo con Bloomfield (1973), el Basalto Tenango forma parte del vulcanismo del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin. Este basalto fue extruido hace  $8,510 \pm 160$  años BP aproximadamente al mismo tiempo que los flujos de lavas del Volcán Tres Cruces y Holotepec (Bloomfield y Valastro 1975). El que lavas del Basalto Tenango cubran en algunas partes al escarpe de un segmento de la falla Tenango (Bloomfield 1973) y que también el Volcán Tezontle de 21,860 años (Bloomfield, 1975) se haya desarrollado encima de la falla Tenango en otra posición a lo largo de la traza de la falla Tenango sugiere que la falla ha tenido varios periodos de actividad y que continua activa hoy día debido al fracturamiento y fallamiento del propio Basalto Tenango.

#### 4.1.14 Secuencia fluvio-lacustres Chignahuapan

La secuencia fluvio-lacustre Chignahuapan abarca los depósitos ubicados en las partes bajas desde la falla Tenango hasta los municipios de Metepec, San Mateo Atenco y Lerma en sentido norte-sur y desde los depósitos del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin hasta la unidad Pómez Toluca en sentido este-oeste (ver mapa geológico en la Figura 4.1 y Anexo 1).

Metcalfé et al. (1991) y Newton et al. (1999), describen a esta unidad como una secuencia de sedimentos lacustres y fluviales con presencia de diatomitas, intercaladas con capas de piedra pómez correspondiente a la Pómez Toluca Superior de hace 10.5 Ka (Macías et al., 1997) y cenizas volcánicas derivadas del Volcán Tres Cruces fechado alrededor de los 8440 años BP (Bloomfield, 1975).

En este trabajo se estudió un afloramiento ubicado en la parte suroeste de la población Texcalyacac, se observaron depósitos de cenizas volcánicas, suelos recientes y capas cubiertas por estas cenizas volcánicas de turbas de origen lacustre con presencia de arcilla. Las cenizas volcánicas presentan un color pardo oscuro a claro fragmentos de roca volcánica de color crema claro a blanco a la intemperie y amarillo pálido al fresco. Las turbas presentan un color gris claro a oscuro con algunos clastos redondeados de roca volcánica; presentan abundantes restos orgánicos de troncos o tallos de plantas, así como raíces (Figura 4.19).

La edad de los depósitos fluvio-lacustres de la cuenca del Alto Lerma se considera que se formaron en el Holoceno.

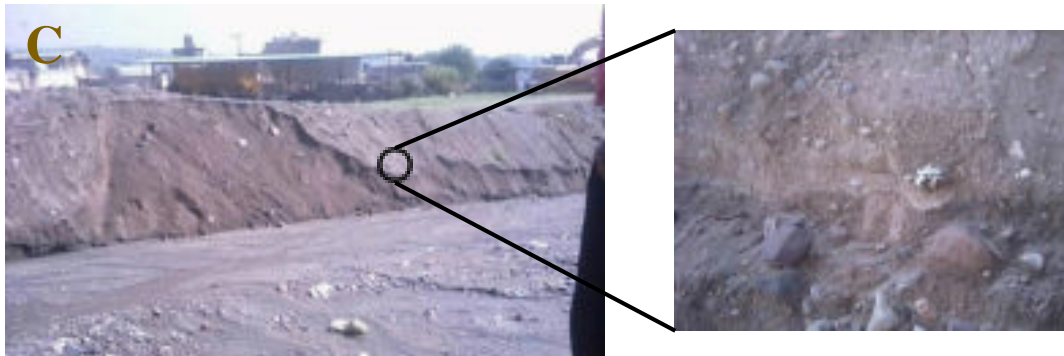


**Figura 4.19** Depósitos de turba de color gris oscuro a blanco con presencia de arcillas y restos de raíces, troncos y tallos de plantas.

#### 4.1.15 Depósitos fluviales del río Santiaguito

Estos depósitos fluviales se localizan entre las comunidades de San Francisco Putla y San Juan la Isla, se encuentran a lo largo del curso de los ríos Santiaguito y El Zaguán, cortan a la unidad Pómez Toluca y a depósitos de lahar, hasta llegar a la secuencia fluvio-lacustre Chignahuapan (ver mapa geológico de la Figura 4.1 y Anexo 1).

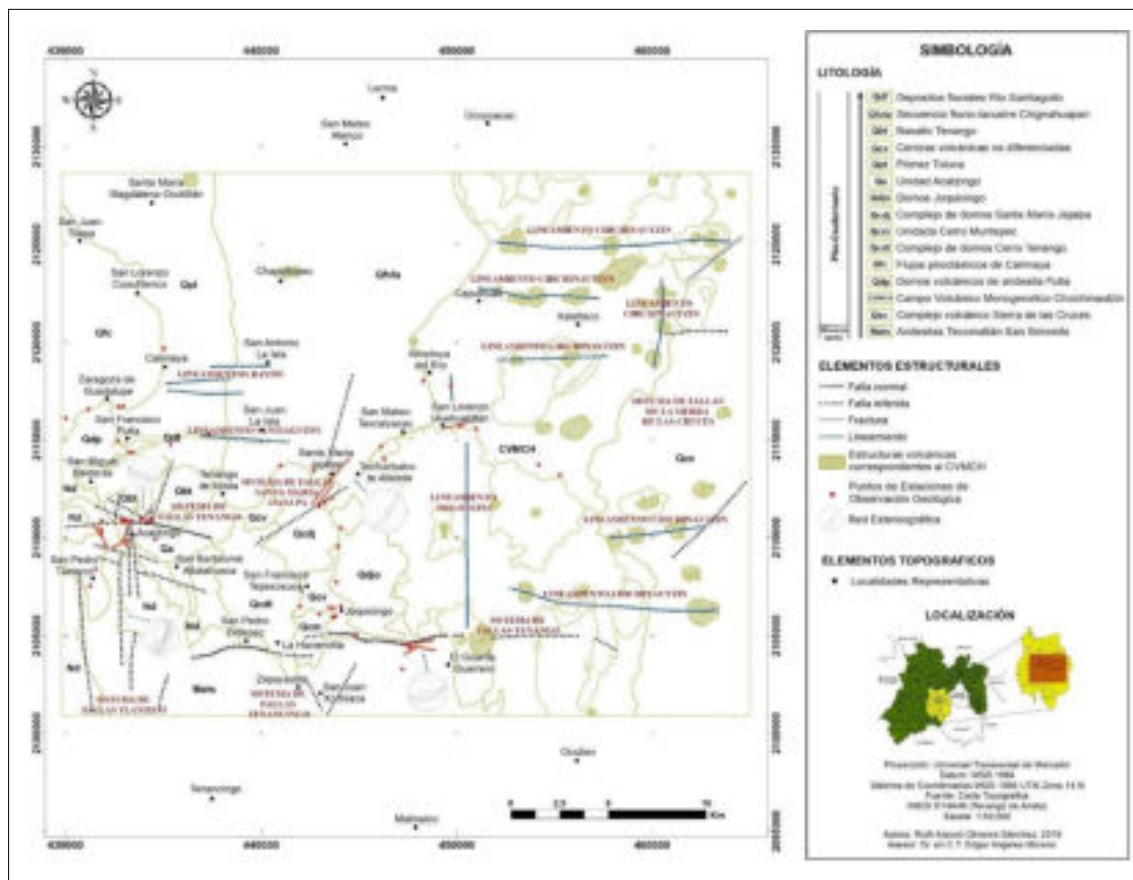
Los depósitos fluviales presentan una secuencia de gravas y arenas gruesas con fragmentos epiclásticos de pómez y líticos andesíticos (Figura 4.20). Los bordes de los clastos presentan una forma redondeada a subredondeada dentro de una matriz limo-arenosa. En los bordes del cauce del río Santiaguito se observan depósitos de lahar que presentan clastos de andesita bien redondeados en una matriz de arena y grava, y en los depósitos fluviales de la unidad río Santiaguito se observan bloques de antiguos depósitos piroclásticos antiguos de ceniza volcánica. La edad considerada para estos depósitos fluviales es del Holoceno.



**Figura 4.20** (A) Depósito fluvial con clastos de roca andesita y pómez intercaladas con gravas y arenas de grano fino. (B) Material epiclástico con pómez y líticos andesíticos rodeados de una matriz limo-arenoso. (C) Material de lahar y epiclástico correspondiente a clastos con forma redondeada y subangulosa rodeados por ceniza volcánica antigua y pómez.

## 4.2 Geología estructural

Con base en la fotointerpretación geológica de lineamientos estructurales, geología de campo y análisis estructural, se identificaron cinco sistemas de fallas y cuatro lineamientos estructurales en el área de estudio, los cuales fueron denominados: Sistema de Fallas Tenango (SFT), sistema de fallas Tlanixco (SFTL), sistemas de fallas Jajalpa (SFJ), sistema de fallas Tenancingo (SFTN), sistema de fallas de la Sierra las Cruces (SFSC), lineamiento Chichinautzin, lineamiento Holotepec, lineamiento Santiaguito y lineamiento Rayón. En la figura 4.21 (mapa geológico-estructural) y Anexo 2 se muestran las fracturas, fallas y lineamientos estructurales verificados en campo y las estructuras interpretadas. A continuación, se describen cada uno de ellos.



**Figura 4.21** Mapa geológico-estructural del área de estudio

#### 4.2.1 Sistema de fallas Tenango

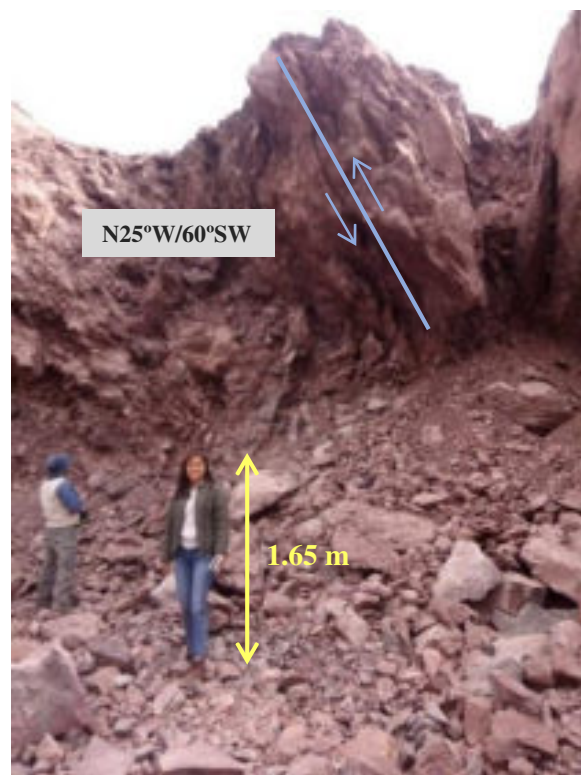
El sistema de fallas Tenango (SFT) fue originalmente identificado por Mooser y Maldonado-Koerdell (1961) en García-Palomo et al. (2000) después fue tratado de nuevo por García-Palomo (1998). García-Palomo et al. (2000) describe al sistema de fallas Tenango (SFT), como un conjunto de fallas y fracturas que se extienden desde el este del Volcán Nevado de Toluca (fuera del área de estudio) hasta las cercanías con el Volcán El Tezontle (ver mapa geológico- estructural en la Figura 4.21 y Anexo 2). En este trabajo se encontró que el SFT se prolonga más allá del volcán El Tezontle, sin embargo, esta parcialmente cubierto por depósitos volcánicos del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin.

Norini et al. (2006) caracteriza al SFT como un sistema de fallas curvilíneas y escalonadas orientadas principalmente al E-W y ESE-WNW en los flancos del Volcán Nevado de Toluca, con movimientos laterales izquierdos asociados con un desplazamiento normal cuya inclinación es hacia el norte, y una longitud de al menos 50 km con un ancho máximo de 10 km.

Para este trabajo el SFT y dentro del área de estudio tiene una longitud mínima de 18 km, comprende varios segmentos de fallas con orientaciones preferenciales E-W y en menor cantidad fracturas NW-SE con echados que varían de 48° a 79° tanto al NE como al SW (ver mapa geológico- estructural en la Figura 4.21 y Anexo 2). Los segmentos de falla del SFT se denominan en este trabajo: Tenango, Zictepec y Joquicingo, ya que los segmentos de falla E-W tienen al pie del escarpe estos poblados.

El SFT es de tipo normal ya que corta cerca de la comunidad de Acatzingo a derrames de andesita-basáltica del Basalto Tenango (Figura 4.22), y en otros lugares la falla es cubierta por depósitos de la unidad Pómez Toluca. Entre San Pedro Tlanixco y San Bartolomé Atlatlahuaca el sistema de fallas Tenango afectó a las andesitas Tecomatlán San Simonito pero están afectados los segmentos de falla E-W por fallas y fracturas N-S del sistema de fallas Tlanixco (descrito más adelante) y coincide en esta zona de San Bartolomé Atlatlahuaca con una posible falla N-S de relevo estructural con acomodo de segmentos de fallas E-W del SFT.

En San Pedro Zictepec un segmento de falla E-W se tiene y continúa hasta la población La Haciendita y luego vuelve a presentarse otro segmento desde La Haciendita hasta la población El Guarda Guerrero cortando a depósitos volcánicos de los domos Joquicingo, cenizas volcánicas no diferenciadas y a las andesitas Tecamatlán-San Simonito. En la comunidad La Haciendita existe un escalón de relevo estructural y en donde aparentemente el complejo de domos Tenango traslapa uno de los segmentos de falla. El Cerro Muntepec se desarrolló en esta zona de relevo estructural entre segmentos de falla del SFT.



**Figura 4.22** Falla Tenango afectando a rocas del basalto Tenango, presenta una orientación al NW- SE.

En el afloramiento al noroeste de la población el Guarda Guerrero se observaron fracturas menores que corresponden a los lineamientos E-W del SFT. Estas fracturas cortan a depósitos de las andesitas Tecamatlán-San Simonito, formando diaclasas de enfriamiento en los bloques de las andesitas Tecamatlán-San Simonito. Algunos datos estructurales en este punto son de S77°E, S70°E, N79°E y N59°E. El volcán El Tezontle de 21,860 años (Bloomfield, 1975) se desarrolló en el segmento de falla E-W que va de la Haciendita a este volcán y lavas del volcán Tepetzingo cubre la continuación de la falla hacia el oriente.

De acuerdo a las relaciones de campo, la actividad del sistema de fallas Tenango en sus varios segmentos ha ocurrido en varios periodos. Un primer periodo de la edad de la actividad del SFT se puede considerar posterior a la formación de las andesitas Tecamatlán-San Simonito (ca.  $7,5 \pm 0,4$  Ma) y antes del emplazamiento de la unidad Pómez Toluca (ca. 10,500 años). Otro período pudo ser antes o cercano a la formación del complejo de domos Santa María Jajalpa y domos de Cerro Tenango de 30 000 a 40 000 años y detenerse cerca de los 21,860 años por la relación con el volcán El Tezontle, y otro período de actividad cercano a la formación del Cerro Muntepec y Basalto Tenango (ca.  $8,510 \pm 160$  años) para después activarse de nuevo, esto último demostrado por la sismicidad reciente y en parte por el sismo de septiembre de 2017 que pudo haber activado segmentos de falla cerca de la población de Joquicingo. El que el fallamiento en el SFT sea episódico podría sugerir que pueda existir una relación con el vulcanismo episódico en el Campo Volcánico Monogénico Chichinautzin (CVMCh) desde los 1.2 Ma sugerido por Arce et al. (2013) y la sismicidad de las fallas E-W de Aztlán (Campos-Enríquez et al., 2015). Estas relaciones de corte sugieren que la actividad del SFT pudiera ser consistente durante el Pleistoceno-tardío Holoceno. Norini et al. (2006) consideran que la actividad del SFT durante el Holoceno presento una tasa de deslizamiento de 0,3 a 0,5 mm/año.

En la zona delimitada por los poblados de Santa María Jajalpa, Joquicingo, San Pedro Zictepec y Acatzingo llama la atención que en esta zona es mayor la cantidad de diversidad de tipos de estructuras volcánicas de tipo domos volcánicos andesíticos y sus derrames correspondientes, y coincide con un escalón izquierdo de los segmentos de falla del SFT y la intersección con el sistema de fallas Santa María Jajalpa con direcciones NE-SW (descritos más adelante).

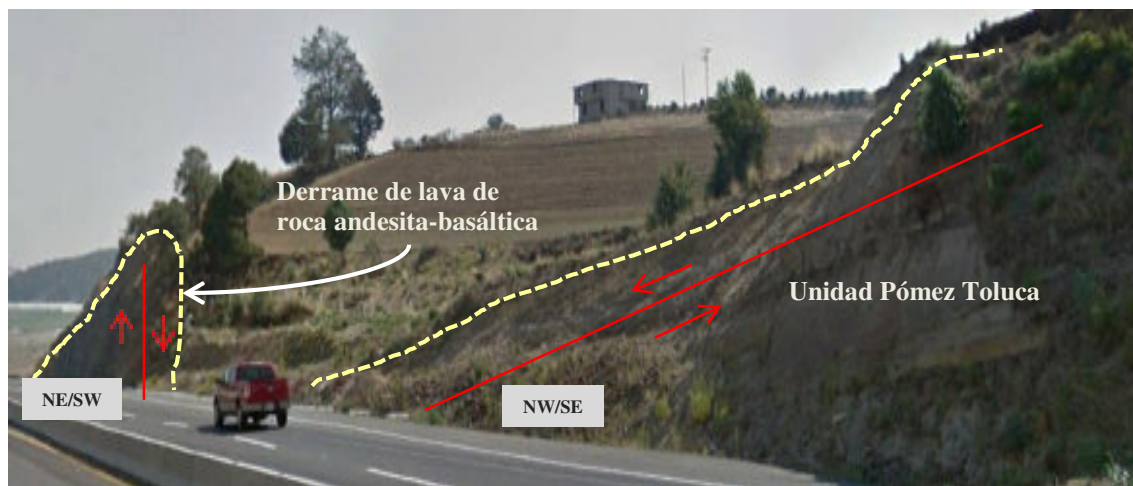


El SFT se correlaciona con el sistema de fallas La Pera (García-Palomo et al., 2000 y 2008; Norini et al., 2006), un sistema de fallas E-W con un movimiento normal ubicada en lado oriente del sistema de fallas Tenango (Delgado et al., 1997; Ferrari y Capra, 2001).

#### 4.2.2 Sistema de fallas Tlanixco

En este trabajo se propone nombrar como sistema de fallas Tlanixco (SFTL) al sistema de fallas que se ubican en la zona entre de las poblaciones San Pedro Tlanixco y Acatzingo, presentan una orientación principal N-S y NNE/SSW que varía de N5°E a N58°E con echados de 48° a 72° tanto al SE como al NW (ver mapa geológico- estructural en la Figura 4.21 y Anexo 2).

Las fallas son de tipo normal, tienen una longitud variable de 1 km a 7 km. Las fallas desplazan a las rocas de las andesitas Tecomatlán-San Simonito hacia oriente y hacia el poniente. En la parte norte las fallas son cubiertas por la unidad Pómez Toluca (ver mapa geológico-estructural en la Figura 4.21, Anexo 2 y Figura 4.23). En San Pedro Tlanixco se observan depresiones con orientación N-S que sugieren la presencia de grabenes estructurales que están rellenos de depósitos piroclásticos del Nevado de Toluca.

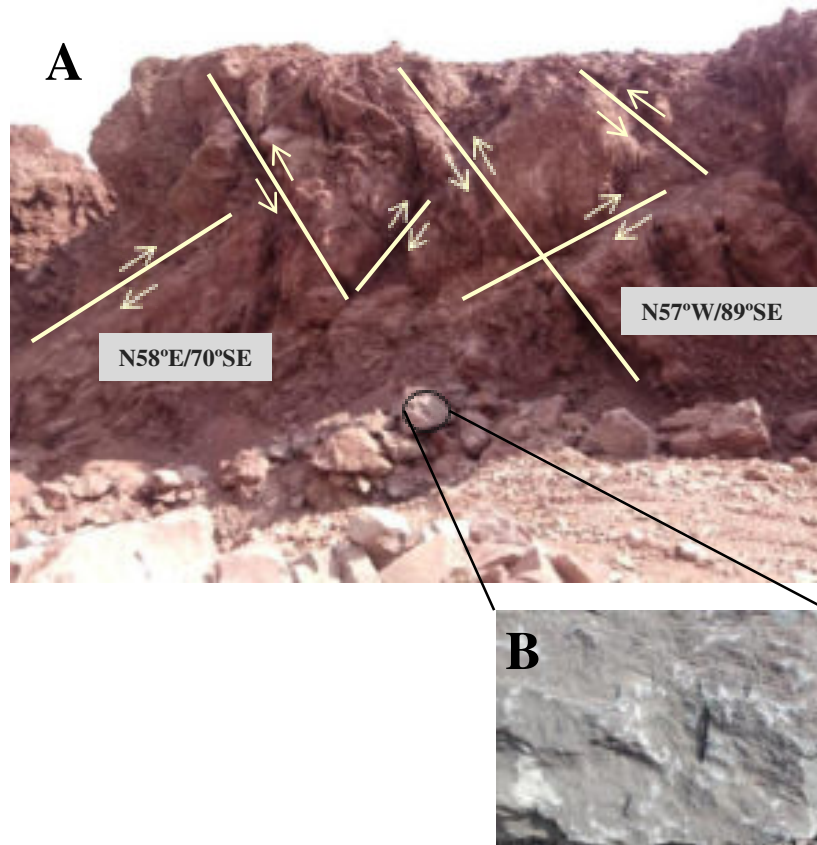


**Figura 4.23** Afloramiento ubicado en la parte este de la comunidad Acatzingo a un costado de la autopista Ixtapan de la Sal. Se encuentra depósitos de flujos de lava de roca andesita-basáltica correspondiente a las andesitas Tecomatlán-San Simonito a unos cuantos metros de la unidad Pómez Toluca.

En la comunidad de Acatzingo el SFTL se intersecta con fallas E-W y NW-SE del Sistema de Fallas Tenango (SFT) (ver mapa geológico- estructural en la Figura 4.21 y Anexo 2). En afloramientos se observan fallas normales con orientación NE-SW y NW-SE que cortan a depósitos de flujos de lava de roca andesita-basáltica correspondientes al Basalto Tenango y a la unidad andesitas Tecomatlán-San Simonito (Figura 4.24 y 4.25).



**Figura 4.24** Flujo de lava tipo bloques de roca andesita- basáltica perteneciente a la andesita Tecomatlán-San Simonito, presenta abundantes fracturas con orientación tanto al NE-SW como al NW-SE.



**Figura 4.25** Depósitos de flujo de lava tipo bloques de roca andesita-basáltico del Basalto Tenango. (A) Sistema de fallas Tenango (NW-SE) intersectando al sistema de fallas Tlanixco (NE-SW), forman arreglos de cizallamiento en X. (B) Las andesitas- basálticas de los bloques presentan indicadores cinemáticos tales como estrías, medias lunas y escalones que muestran el movimiento de los dos sistemas de fallas.

La edad del SFTL se puede considerar más antiguo en actividad de fallamiento que el sistema de fallas Tenango. Esto es soportado porque el SFTL una vez que desplazo a las andesitas Tecomatlán-San Simonito (ca.  $7,5 \pm 0,4$  Ma) hacia el norte y posteriormente el Sistema de fallas Tenango actuó sobre el SFTL. La presencia de flujos piroclásticos del Nevado de Toluca en grabenes en Tlanixco sugiere que ya existían estos grabenes durante posibles erupciones de 40, 000 años del Nevado de Toluca considerando que estos flujos piroclásticos sean cercanos a esa edad. Además, la intersección con el sistema de fallas Tenango pudo haber reactivado algunas fallas N-S y NW-SE y lo cual afectó a la unidad Basalto Tenango (ca.  $8,510 \pm 160$  años).

#### 4.2.3 Sistema de fallas Jajalpa

El sistema de fallas Jajalpa (SFJ) se ubica de la población Santa María Jajalpa hasta el Cerro Tenango y trazas de las fallas que lo forman se extienden desde la parte noreste del complejo de domos Cerro Tenango hasta las cercanías de Techuchulco de Allende, que está ubicado en la parte este de la Laguna Chignahuapan (ver mapa geológico-estructural en la Figura 4.21 y Anexo 2).

Las longitudes de las fallas y fracturas de este sistema van de 5 km y 6 km con orientaciones N34°E-S34°W y N39°E-S39°W; y echados de 70° y 80° tanto al SE como al NW (ver mapa geológico- estructural en la Figura 4.21 y Anexo 2).

Estas fallas desplazan a una parte del complejo de domos Cerro Tenango y complejo de domos Santa María Jajalpa, y a su vez las fallas son cubiertas por la secuencia fluvio- lacustre Chignahuapan después de Santa María.

A lo largo de la carretera libre que va de Santa María Jajalpa a Joquicingo y en las laderas de la parte noreste del Complejo de domos Santa María Jajalpa, se observaron inestabilidades de laderas con la presencia de derrumbes de bloques recientes (Figura 4.26), esto sugiere que las fallas normales NE-SW del SFJ están activas y que su actividad es en parte causa de estos derrumbes por lo que la edad de este sistema de fallas podría ser del Cuaternario. La zona de derrumbes aún está en tratamiento geotécnico por lo que se observó en campo, y versiones de los pobladores de Joquicingo y Santa María, mencionan que los derrumbes en esta área fueron más intensos durante el terremoto de septiembre de 2017 causando el cierre de la carretera.



**Figura 4.26** Fractura con orientación NE-SW con bloques rotados de roca andesítica del Complejo de domos Santa María Jajalpa.

#### 4.2.4 Sistema de fallas Tenancingo

El sistema de fallas Tenancingo (SFTN) se encuentra entre las poblaciones San Juan Xochiaca y Zepayautla hasta San Simonito (fuera del área de estudio), presenta longitudes mínimas de 2 km y 5 km con orientaciones que tiene cambios en su rumbo y que van de NW-SE, NE-SW y N-S (ver mapa geológico-estructural en la Figura 4.21 y Anexo 2). En Zepayautla el rumbo tiene una dirección al NW-SE y en San Juan Xochiaca la dirección del rumbo es NE-SW. Ambas orientaciones del sistema de fallas Tenancingo desplazan a depósitos de la unidad Andesitas Tecomatlán-San Simonito en una posible zona de relevo estructural del SFT y de acomodo del segmento de falla E-W de Zictepec y el segmento de falla E-W de Joquicingo, ambos segmentos desplazados por este sistema de fallas Tenancingo (SFTN).

Con base a las relaciones de campo se interpreta que este SFTN es más reciente que las andesitas Tecamatlán San Simonito del Mioceno-tardío porque corta a estas rocas andesíticas, pero las fallas de este sistema terminan con el segmento de falla E-W Joquicingo del Sistema de Fallas Tenango (SFT).

#### 4.2.5 Sistema de fallas de la Sierra de las Cruces

El sistema de fallas Sierra de las Cruces (SFSC) comprende fallas con orientaciones N-S, NE-SW y E-W, que han interactuado conjuntamente como fallas normales desde el Pleistoceno hasta el Reciente (García-Palomo et al., 2008). En el sector sur de la Sierra de Las Cruces de acuerdo con García-Palomo et al. (2008) predominan los morfolineamientos con dirección E-W, las cuales jugaron un papel importante en el emplazamiento del volcanismo monogenético Chichinautzin.

En esta investigación las fallas que se encontraron en el extremo este del área de estudio de este trabajo correspondientes a La Sierra de Las Cruces presentan longitudes mínimas que varían de 4 km a 6 km, con orientaciones preferenciales al NE-SW y E-W, se localizan entre los edificios volcánicos Zempoala y La Corona, así como en las laderas de la parte poniente del volcán Ajusco (ver mapa geológico-estructural en la Figura 4.21 y Anexo 2).

Entre los estratovolcanes Zempoala y La Corona una falla con rumbo NE-SW desplaza a depósitos de derrames de lava de gran extensión dirigidos hacia el sur propios del complejo volcánico Sierra de Las Cruces. Capra et al. (2002) y Macías (2006) proponen que el colapso del edificio volcánico Zempoala fue originado por la presencia de fallas E-W y NE-SW.

El Complejo Volcánico Sierra de Las Cruces (SC) varía en edad entre  $3.71 \pm 0.40$  Ma a  $0.39 \pm 0.16$  Ma de acuerdo a trabajos que tienen fechamientos radiométricos y que son citados en el trabajo de García-Palomo et al. (2008). En la parte sur de la SC los estratovolcanes La Corona y Zempoala se encuentran entre el Sistema de Fallas Tenango y la falla La Pera. Estos estratovolcanes son rodeados por rocas volcánicas del CVMCh que van en edades de 10 000 a 40 000 años y también otras rocas volcánicas de cerca 1.0 Ma (Arce et al., 2013). Estos datos sugieren que las fallas de la Sierra de Las Cruces pueden estar en el rango de tiempo de cerca 3.7 Ma a 1.0 Ma y que algunas pudieron ser activas y ser contemporáneas con algunos periodos de actividad del Sistema de Fallas Tenango.

En las laderas de la parte poniente del volcán Ajusco fallas con orientaciones NE-SW y E- W son cubiertas por extensos derrames de lava y domos de composición andesítico-dacítica (Gunn y Mooser, 1970), derivados del complejo volcánico Sierra de Las Cruces y el Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin.

#### 4.2.6 Lineamientos Chichinautzin

Los lineamientos Chichinautzin se encuentran en la porción oriental del área de estudio de este trabajo con longitudes mínimas que varían de 5 km a 13 km (ver mapa geológico-estructural de la Figura 4.21 y Anexo 2).

De acuerdo con Márquez et al. (1999) y con este trabajo, los lineamientos estructurales Chichinautzin tienden a controlar y alinear a estructuras volcánicas correspondientes al Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin (CVMCh) con una orientación preferencial E-W y N-S (ver mapa geológico-estructural en la Figura 4.21 y Anexo 2). Márquez et al. (1999) alude que también presentan orientaciones NE-SW y NW-SE subordinadas. Algunos lineamientos de este trabajo son los siguientes: volcán El Quilotzi- volcán Tehualtepec – Cerro La Pulga, Cerro Coaxusco-volcanes Cuates-Cerro Tilapa, volcán Negro-volcán La Silva-volcán Tecontó, volcán Santa Fe Mezapa-volcán Cuautl- volcán Negro y volcán Tepetzingo-Cerro La Doncella.

Tomando en consideración la tabla 4.1 de fechamientos radiométricos de Bloomfield (1975) y García-Palomo et al. (2002), que muestra edades para algunos de estos volcanes que componen los lineamientos de conos, entonces las fracturas o fallas E-W en donde se emplazaron estos volcanes tendrían que ser más antiguas a 40 000 o 38 000 años o casi contemporáneas con este vulcanismo, en algunos casos hay volcanes de edades de cerca 19,530 años y 8,440 años que podría sugerir que a lo largo de las fracturas y fallas E-W se fueron emplazando episódicamente los volcanes del CVMCh.

#### 4.2.7 Lineamiento Holotepec

El lineamiento Holotepec con orientación N-S presenta una longitud mínima cerca de 13 km y va desde el volcán El Tezontle hasta las cercanías con la población San Lorenzo Huehuetitlán (ver mapa geológico-estructural en la Figura 4.21 y Anexo 2).

El lineamiento Holotepec está sepultado por los depósitos del Volcán Tres Cruces (< 8440 años BP, Bloomfield, 1975) por lo que la edad de su actividad debe estar cercana o anterior a este tiempo. El lineamiento coincide con la terminación del segmento de falla Joquicingo del SFT lo que sugiere que puede existir otra zona de relevo estructural o escalonamiento de segmentos de fallas E-W del SFT que esta oculta por derrames lávicos del volcán Tepetzingo.

#### 4.2.8 Lineamientos Rayón

Los lineamientos Rayón se localizan entre las poblaciones de Calimaya y Santa María Rayón (ver mapa geológico-estructural de la Figura 4.21 y Anexo 2), parecen tener una asociación directa con los cursos de los ríos presentes en la zona.

Los lineamientos Rayón presentan una orientación E-W con una longitud mínima que varía de 3 km a 5 km, se encuentran cubiertos por depósitos de la unidad Pómez Toluca y la secuencia fluvio-lacustre Chignahuapan.

La edad de la actividad de este lineamiento se infiere pueda ser del Holoceno y por correlación en orientación E-W con las fracturas en la parte del CVMCh podrían ser cercanas a una edad de 40 000 años cuando inició su actividad, ya que Yamamoto y Mota (1988) reportaron y estudiaron un enjambre sísmico que ocurrió en esta región entre el 18 al 31 de agosto de 1980 con magnitudes de 2.6 a 3.5, interpretando la presencia de una falla subvertical sísmicamente a escala de la corteza y otras fallas de tipo normal escalonadas hacia el Norte. Esto mismo fue retomado por Campos-Enríquez et al. (2015) de la presencia de terremotos distribuidos en orientación E-W por debajo de los sedimentos fluvio-lacustres de Chignahuapan y que hoy día continúan ocurriendo ya que en agosto-septiembre de 2018 fueron percibidos por las comunidades de Rayón, Calimaya, Tenango y San Antonio La Isla (Sol de Toluca, 2018).



#### 4.2.9 Lineamiento Santiaguito

El lineamiento Santiaguito se encuentra entre la población Santiaguito Coaxuxtenco y la comunidad San Juan la Isla (ver mapa geológico-estructural de la Figura 4.21 y Anexo 2), se ve reflejado en el curso del río Santiaguito, ya que este río presenta una orientación E-W y una longitud mínima de 5 km. A lo largo de este lineamiento hay registros de lahares como se describió en la estratigrafía de este trabajo y también se dan crecientes de agua de acuerdo a versiones de los pobladores.

La edad de actividad de este lineamiento se infiere que pueda ser del Holoceno ya que esta edad se consideró para la unidad depósitos fluviales del Río Santiaguito discutida en la parte de estratigrafía y que estos depósitos son controlados por el valle fluvial que a su vez sigue este lineamiento estructural.

## **CAPITULO 5.**

### **Resultados: Peligros geológicos**

De acuerdo a la publicación de CENAPRED “Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (2006)” el peligro geológico se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado, comprendiendo de tal manera los siguientes fenómenos geológicos: sismicidad, erupción volcánica, tsunamis, inestabilidad de laderas, derrumbes, hundimientos, subsidencia y colapsos, agrietamientos, erosión del suelo, etc.

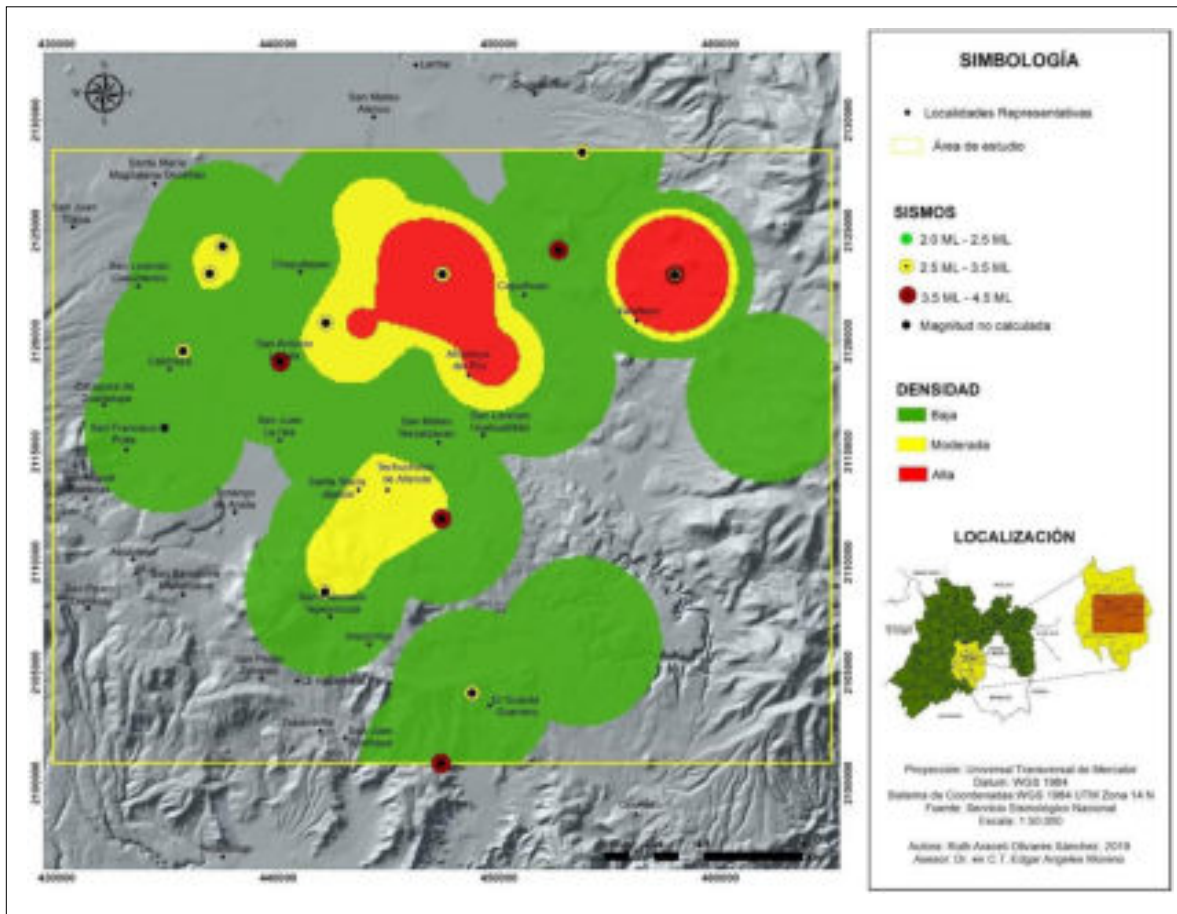
En este capítulo se analizarán los peligros geológicos por sismicidad y vulcanismo identificados a lo largo de las fallas Tenango. Y algunos peligros de derrumbes o deslizamientos relacionados con la presencia de fallas.

#### **5.1 Sismicidad**

La sismicidad puede ser expresada como la distribución de los terremotos en el espacio, en el tiempo y/o por el tamaño (Martínez, 2003). El registro de sismicidad compilado para la zona de estudio permitió elaborar un mapa de peligro por sismicidad (ver mapa de peligro por sismicidad en la Figura 5.1 y Anexo 3).

Para su elaboración se utilizó el registro de sismos históricos publicado por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) comprendiendo desde el año 1912 hasta noviembre del 2019. La herramienta “Kernel Density” del software ArcGIS 10.5 se utilizó para identificar las zonas dentro del área de estudio de este trabajo con mayor concentración de eventos sísmicos que ocurrieron en el pasado.

Boschini y Montero (1994) aluden que el estudio de los sismos históricos es a menudo un punto básico para las estimaciones de riesgo sísmico en cualquier área de investigación. Es una herramienta que complementa la evaluación de la amenaza sísmica aportando datos del pasado sustanciales para el conocimiento de la sismicidad actual y, sus efectos en bienes y población (Rodríguez y Audemard 2003).



**Figura 5.1** Mapa de peligro por sismicidad.

Históricamente en el área de estudio de este trabajo se han registrado 48 eventos sísmicos con magnitudes (ML) que oscilan de 1.2 a 6.9 y profundidades de los focos sísmicos que varían entre 1 kilómetro a 15 kilómetros. El mayor porcentaje de eventos ocurridos dentro del área de estudio de este trabajo se concentra y coincide con la unidad de la secuencia fluvio-lacustre Chignahuapan descrita anteriormente en el apartado de estratigrafía en el capítulo 4 (ver mapa geológico del área de estudio en la Figura 4.1 y mapa de peligro por sismicidad en la Figura 5.1), los cuales se produjeron durante 1980 en el mes de agosto, presentando una magnitud (ML) que varía de 2 a 4.5 y una profundidad que oscila entre 3 kilómetros a 8 kilómetros.

Las características estratigráficas de la Secuencia fluvio-lacustre Chignahuapan y algunos depósitos piroclásticos del Volcán Nevado de Toluca (VNT) que pueden estar intercalados con los sedimentos, ha contribuido en gran medida a la entrada de materiales volcánicos durante los últimos 50 000 a una cuenca sedimentaria en donde coincide con Alto Río Lerma, alternando sedimentos lacustres masivos y depósitos piroclásticos y epiclásticos no consolidados (Newton y Metcalfe, 1999; Caballero et al., 2001). El que haya coincidencia de mayor cantidad de eventos sísmicos con la estratigrafía determinada por la secuencia fluvio-lacustre implicaría primero un peligro sísmico y después un riesgo sísmico determinado por la presencia de sedimentos en capas intercalados con depósitos piroclásticos en donde las ondas sísmicas tendrían amplitudes mayores y un comportamiento de movimientos más caóticos lo que provocaría daños a los poblados en los diferentes municipios y más aún porque las zonas habitacionales están creciendo horizontalmente.

Algunos eventos sísmicos de densidad de moderada a alta que es mostrada en el mapa de peligro por sismicidad (ver mapa de peligro por sismicidad en la figura 5.1 y Anexo 3) han sido los siguientes y que confirman los resultados espaciales además de que la zona está activa sísmicamente hablando (zona de peligro sísmico, expresado en el mapa):

De acuerdo con el SSN el 30 de julio del 2018 se registró un sismo con epicentro ubicado a 7 kilómetros al noreste de Tenango del Valle, presento una magnitud (ML) de 2.9 y una profundidad de 3 kilómetros. El movimiento fue perceptible en las localidades de San Lucas Tepemajalco, San Juan la Isla y en Calimaya, por lo que las autoridades hicieron la inspección correspondiente en distintas zonas e informaron que no hubo daños materiales (El Informante, 2018).

El 1 de agosto del 2018 un segundo sismo con epicentro de 5 kilómetros al noreste de Tenango del Valle fue registrado por el SSN, presento una magnitud (ML) de 2.5 y una profundidad del foco sísmico de 5 kilómetros.

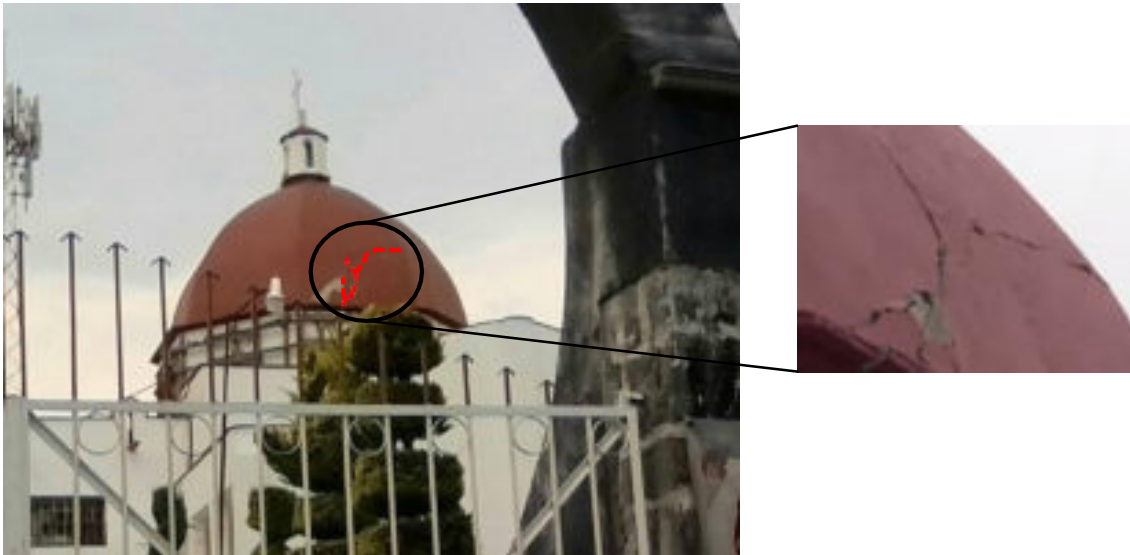
Un tercer sismo con epicentro de 8 kilómetros al noreste del Valle de Tenango ocurrió el 3 de agosto del 2018, presento una magnitud (ML) de 3.1 y una profundidad de 7 kilómetros. El movimiento fue perceptible en los municipios de Rayón, San Antonio La Isla, Calimaya y Tenango del Valle, sin embargo, autoridades no reportaron daños materiales y personas lesionadas (El Sol de Toluca, 2018).

Un sismo trae como consecuencia efectos colaterales, tales como el sacudimiento del terreno, fallamiento en superficie, deslizamientos de tierra, licuefacción, entre otros fenómenos geológicos. Sin embargo, el tamaño y localización de estos efectos colaterales dependerán en gran medida de diversos factores, principalmente de las características geológicas y geotécnicas del lugar, así como también las características del terremoto, como pueden ser: hipocentro, mecanismo, intensidad, magnitud, duración, etc. (De la Colina y Ramírez, 1999).

En el área de estudio de este trabajo, se encontró un caso de relación de fallas geológicas con derrumbes y problemas geotécnicos. Esta parte ocurre a lo largo de la carretera libre que va de Santa María Jajalpa a Joquicingo y en las laderas de la parte noreste del Complejo de domos Santa María Jajalpa (ver mapa geológico del área de estudio en la Figura 4.1 y Anexo 1), se observaron inestabilidades de laderas con la presencia de derrumbes de bloques recientes (Figura 5.2) asociados a fallas normales con orientación NE-SW del sistema de fallas Jajalpa, descritos anteriormente en el capítulo de geología- estructural. Se presentan brechas de falla y depósitos de talud asociados a las fallas NE-SW con depósitos piroclásticos de caída que cubren los anteriores depósitos de gravedad y las brechas de falla. No se puede determinar si la falla presenta actividad sísmica, pero en el sismo de septiembre de 2017 se activaron derrumbes en esa área de la carretera y permaneció cerrada esta carretera.

Otro caso y evidencias de efectos sísmicos en construcciones de los poblados dentro del área de estudio y que coinciden con las zonas de peligro sísmico de este trabajo (ver mapa de peligro por sismicidad en la figura 5.1 y Anexo 3) es que en la población de Joquicingo se identificaron una complejidad de fracturas en las paredes de casas e iglesias (Figura 5.3) que están orientadas de manera paralela al rumbo de la falla Tenango. De acuerdo con el profesor-investigador Edgar Ángeles Moreno de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx), durante el sismo del 17 de septiembre del 2017 se activaron varias fallas en poblaciones tales como, Tenancingo, Tenango y Amecameca (Sol de Toluca, 2018), provocando daños en las construcciones de los poblados como Tecomatlán, Ocuilan, Joquicingo, San Simón el Alto, etc. (Sol de Toluca, 2018).

En la carretera que va de Joquicingo a Santa Cruz Tezontepec y en donde se encuentra la traza de la falla Tenango se observan algunas grietas en la carretera, pero muchas de estas fracturas están cubiertas por depósitos piroclásticos de caída. En el bloque del bajo y pasando el escarpe aparecen fracturas E-W, pero no son las principales, ya que las fallas y fracturas al frente del escarpe están cubiertas.



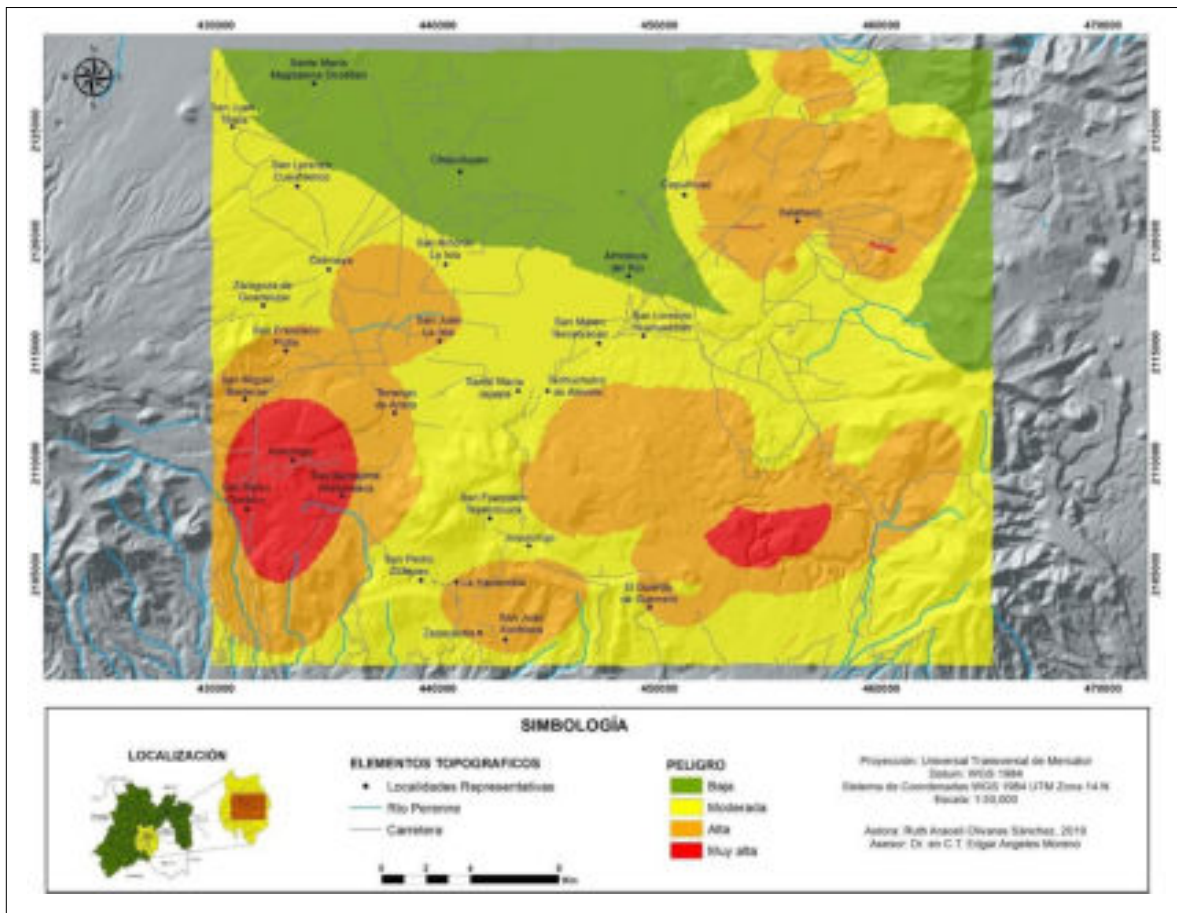
**Figura 5.3** Fracturamiento en la iglesia “El Calvario” de la población Joquicingo, la fractura (línea segmentada) está orientada NW-SE.

En este trabajo se coincide con las observaciones de Caballero et al (2001) en que la actividad del sistema de fallas Tenango constituye un importante peligro sísmico en la cuenca del Alto-Lerma. Varias poblaciones están ubicadas dentro de esta cuenca y son particularmente vulnerables al riesgo sísmico debido a sus estratos subyacentes que consisten en depósitos lacustres y volcanoclasticos no consolidados (Caballero et al., 2001).

## 5.2 Vulcanismo

Fournier d'Albe (1979) define al peligro volcánico como la probabilidad de que alguna manifestación volcánica específica (caída de cenizas, gases volcánicos, proyección balística, flujos piroclásticos, lahares y coladas de lava) pueda presentarse en un área o región particular del entorno del volcán en un intervalo de tiempo dado.

En este trabajo se elaboró un mapa de peligro por vulcanismo (Figura 5.4 y Anexo 4) identificando las zonas donde probablemente se podría manifestar actividad volcánica futura, pues siempre existirá la posibilidad de que un volcán aparezca en cualquier sitio de un campo monogenético (CENAPRED, 2015).



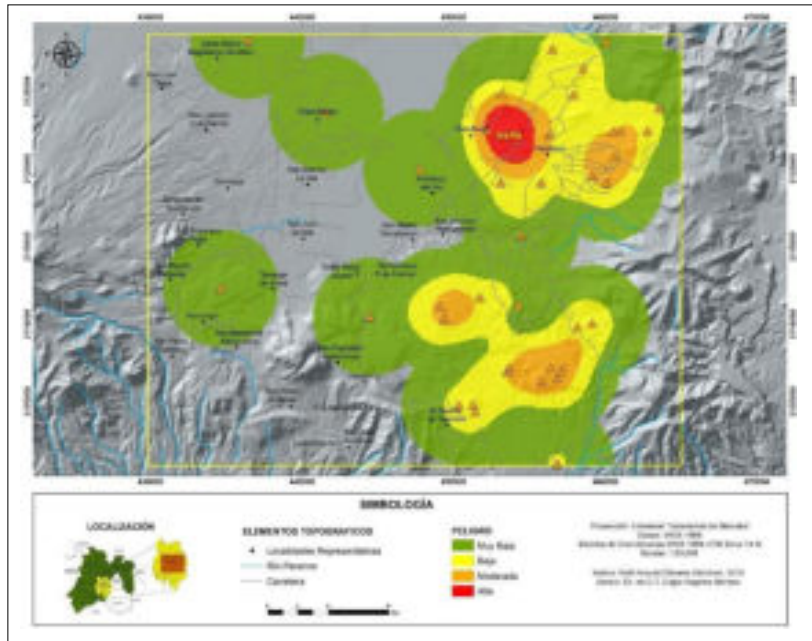
**Figura 5.4** Mapa de peligro por vulcanismo.

Para la elaboración del mapa de peligro por vulcanismo, mostrado en la figura 5.4 y Anexo 4, se tomó como base la evolución espacio-temporal que ha tenido el sector occidental del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin.

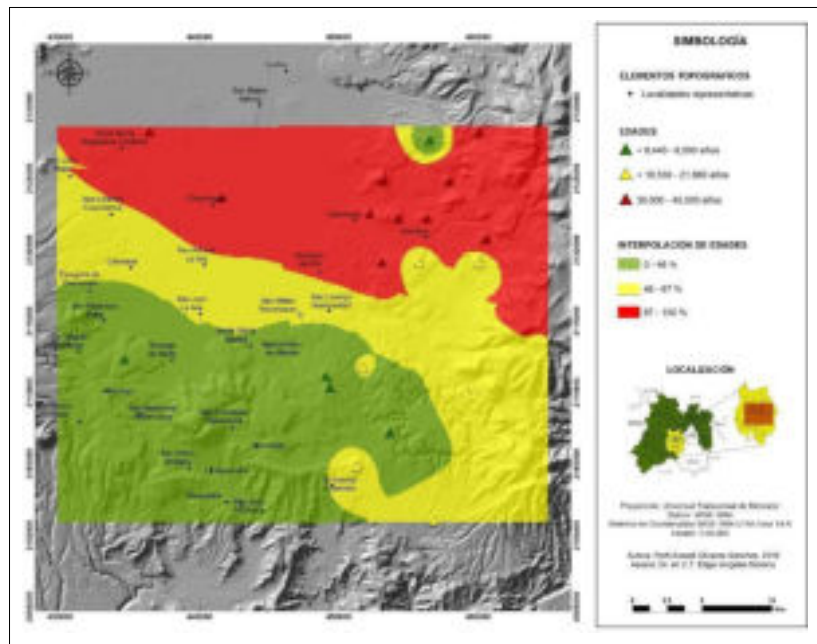
Se conjuntaron capas de información geológica en el software ArcGIS 10.5, dando como resultado la existencia de zonas en las que se observa la intersección de al menos tres variables, es decir; la existencia de cantidad de estructuras volcánicas (densidad de estructuras volcánicas), presencia de fallas geológicas y estructuras volcánicas jóvenes (Figuras: 5.5, 5.6 y 5.7, y Anexos: 5, 6 y 7).

Le Corvec *et al.* (2013) demostraron que la mayoría de los campos volcánicos muestran una distribución agrupada de sus centros eruptivos. Esto podría indicar que los mecanismos de generación de magma son similares a los que controlan su propagación a través de la litósfera. Las erupciones volcánicas pueden requerir vías hidráulicamente abiertas que permitan que los magmas se muevan hacia arriba, desde el manto a la superficie. En la zona de estudio de esta manera existe una relación entre vulcanismo y fallamiento, pero también de sismicidad activa. Una mejor permeabilidad de la corteza puede darse a través de fracturas; procesos de fracturamiento de roca permiten el ascenso de magma. Se ha identificado una fuerte correlación entre las fracturas y las alineaciones de los centros eruptivos en los campos volcánicos activos (Mazzarini et al., 2010).

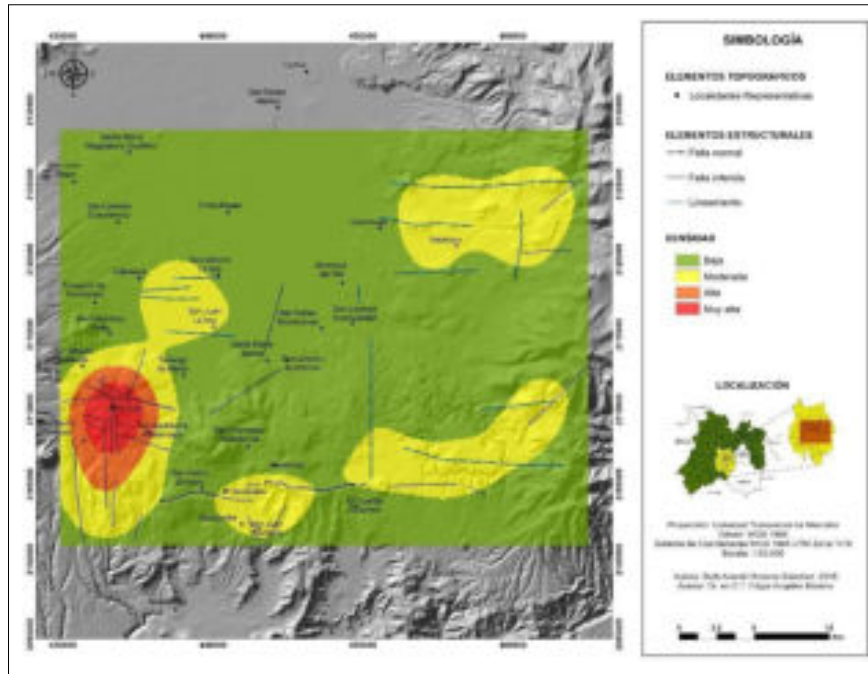




**Figura 5.5** Mapa de densidad de estructuras volcánicas del Campo Volcánico Chichinautzin Occidental.



**Figura 5.6** Mapa de interpolación de edades de las estructuras volcánicas del Campo Monogenético Chichinautzin.



**Figura 5.7** Mapa de densidad de fallas y lineamientos correspondiente al área de estudio de este trabajo.

La mayor concentración de estructuras volcánicas se encuentra entre los municipios de Capulhuac y Xalatlaco (Figura 5.5), en donde se localizan los volcanes más antiguos, tales como El Quilotzi, Coaxusco, Tilapa, San Fe Mezapa y Los cuates con una edad mayor a 10,000 años y con una alta concentración de sismos durante el año de 1980 (ver mapa de peligro por sismicidad en el Figura 5.1 y Anexo 3). Tales volcanes se encuentran alineados en una dirección E-W y N-S, en el apartado de geología estructural del capítulo 4 capítulo se describieron algunas características de estos lineamientos correspondientes a los del Chichinautzin.

Por lo contrario, existe una baja concentración en número de estructuras volcánicas, desde el punto de cantidad (Figuras 5.5 y 5.6), entre las poblaciones de Tenango, Joquicingo y Ocuilan. Sin embargo, aparecen las estructuras volcánicas más recientes (<10,000 años) como, por ejemplo, la lava fisural basáltico-andesítica del Basalto Tenango extruida aproximadamente hace 8,500 años B.P (Bloomfield, 1973) y el Volcán Tres Cruces fechado alrededor de los 8440 años BP (Bloomfield, 1975), por mencionar algunos.

Así mismo, en los municipios de Tenango del Valle, Calimaya, San Antonio La Isla y Santa María Rayón se encuentran una alta concentración de fallas normales activas correspondientes al Sistema de Fallas Tenango y Sistema de Fallas Tlanixco descritas en el apartado de geología estructural del capítulo 4. Realizando un mapa de concentración de fracturas y fallas (Figura 5.7) a partir de los datos geológico-estructurales obtenidos en este trabajo, se puede observar que la mayor densidad (cantidad fracturas) ocurre en la zona de Tenango del Valle, esto podría explicar la presencia de vulcanismo joven como el Basalto Tenango por la alta permeabilidad determinada por la cantidad de fracturas presentes.

Tomando en consideración los mapas de concentración (densidad) para centros volcánicos, densidad de fracturas, y edad de las estructuras volcánicas determinados en este trabajo, se determinó que la mayor probabilidad de aparición de un nuevo evento volcánico a futuro se encuentra entre los municipios de Tenango del Valle, Calimaya, Santa María Rayón y San Antonio La Isla (ver mapa de peligro por vulcanismo en la Figura 5.4 y Anexo 4), pues además el análisis del peligro por sismicidad en el apartado anterior de este capítulo menciona que en los mismos municipios han ocurrido los sismos más recientes, sin embargo relacionados a vulcanismo necesitaría más datos especializados y más profundos en cuanto a sismicidad, geofísica del subsuelo, geología del subsuelo, etc.

## **CAPITULO 6. Conclusiones**

En este trabajo se definieron y describieron varias unidades informales con base en la geología de campo y análisis de la estratigrafía, así como se identificaron unidades formales de manejadas en trabajos de investigación de la zona. Las unidades que se describieron son: andesitas Tecamatlán-San Simonito, Complejo Volcánico de Sierra de Las Cruces, Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin, domos volcánicos de andesita, flujos piroclásticos de Calimaya, complejo de domos Cerro Tenango, unidad Cerro Muntepec, complejo de domos Santa María Jajalpa, domos Joquicingo, unidad Acatzingo, Pómez Toluca, Basalto Tenango, secuencia fluvio-lacustre Chignahuapan y depósitos fluviales Río Santiaguito.

Con base a la cartografía geológico-estructural presentada por primera vez en este trabajo, se definieron varios conjuntos y sistemas de fallas, fracturas y lineamientos estructurales, denominados: Sistema de Fallas Tenango (E-W), sistema de fallas Tlanixco (N-S), sistemas de fallas Jajalpa (NE-SW), sistema de fallas Tenancingo con orientación NW-SE y NE-SW, sistema de fallas de la Sierra las Cruces con orientaciones preferenciales al NE-SW y E-W, lineamiento Chichinautzin (E-W), lineamiento Holotepec (N-S), lineamiento Santiaguito (E-W) y lineamiento Rayón (E-W).

La actividad del sistema de fallas Tenango en sus varios segmentos ha ocurrido en diferentes periodos de tiempo geológico, pudiendo ser consistente durante el Pleistoceno- tardío Holoceno.

En la zona de las fallas Tenango es mayor la cantidad de estructuras volcánicas de tipo domos volcánicos andesíticos y sus derrames correspondientes, lo que significa que el vulcanismo estuvo controlado estructuralmente por las fallas Tenango. Además, el movimiento de las fallas Tenango en relación con la actividad sísmica de septiembre de 2017 ha reactivado algunas otras fallas antiguas afectando principalmente a las andesitas Tecamatlán San-Simonito del Mioceno-tardío y al Basalto Tenango.

La actividad del sistema de fallas Tenango trae consigo sismicidad asociada que de acuerdo al análisis del peligro por sismicidad se ha registrado recientemente sismos que se concentran en sedimentos con capas intercaladas con depósitos piroclásticos en donde las ondas sísmicas tendrían amplitudes mayores y un comportamiento de movimientos más caóticos lo que implicaría un riesgo sísmico para los poblados en los municipios de Tenango del Valle, Calimaya, Santa María Rayón y San Antonio La Isla provocando daños socio-económicos.

De acuerdo con el análisis del peligro por vulcanismo se recomienda realizar más estudios especializados en cuanto a sismicidad, geofísica del subsuelo, geología del subsuelo, etc.

## REFERENCIAS

- Alaniz-Álvarez, S. A. y Nieto-Samaniego, A. F. (2005). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57, 65–82.
- Arce, J. L., Macías, J. L. and Vázquez-Selem, L. (2003). The 10.5 ka Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, Mexico: Stratigraphy and hazard implications. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 115, 230 – 248.
- Arce, J. L., Layer, P. W., Lassiter, J. C., Benowitz, J. A., Macías, J. L., Ramírez-Espinosa, J. (2013)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating, geochemistry, and isotopic analysis of the quaternary Chichinautzin volcanic field, south of Mexico City: implications for timing, eruption and distribution of volcanism. *Bulletin of Volcanology*, 75. doi: 10.1007/s00445-013-0774-6.
- Asensi, V. y Parra, A. (2002). El método científico y la nueva filosofía de la ciencia. *Anales de Documentación*, 5, 9-19.
- Bell, F.G. (1999). Geological Hazards. Their assessment, avoidance and mitigation. Taylor and Francis.
- Bloomfield, K. (1973). The Age and Significance of the Tenango Basalt, Central México. *Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 586- 595
- Bloomfield, K. and Valastro, S. (1974). Late Pleistocene Eruptive History of Nevado de Toluca Volcano, Central México. *Geological Society of American Bulletin*, 85, 901-906.
- Bloomfield, K. (1975). A late Quaternary monogenetic volcano field in central Mexico. *Geologische Rundschau*, 6, 476-497.
- Boschini, I. M. and Montero, W. (1994). Sismicidad Histórica e Instrumental del Caribe de Costa Rica. *Revista geológica de América Central*, 62-75.

- Caballero, M., Macías, J. L., Lozano-García, S., Urrutia-Fucugauchi, J. and Castañeda-Bernal, R. (2001). Late Pleistocene – Holocene volcanic stratigraphy and paleoenvironments of the upper Lerma basin, Mexico. *Spec. Publ. Int. Assoc. Sedimentol.*, 30, 247–261.
- Campos-Enríquez, J. O., Lermo-Samaniego, J. F., Antayhua-Vera, Y. T., Chavacán, M. and Ramón-Márquez V. M. (2015). The Aztlán Fault System: control on the emplacement of the Chichinautzin Range volcanism, southern Mexico Basin, Mexico. Seismic and gravity characterization. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67 (2), 315- 335.
- Cantagrel, J. M., Robin, C. and Vincent, P. (1981). Les grandes etapes d'évolution d'un volcán andesítico composite: Exemple du Nevado de Toluca. *Bulletin Volcanologique*, 44, 177- 188.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2006). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: Conceptos Básicos sobre Peligros, Riesgos y su Representación Geográfica. Recuperado de <http://www.cenapred.gob.mx/>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2015). Zonificación de Campos Volcánicos Monogenéticos para la identificación de los peligros asociados, Parte II: Metodología para la evaluación de zonas susceptibles a presentar vulcanismo. Recuperado de <http://www.cenapred.gob.mx/>
- D' Antonio, M. (2008). Reconstrucción de los eventos eruptivos de hace ~28 y ~13 ka asociados al emplazamiento de flujos de bloques y ceniza en el Volcán Nevado de Toluca (México) (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- De la Colina, J. y Ramírez, H. (1999). Características de los sismos y sus efectos en las construcciones (segunda parte). *Ciencia, ergo-sum*, 6 (2), 169.174.

- Delgado-Granados, H., Nieto-Obregón, J., Lermo-Samaniego, J., Silva-Romo, G., Mendoza-Rosales, C. C. and Campos-Enríquez, J.O. (1997). La Pera Fault System; a major active structure in Central Mexico, in American Geophysical Union: San Francisco, California, USA. *Fall Meeting Supplement* 78 (46), F823.
- Delgado-Granados, H. y Villalpando-Cortés, R. E. (2008). Método para pronosticar la localización de un nuevo volcán al sur de la Ciudad de México. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 11(1), 5-16.
- Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista Universidad Nacional Autónoma, Instituto de Geología* 2 (2), 172 – 187.
- Echeveste, H. (2018). *Manual de levantamiento geológico: Una introducción a la geología de campo*. Buenos Aires, Argentina. Edulp.
- El Informante (01 de agosto de 2018). Sismos registran epicentro en el Edomex, en Naucalpan y Tenango del Valle los más recientes. *El Informante*. Recuperado de <http://elinformante.mx/?p=11178>
- El Sol de Toluca (04 de agosto de 2018). Falla geológica, causa de los microsismos. *El Sol de Toluca*. Recuperado de <https://www.pressreader.com/>
- Ferrari, L., Garduño, V. H., Pasquaré, G. and Tibaldi, A. (1991). The Los Azufres caldera, Mexico, and its relations with regional tectonics. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 47, 129 – 148.
- Ferrari, L., Garduño, V.H., Pasquaré, G., and Tibaldi, A. (1994). Volcanic and tectonic evolution of central Mexico: Oligocene to Present. *Geofísica Internacional*, 33, 91–105.
- Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C. M. and Manetti, P. (2000). Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 318, 161-185.



- Ferrari, L. and Capra, L. (2001). Quaternary normal faulting south of Mexico City and its role in controlling Holocene monogenetic volcanic activity and sector collapse of stratovolcanoes, paper presented at First International Workshop on Effects of Basement Structural and Stratigraphic Heritages on Volcano Behavior and Implications for Human Activities, IGCP Proj. 455, UNESCO-IUGS-IGCP, Milan, Italy, 9 – 10 July.
- Frías, C. (1960). Geología del estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero. *Boletín del Instituto de Geología*, 60, 236 pp.
- Fournier d'Albe, E. M. (1979). Objectives of volcanic monitoring and prediction. *Journal of the Geological Society of London*, 136, 312-326.
- Galban, L., Chuy, T. y Vidaud, I. (2012). *La gestión de riesgos geológicos*. Saarbrücken, Alemania: Académica Española
- García-Palomo, A. (1998). Evolución estructural en las inmediaciones del Volcán Nevado de Toluca, Estado de México (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Garduño, V.H. (2000). Miocene to Recent structural evolution of Nevado de Toluca Volcano Región, Central México. *Tectonophysics*, 318, 218-302.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Capra, L., Garduño, V. H. and Espíndola, J.M. (2002). Geology of Nevado de Toluca volcano and surroundings areas, Central México. *Geological Society of America Map and Chart Series MCH089*, 1-26.
- García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R. y Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25 (1), 158-178.
- Guerra F. (2003). Las doce principales reglas de la interpretación fotogeológica y las bases fundamentales de que se derivan. *Boletín del Instituto de Geografía*, 50, 42-66.

- Gunn, B. M., Mooser, F. (1970). Geochemistry of the volcanics of Central Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 34, 577-616.
- Johnson, C. A., and Harrison, C. G. A. (1990). Neotectonics in central Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64, 187 – 210.
- Keller, E. (1988). *Environmental Geology*. Columbus, USA.
- Langridge, R. M., Weldon, R. J., Moya, J. C. and Suárez, G. (2000). Paleoseismology of the 1912 Acambay earthquake and the Acambay Tixmadejé fault, Trans-Mexican Volcanic Belt. *J. Geophys. Res.*, 105, 3019-3037.
- Le Corvec, N. Bernhard, K., Rowland, J. and Lindsay, J. (2013). Spatial distribution and alignments of volcanic centers: Clues to the formation of monogenetic volcanic fields. *Earth Science Reviews*, 124, 96-114.
- Macías, J. L., Garcia, P. A., Arce, J. L., Siebe, C., Espíndola, J. M., Komorowski, J. C. and Scott, K. (1997). Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlan volcanoes, central Mexico, in Link, P.K., and Kowallis, B.J., eds., Proterozoic to Recent stratigraphy, tectonics, and volcanology: Utah, Nevada, southern Idaho, and central Mexico: Brigham Young University, Geology Studies, v. 42, part I, p. 493–528.
- Macías, V. R. (2006) *Avalancha de escombros del volcán Zempoala (Tesis de pregrado)*. Universidad Autónoma de Guerrero, Taxco-Guerrero.
- Mazzarini F., Ferrari L., Isola I. (2010). Self-similar clustering of cinder cones and crust thickness in the Michoacán-Guanajuato and sierra Chichinautzin volcanic fields, Trans- Mexica volcanic belt. *Tectonophysics* 486, 55-64.
- Martin del Pozzo, A. L. (1982). Monogenetic vulcanism in the Sierra Chichinautzin, México. *Bulletin Volcanologique*, 45, 9–24.
- Márquez, A., Verma, S. P., Anguita, F., Oyarzun, R. and Brandle, J. L. (1999). Tectonics and volcanism of Sierra Chichinautzin: Extension at the front of the central Trans-Mexican Volcanic belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 93 (1), 125 – 150.

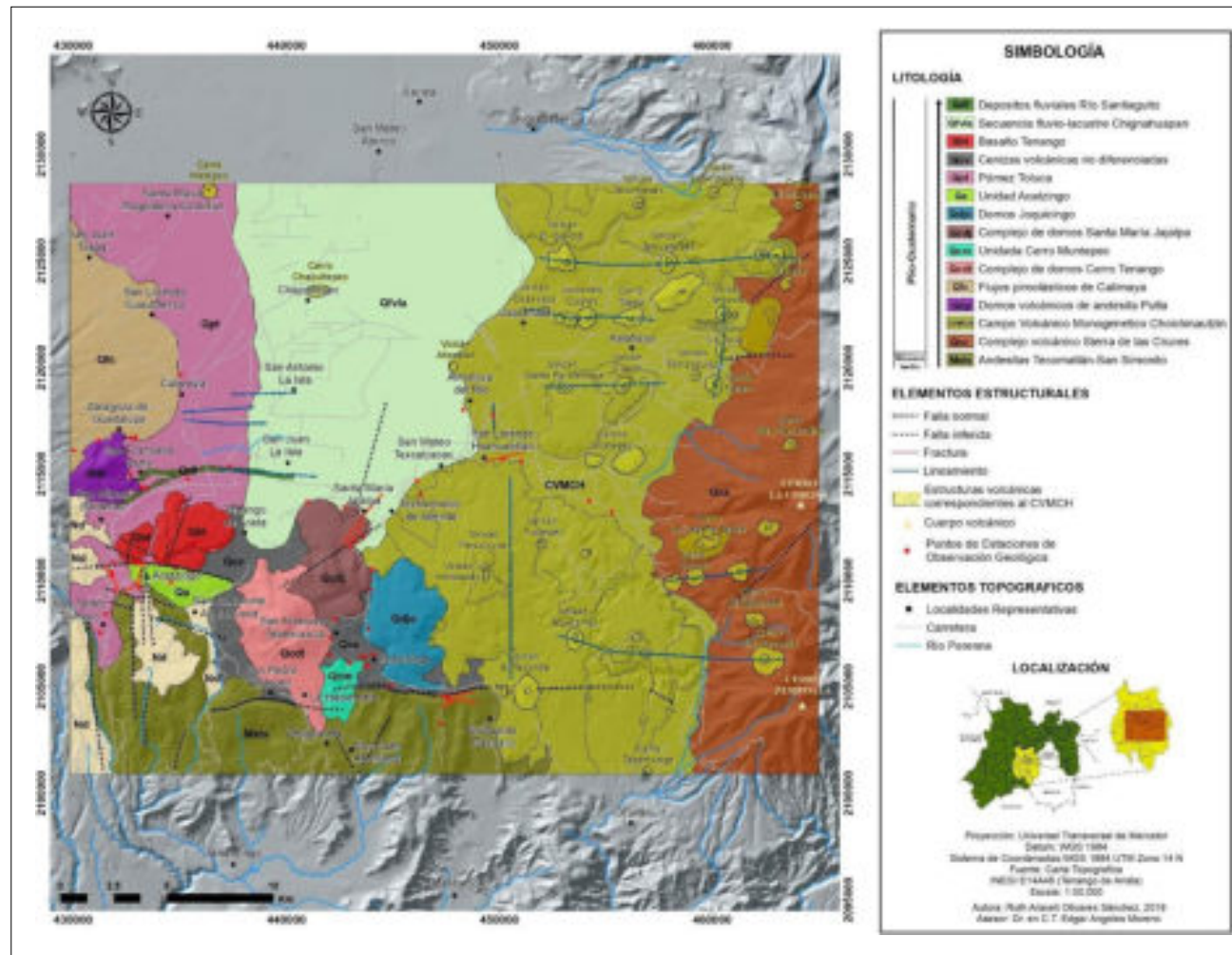
- Martínez, J. M. (2003). Sismicidad Histórica de la Península Ibérica. *Física de la Tierra*, 15, 13-28.
- Metcalf, S. E., Street-Perrott, F. A., Perrott, R. A., & Harkness, D. D. (1991). Palaeolimnology of the Upper Lerma basin, Central Mexico: a record of climatic change and anthropogenic disturbance since 11,600 yr BP. *Journal of Paleolimnology*, 5, 197-218.
- Newton, A. J. and Metcalfe, S. E. (1999). Tephrochronology of the Toluca Basin, central Mexico. *Quaternary Science Reviews*, 18, 1039-1059.
- Nixon, G. T., Demant, A., Armstrong, R. L. and Harakal, J. E. (1987). K-Ar and geologic data bearing on the age and evolution of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofís. Int.*, 26, 109 – 158.
- Norini, G., Gropelli, G., Lagmay, A. M. F. and Capra, L. (2006). Recent left-oblique slip faulting in the central eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: Seismic hazard and geodynamic implications. *Tectonics*, 25, 1-21. doi: 10.1029/2005TC00187
- Norini, G., Capra, L., Gropelli, G. y Lagmay, A.M.F. (2008). Quaternary sector collapses of Nevado de Toluca volcano (Mexico) governed by regional tectonics and volcanic evolution. *Geosphere*, 4, 854-871. doi: 10.1130/GES00165.1
- Osete, M. J., Ruiz, V. C., Caballero, C., Galindo, C., Urrutia, J. and Tarling, D.H. (2000). Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, Mexico: paleomagnetic and radiometric evidence. *Tectonophysics*, 318, 201–215.
- Pasquaré, G., Vezzoli, L. and Zanchi, A. (1987). Morphological and structural model of Mexican volcanic belt. *Geofísica Internacional*, 26, 159-176.
- Pasquaré, G., Garduño, V. H., Tibaldi, A. and Ferrari, L. (1988). Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 146, 353 – 364.
- Ramírez-Herrera, M. T. (1998). Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay graben, Mexican volcanic belt, Earth Surf. *Processes Landforms*, 23, 317 – 332.

- Ramírez, F. H. y Zwerg, A. M. (2012). Metodología de la investigación: más que una receta. *AD-minister*, 20, 91-111.
- Rodríguez, J. A. y Audemard, F. A. (2001). Sobrestimaciones y limitaciones en los estudios de sismicidad histórica con base en casos venezolanos. *Revista Geográfica Venezolana*, 44(1), 47-75.
- Rodríguez, S. (2011). *Peligros geológicos más frecuentes en el Estado de Veracruz*. Xalapa, Ver., México.
- Suter, M., Quintero, O. and Johnson, C. A. (1992). Active faults and state of stress in the central part of the Trans-Mexican volcanic belt: 1. The Venta de Bravo fault. *J. Geophys. Res.*, 97 (11), 983 – 11,994.
- Suter, M., Quintero-Legorreta, O., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G. and Farrar, E. (1995a). The Acambay graben-Active intra-arc extension in the TransMexican Volcanic Belt, Mexico. *Tectonics*, 14, 1245 – 1262.
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M., López-Martínez, M. and Farrar, E. (1995b). The Aljibes half-graben-Active extension at the boundary between the TransMexican Volcanic Belt and the Basin and Range Province, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107, 627 – 641.
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M. and Quintero-Legorreta, O. (1996). Macroseismic study of shallow earthquakes in the central and eastern parts of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 86, 1952 – 1963.
- Suter, M., López-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O. and Carrillo Martínez, M. (2001). Quaternary intra-arc extension in the central Trans-Mexican volcanic belt. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 113, 693 – 703.
- Szykaruk, E., Garduño-Monroy, V. H. and Bocco, G. (2004). Active fault systems and tectono-topographic configuration of the central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geomorphology*, 61, 111 – 126.

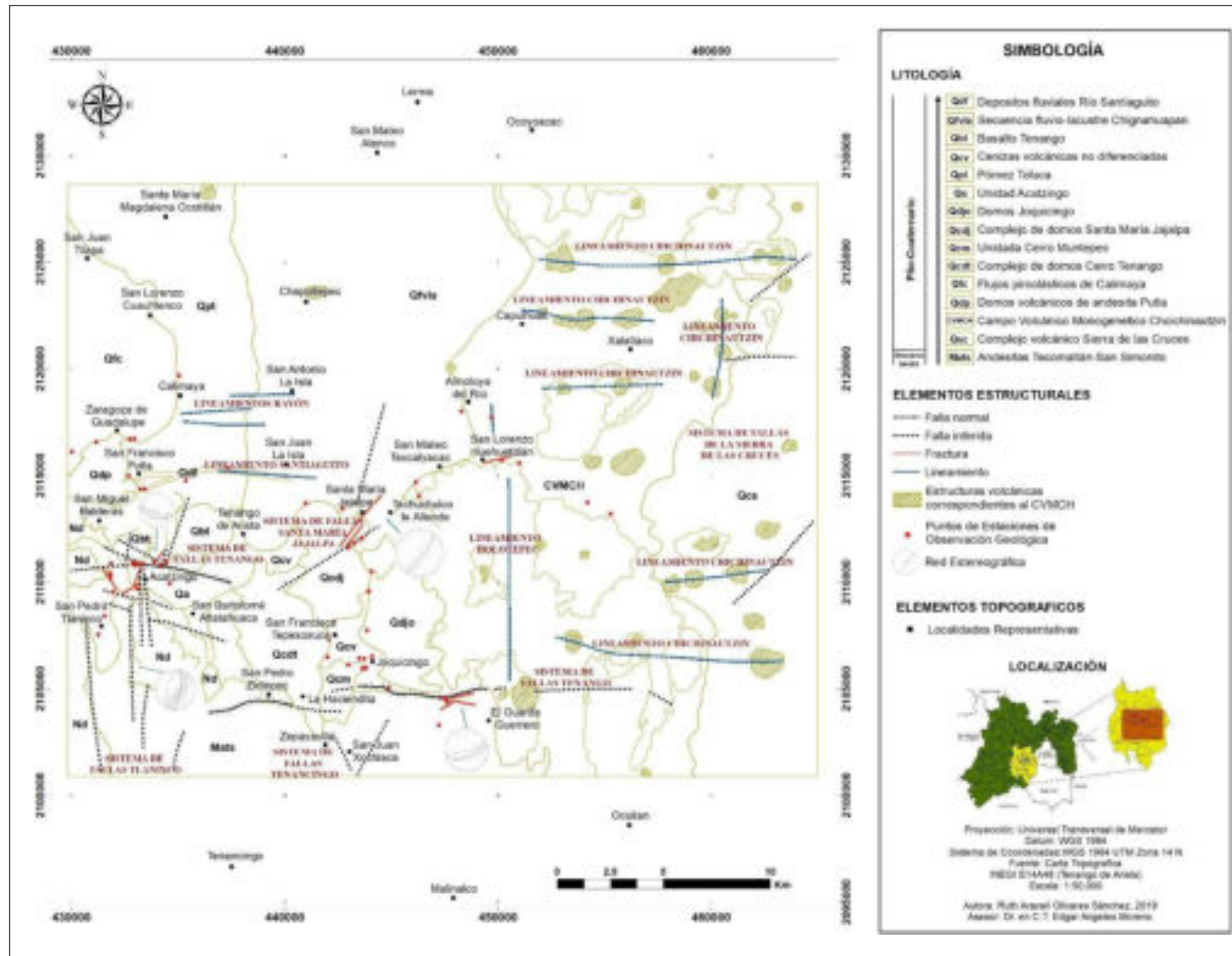
- Velasco-Tapia, F. y Verma, S. (2001). Estado actual de la investigación geoquímica en el campo monogenético de la Sierra de Chichinautzin: análisis de información y perspectivas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(1), 1-36.
- Yamamoto, J. y Mota, R. (1988). La secuencia de temblores del Valle de Toluca, México, de agosto 1980. *Geofísica Internacional*, 27, 279–298.
- Zuloaga, I. (2017). Riesgos geológicos-definición-fuentes de información. Geotecnia online. <https://www.geotecnia.online/riesgos-geologicos-definicion-fuentes-informacion/>

# ANEXOS

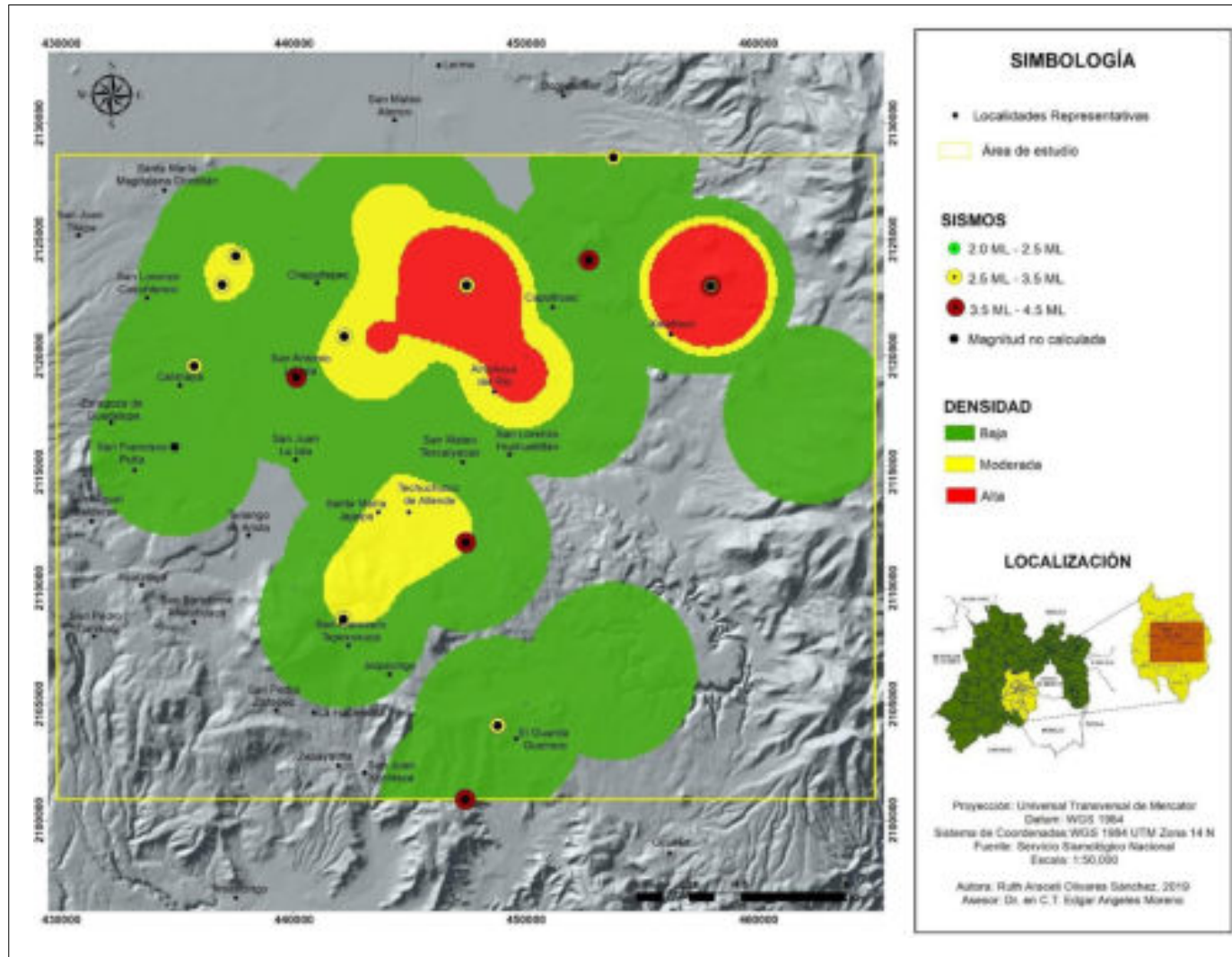
Anexo 1. Mapa geológico del área de estudio.



Anexo 2. Mapa geológico-estructural del área de estudio.

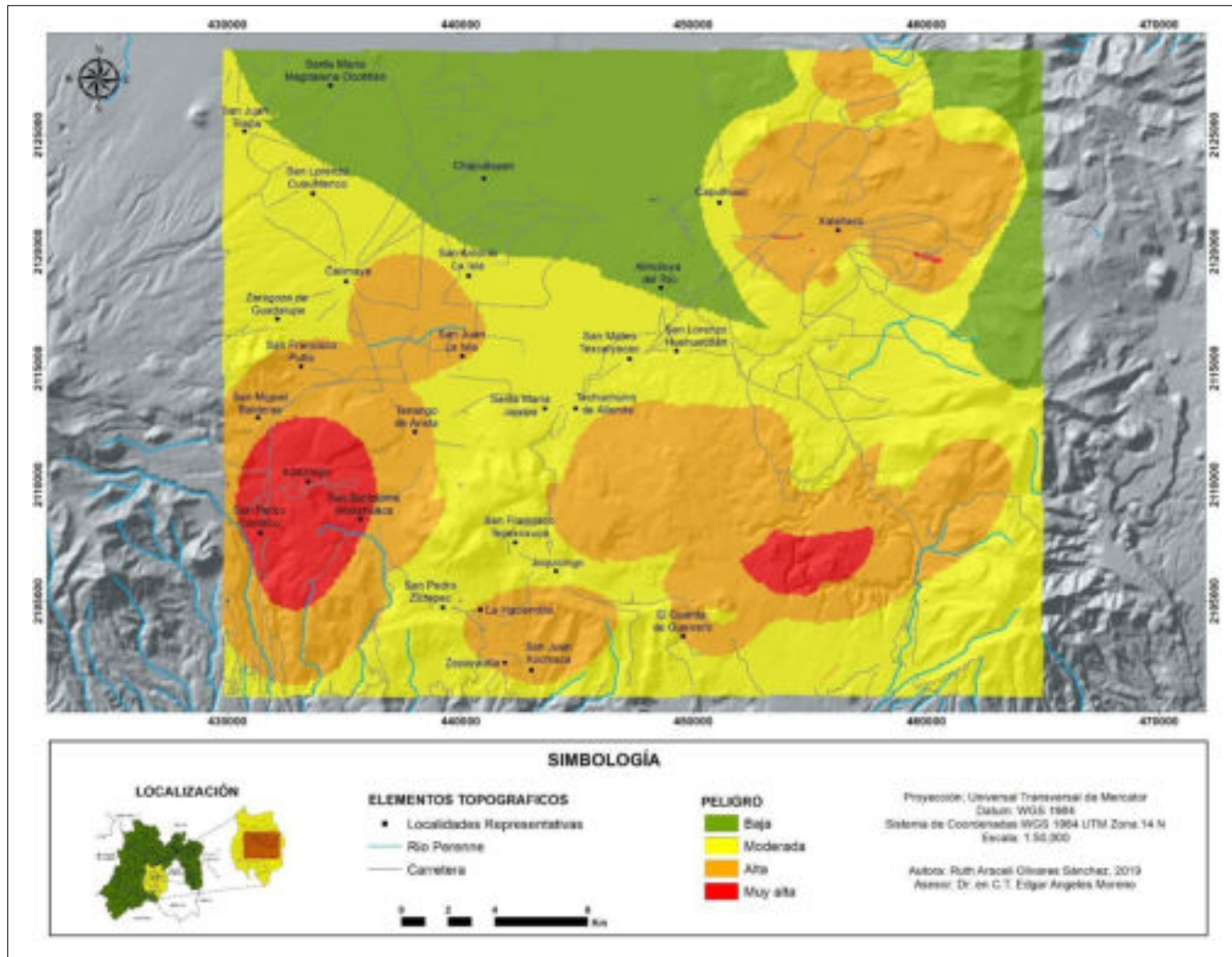


Anexo 3. Mapa de peligro por sismicidad.

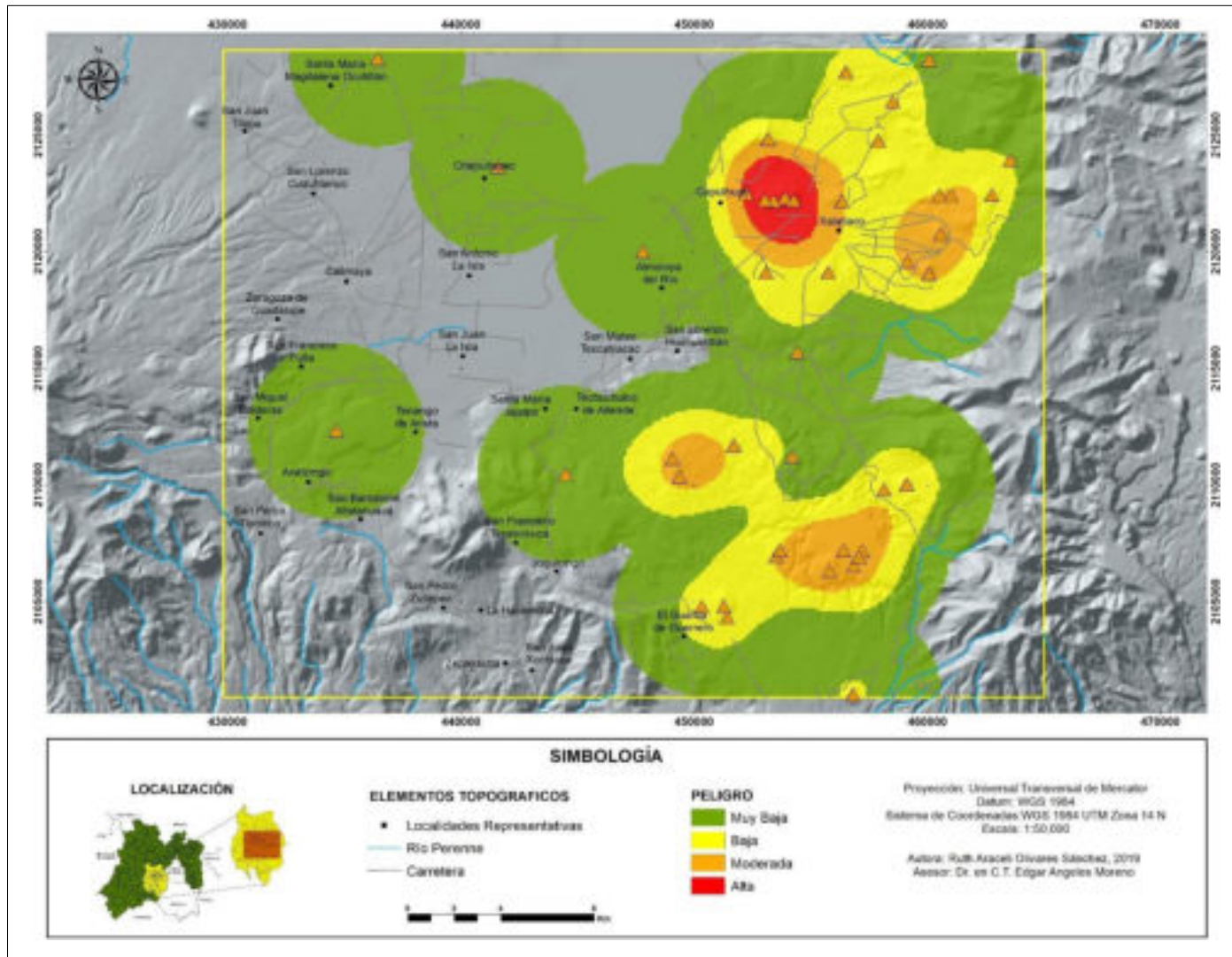




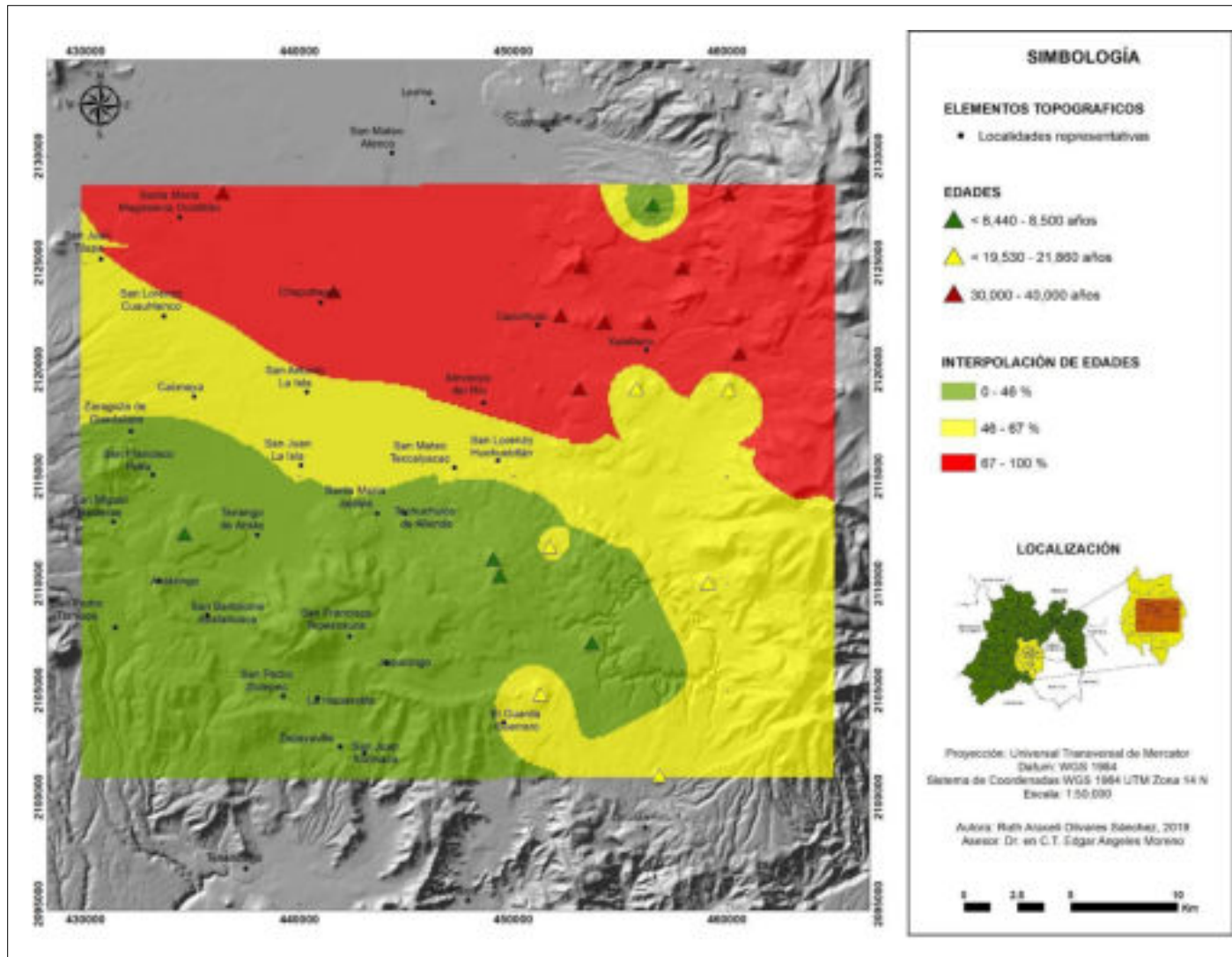
Anexo 4. Mapa de peligro por vulcanismo.



Anexo 5. Mapa de densidad de estructuras volcánicas del Campo Volcánico Chichinautzin Occidental.



Anexo 6. Mapa de interpolación de edades de las estructuras volcánicas del Campo Monogenético Chichinautzin.



Anexo 7. Mapa de densidad de fallas y lineamientos correspondiente al área de estudio de este trabajo.

