

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE GEOGRAFÍA



TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIADO EN GEOLOGÍA
AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS**

**Peligros geológicos por fallas y grietas en la Zona
Metropolitana del Valle de Toluca con base en un estudio
morfoestructural**

PRESENTA:

ALAN RICARDO ALMAZÁN VÁZQUEZ

ASESOR:

M. en C. EDGAR ANGELES MORENO

REVISORES:

Dr. en C. T. ALEXIS ORDAZ HERNÁNDEZ

Dra. PATRICIA FLORES OLVERA

Toluca, Estado de México, octubre, 2017

Índice

1.	Introducción	1
1.1	Justificación contextual y científica	3
1.2	Objetivo general	5
1.3	Objetivos específicos.....	5
2.	Marco teórico	6
2.1	Riesgo, Riesgo Geológico, Peligro y Vulnerabilidad.....	6
2.2	Fracturas y fallas	8
2.3	Peligros geológicos asociados a fracturas y fallas en algunas ciudades del Centro de México	12
2.3.1	Ciudad de México	13
2.3.2	Ciudad de Querétaro	15
2.3.3	Ciudad de Morelia.....	17
2.3.4	Antecedentes en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT). ..	18
3.	Área de estudio y su localización	21
3.1	Orografía y relieve	23
3.2	Hidrología.....	24
3.3	Edafología	26
4.	Metodología y materiales.....	30
5.	Geomorfología	34
5.1	Análisis geomorfológico como contribución a los estudios de peligro por fallamiento y fracturamiento en la ZMVT.....	34
5.2	Hipsometría de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.....	40
5.3	Análisis de pendientes en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca..	42
6.	Geología estructural de la Zona Metropolitana Valle de Toluca.....	44

6.1 Tipos de fracturas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca	47
6.1.1 Fracturas y grietas	47
6.1.2 Fallas.....	56
6.2 Mapa de estructuras en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.....	64
6.3 Análisis de estructuras	67
6.4 Análisis morfoestructural	72
7. Peligros geológicos por fallamiento y fracturamiento en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca	73
7.1 Fracturamiento de obras civiles.....	73
7.2 Subsistencia por fallamiento.....	76
7.3 Algunas relaciones entre fallamiento y extracción de agua de pozos hídricos.....	81
8. Discusión de la problemática	86
8.1 Evolución del fallamiento geológico activo	86
8.2 Subsistencia por abatimiento de niveles freáticos y subsistencia por fallas geológicas activas.....	89
8.3 Peligros y riesgos debido al fallamiento activo y a la subsistencia total	91
8.3.1 Formación de fallas y grietas.....	93
8.3.2 Daños a infraestructura urbana, drenaje, naves industriales, tuberías de gas, y líquidos.....	94
8.3.4 Sismicidad	95
9. Conclusiones y recomendaciones.....	96
10. Bibliografía	98
11. Anexos.....	108

Índice de ilustraciones

Figura 1 Fallas regionales, estratovolcanes y alineamientos volcánicos de la zona metropolitana del valle de toluca, (ZMVT).....	1
Figura 2 Mapa de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (Gaceta del Gobierno, 2009).....	3
Figura 3 Tipos de fracturas según modo de fracturamiento (Twiss y Moores, 1992).	9
Figura 4 Principales tipos de fallas geológicas (Fossen, 2010).....	10
Figura 5 Partes de una falla geológica (Twiss y Moores 1992; Fossen, 2010). ...	12
Figura 6 Estructuras geológicas del Distrito Federal (Unidad de Estudios tecnológicos, Gobierno del Distrito Federal)	14
Figura 7 Mapa estructural que muestra la ubicación del graben de querétaro y de los sistemas de fallas que se intersectan en esta zona formando un arreglo ortogonal de horsts, grabens y semigrabens (Aguirre-Díaz et al., 2000).	15
Figura 8 Muestra la ubicación de una de las estructuras geológicas que afectan calles y avenidas como la 5 de Febrero (a) del Estado de Querétaro, casa habitación dañada por grietas (b), (Aguirre-Díaz et al., 2000).	16
Figura 9 Ubicación de las fallas geológicas en la ciudad de Morelia (Garduño-Monroy et al., 2001).	17
Figura 10 Fallas y fracturas alrededor de l area metropolitana (Garcia Palomo et al 2008).....	17
Figura 11 Ubicación de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.....	21
Figura 12 Orografía y relieve regional de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, (elaboración propia con base en la imagen extraída de google earth.....	23
Figura 13 Mapa hidrológico de la ZMVT, elaboración con base a información obtenida de conabio y modelo digital de elevación.	24
Figura 14 Edafología de la región del Acuífero del Valle de Toluca (CONABIO, 2012)	29

Figura 15 Mapa geomorfológico de la ZMVT. elaboración con base en información obtenida inegi, cartas topográficas e14a37, e14a38, e14a4, e14a47, e14a48	39
Figura 16 Mapa altimétrico de la ZMVT. elaboración con base en información obtenida de CONABIO y modelo digital de elevación.....	41
Figura 17 Mapa de pendientes de la ZMVT. elaboración con base en información obtenida de conabio y modelo digital de elevación.....	43
Figura 18 sistemas de fallas, grietas y fallas en la parte central de la ZMVT	45
Figura 19 Mapa de geología estructural de la Ciudad de Toluca sobre la geología de INFOMEGEM, 2009.....	46
Figura 20 Geometrías de fallas y fracturas encontradas en el centro de la ZMVT. a) fracturas escalonadas y en echelón; b) sigmoides extensionales a lo largo del rumbo de las fallas principales; c) fracturas conjugadas; d) fracturas en cola de caballo o ramaleada; e) fracturas y fallas paralelas y f) fracturas en cola de caballo.....	50
Figura 21 Falla Totoltepec que tiene una longitud de por lo menos 8 km y su ubicación con respecto a las avenidas principales del centro de la ZMVT. elaboración propia.	57
Figura 22 Fallas inversas de acomodo a lo largo de la traza de la falla totoltepec. localidad de santa maría totoltepec.	58
Figura 23 Falla Totoltepec en la localidad de santa María Totoltepec en la calle José María Morelos y Pavón, se observa un sistema principal de falla normal con fallas internas de acomodo inversas y numerosas fracturas extensionales...	59
Figura 24 Falla Totoltepec en la calle Leonardo Da Vinci y esquema de falla normal con escalón aproximado de 30cm de altura, afectando gran parte de infraestructura urbana como calles, guarniciones, industrias, casas, etc.....	60
Figura 25 Falla de Oxtotitlán, en la colonia San Mateo Oxtotitlán, calle Benito Juárez que afecta a casa habitación. se observan las relaciones geométricas de las distintas fallas y fracturas, se interpretan los movimientos relativos que definen una deformación extensional y falla de tipo normal.	63

Figura 26 Mapa de geología estructural de la ZMVT, elaboración propia con base a información obtenida del imfemegem, 2016)	66
Figura 27 Mapa esquemático elaborado a partir del mapa 5 de geología estructural, que muestra la integración de las fallas y fracturas de este trabajo con otros datos estructurales (Norini et al, 2006; García-Palomo et al., 2008; atlas de riesgos del Estado de México 2016.se observa una relación estructural de las fracturas, grietas y fallas de la ZMVT con su contexto estructural a escala regional.	68
Figura 28 Modelo estructural de las relaciones de fallas y grietas en la falla Totoltepec. elaboración propia.....	69
Figura 29 Sección geológico-estructural nw-se que va del cerro agua bendita al norte de Miltepec hasta falla la virgen en Metepec. elaboración propia.....	71
Figura 30 Distintos tipos de afectaciones a la infraestructura urbana en la ZMVT. a) fallas inversas de acomodo y grietas asociadas en la falla Totoltepec. b) casa habitación ubicada en la calle 5 de mayo, Col. san Pedro Totoltepec, afectada por grietas y se abandonó la idea de continuar su construcción en el segundo piso. c) fallas y grietas de la falla Totoltepec que pasa por la avenida en santa maría Totoltepec. d) afectación a una escuela primaria en la calle 16 de septiembre de la col. santa ana Tlapaltitlán. e) casa habitación totalmente destruida por falla geológica en la calle Benito Juárez de la col. San Mateo Ocotitlán. f) falla normal con desplazamiento de 50cm, afectando la avenida Ocotitlán, de la colonia la Magdalena Ocotitlán.	75
Figura 31 Tipos de subsidencia que se presentan en función de los mecanismos que la desencadenan. a) subsidencia por extracción de agua subterránea; b) subsidencia por fallamiento activo y tectónica; c) subsidencia minera; d) subsidencia por erosión; e) subsidencia por carga; f) subsidencia por vibraciones; g) subsidencia por disolución de rocas carbonatadas; h) subsidencia por flujo lateral y i) subsidencia por hidrocompactación. figura tomada de Tomas et al., 2009.	77
Figura 32 Modelo estructural que muestra el actuar simultáneo de ambos tipos de subsidencia por extracción de agua subterránea y por fallamiento activo	

geológico. a cierto nivel de profundidad actúa en mayor medida la subsidencia por extracción del agua subterránea y después a mayor profundidad la subsidencia por fallamiento activo se vuelve más importante. el fallamiento activo con valores de 0.1 mm/año a 0.2 mm/año como mínimo calculados en la falla Totoltepec..... 80

Figura 33 Foto de la falla Totoltepec, en la calle Albert Einstein y esquema de falla normal con escalón aproximado de 30cm en la Calle Albert Einstein y en la zona industrial. se observa un desplazamiento vertical de tipo normal. 81

Figura 34 Mapa de velocidad de desplazamiento en el acuífero del Valle de Toluca (Hernández-Conde, 2014). 84

Figura 35 Proceso de subsidencia total o neta que es la suma de la subsidencia por extracción de agua subterránea mediante pozos más la subsidencia por fallamiento activo y a mayor profundidad prevalece el fallamiento geológico activo. elaboración propia 85

Figura 36 Se muestra un modelo geológico de la evolución de las fallas geológicas activas y la posterior aparición de fallas y grietas debidas a la subsidencia ocasionada por la extracción de agua subterránea. las etapas a), b) y c) son dominadas por las fallas geológicas activas y la etapa actual d) es una subsidencia compuesta o total dada por subsidencia hídrica más la subsidencia por fallas geológicas activas. elaboración propia..... 88

Figura 37 Se muestra los zonificación de riesgos y peligros geológicos debido a fallamiento y grietas en el centro de la ZMVT..... 92

Índice de Tablas

Tabla 1 Tabla de datos estructurales de la ZMVT..... 108

Tabla 2 Continuación de la tabla de datos estructurales de la ZMVT 109

Tabla 3 Continuación de la tabla de datos estructurales de la ZMVT 109

Abreviaturas

(CENAPRED) Centro Nacional de Prevención de Desastres.

(CNA) Comisión Nacional de Aguas del Valle de México.

(CONAGUA) La Comisión Nacional del Agua

(CONABIO) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

(CMPCT) Coordinación Municipal de Protección Civil Toluca.

(DAFL) Depósitos aluviales y fluviolacustres.

(DBPCT) Dirección de Bomberos y Protección Civil de Toluca

(DOF) Diario Oficial de la Federación

(FAO) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

(FVTM) Faja Volcánica Transmexicana.

(GEM) Diagnóstico ambiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca.

(INEGI) Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

(INFOMEGEN) Instituto de Fomento Minero y estudios Geológicos del Estado de México

(ONU) Organización de las Naciones Unidas.

(RPVS) Rocas piroclásticas y volcanosedimentos

(RVE) Rocas volcánicas efusivas.

(SC) Sierra de las Cruces.

(SFTSMA) Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende.

(TIN) Triangulated irregular network.

(UAEMex) Universidad Autónoma del Estado de México

(UNESCO) La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

(ZMVT) Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

1. Introducción

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se encuentra en creciente desarrollo económico y poblacional de tipo horizontal; está ubicada dentro de la Cuenca Hidrológica Lerma-Chapala y desde el punto de vista geológico se encuentra sobre una cuenca de tipo volcanosedimentario rodeada por grandes estratovolcanes y fallas geológicas (Figura 1). Los volcanes que rodean a la ZMVT son parte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y tienen edades geológicas no muy antiguas que se reflejan en la alta elevación topográfica de la ciudad de Toluca (2660 msnm) y un relieve inmaduro de algunas sierras de sus alrededores. En el interior de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) y sus alrededores aparecen rocas volcánicas, piroclásticas y volcanosedimentarias que representan aproximadamente el 40% de su superficie, existen también depósitos fluviolacustres que ocupan el 35% de esta; el resto de la sierra volcánica lo comprenden los estratovolcanes y otros tipos de volcanes que representan el 21% y finalmente, el 2% está conformado por depósitos aluviales.

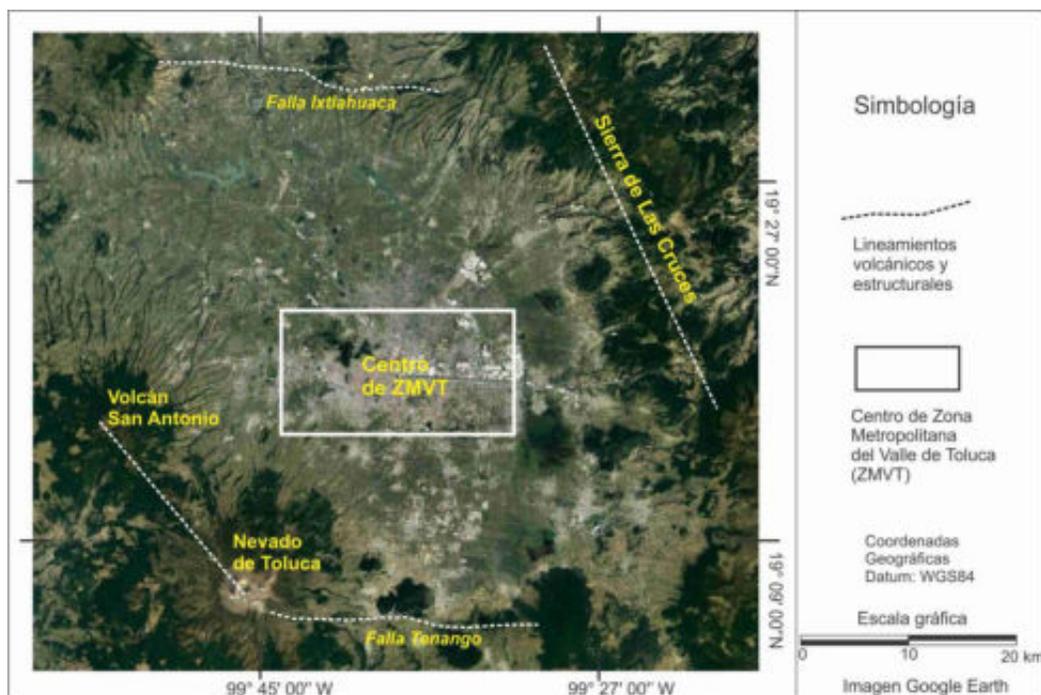


Figura 1 fallas regionales, estratovolcanes y alineamientos volcánicos de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, (ZMVT).

A lo largo de la historia se han producido numerosos desastres y catástrofes naturales, pero en las últimas décadas los daños originados por estos eventos han aumentado como consecuencia del crecimiento de la población mundial y en específico en las zonas metropolitanas de ciudades como ocurre en México. Algunos de los riesgos geológicos en las ciudades como son terremotos, erupciones volcánicas, movimientos de laderas, hundimientos, grietas en el suelo, subsidencias de terreno y erosión, pueden tener una relación directa o indirecta con estructuras geológicas y rasgos morfoestructurales como pueden ser fallas y fracturas; que a su vez estas estructuras, cuando están activas, pueden originar daños económicos o pérdidas de vidas humanas en relación con el crecimiento poblacional de una ciudad. A pesar de los avances científico-tecnológicos, que están en constante desarrollo, estamos muy lejos de controlar dichos eventos naturales, sin embargo, se puede definir la ubicación espacial y causas de los procesos morfoestructurales activos, con el fin de determinar su peligrosidad, vulnerabilidad y exposición. Una vez determinadas esas componentes del riesgo geológico asociado a fallas geológicas activas, se pueden establecer las herramientas y recursos adecuados para la prevención, mitigación y protección de sus efectos.

En este estudio morfoestructural a escala de la ZMVT se aplicaron diferentes metodologías y técnicas de la geología estructural y geomorfología para definir las estructuras morfoestructurales en la ZMVT ya que se encontró que algunos peligros geológicos se deben a procesos morfoestructurales activos como fallas geológicas y fracturas que a su vez afectan a construcciones civiles por el crecimiento horizontal poblacional acelerado de la ZMVT.

Se definieron las estructuras morfoestructurales en la ZMVT y en específico, fallas, fracturas y grietas activas, de esta manera se pueden tomar las medidas preventivas adecuadas y disminuir el grado de afectación por estos peligros con una adecuada propuesta de gestión ambiental referente a los riesgos geológicos (acción conjunta entre el estado y la sociedad para orientar los objetivos de las políticas hacia el fomento y la consolidación de procesos de desarrollo sostenibles).

1.1 Justificación contextual y científica

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) está dentro de la Cuenca Hidrológica de Lerma-Chapala. La ZMVT cuenta con una superficie de 42,952.14 hectáreas y se encuentra distribuida administrativamente en 47 delegaciones y 288 Unidades Básicas Territoriales, con una Población total de 1 millón 633 mil habitantes (INEGI, 2010) (Figura 2). Debido al creciente desarrollo poblacional de tipo horizontal, actividades económicas, a la heterogeneidad geológica y morfoestructural del terreno sobre el que se asienta la ZMVT y porque se encuentra dentro de una cadena de volcanes activa como es la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) se ve afectada por peligros geológicos relacionados con fallas, grietas y fracturas.

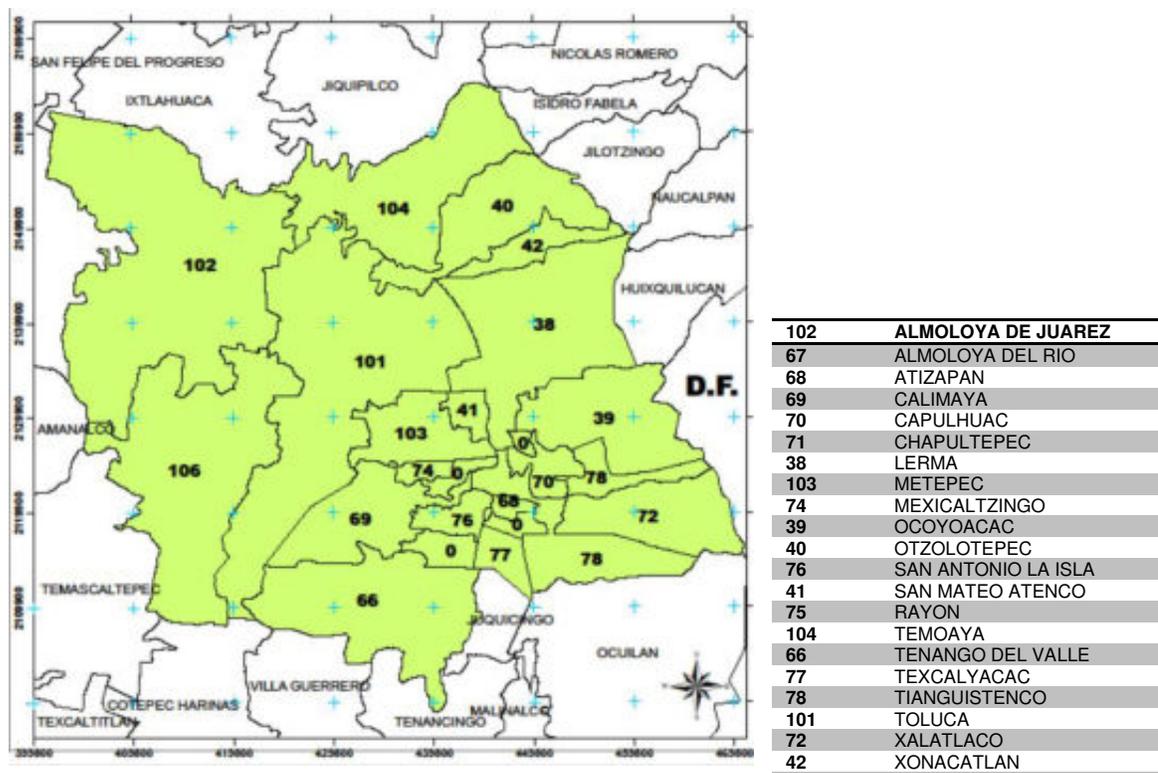


Figura 2 Mapa de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (Gaceta del Gobierno, 2009).

De hecho a escala regional, en el norte, este y sur, no lejos de la ZMVT, se han documentado fallas geológicas activas. En el norte de la ZMVT se está estudiando continuamente el sistema de fallas activas de Atlacomulco-Acambay que presentan sismicidad activa (Langridge et al., 2013); en el sur se ha reconocido el sistema de fallas activas de Tenango que afecta a construcciones civiles (Norini et al., 2006) y en el este ha habido reportes de fallas activas en la Sierra de Las Cruces (Angeles-Moreno et al., 2014). La posible continuidad y paralelismo de algunos de estos sistemas fallas hacia el interior de la ZMVT no se había estudiado hasta el presente trabajo.

En la ZMVT la Dirección de Bomberos y Protección Civil de Toluca (DBPCT) (2005), ha reportado desarrollos de grietas y fracturas en algunas delegaciones y localidades, que podrían estar relacionadas a fallas geológicas profundas de basamento, fallas y fracturas activas. En varios trabajos relacionados con los recursos hídricos de la ZMVT han encontrado que algunas fracturas y grietas parecen tener relación con la sobre-extracción de agua subterránea (Calderhead et al., 2010) y otros trabajos de análisis de imágenes de satélite han encontrado que existe subsidencia de terreno en algunas zonas de la Cuenca de Toluca (Dávila-Hernández et al., 2015). Algunos trabajos de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex) y de la DBPCT (2005) indican que se ha detectado en algunas localidades de la ZMVT, varios problemas por hundimiento y fracturas de casas y terrenos. Ejemplos de estas localidades son: San Pedro Totoltepec, Santa Ana Tlapaltitlán, Santa María Totoltepec, San Juan de las Huertas, San Lorenzo Coacalco, Colonia Los Ángeles, Tlacopa, Jesús J. Gallardo, Morelos, Granjas, San Buenaventura, Colonia Independencia y otros terrenos.

A la fecha se han presentado casos con algunos incidentes de peligro relacionados con caídos de roca de partes altas, por lo que algunas de las principales elevaciones topográficas se mantienen en monitoreo constante por parte de la DBPC, es de mencionar que durante la presente administración la DBPCT ha realizado acciones preventivas para la estabilización y/o demolición de 114 bloques de roca que

generaban riesgo de desprendimiento y deslizamiento, principalmente en Lomas Altas (Barrio de Zopilocalco Norte), Barrio de la Teresona, Santa Cruz Atzacapotzaltongo y Santiago Miltepec; Sin embargo, cabe la posibilidad que con el aumento de la población aumenten los riesgos en las pendientes localizadas en la ZMVT.

Al localizar las grietas, fracturas y fallas en la (ZMVT) con el empleo de metodologías y técnicas morfoestructurales se elaboró un mapa de peligros geológicos. Este mapa de peligros geológicos por fallas, grietas y fracturas podrá después integrarse con otros estudios ambientales que permitan disminuir vulnerabilidad a la que se encuentran las diferentes localidades de la ZMVT. Particularmente importantes son los efectos del crecimiento demográfico y de la industrialización, que modifican e incrementan el peligro (CENAPRED, 2001) y la ZMVT no es la excepción.

1.2 Objetivo general

Evaluar desde un enfoque morfoestructural la ZMVT con la finalidad de elaborar un mapa de peligros por fallamiento y fracturamiento.

1.3 Objetivos específicos

- a) Definir y localizar los rasgos morfoestructurales y geomorfológicos activos de la ZMVT, para identificar las estructuras de mayor peligro geológico.
- b) Establecer las zonas con mayor peligro con base en un estudio morfoestructural para elaborar una zonación de peligros geológicos por fallamiento y fracturamiento.
- c) Proponer una serie de recomendaciones para la prevención de la construcción en zonas de peligro por fallamiento y fracturamiento.

2. Marco teórico

2.1 Riesgo, Riesgo Geológico, Peligro y Vulnerabilidad

La existencia de un riesgo implica la presencia de un agente perturbador (fenómeno natural o generado por el hombre) que tenga la probabilidad de ocasionar daños a un sistema afectable (asentamientos humanos, infraestructura, planta productiva, etc.) en un grado tal, que constituye un desastre (CENAPRED, 2006).

El riesgo geológico es el proceso, situación u ocurrencia en el medio geológico, natural, inducida o mixta, que puede generar un daño económico o social para alguna comunidad, y en cuya previsión, prevención o corrección se emplearan criterios geológicos (Ayala-Carcedo et al., 1987).

Según la UNESCO, el riesgo es la probabilidad de perder vidas humanas o riquezas naturales, como consecuencia de algún desastre de un fenómeno natural o causado por el ser humano. El riesgo puede ser de origen natural, geológico, hidrológico o atmosférico o también de origen tecnológico o provocado por el hombre (Cardona, 1993).

En términos cualitativos, se entiende por riesgo la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. La probabilidad de ocurrencia de tales eventos en un cierto sitio o región constituye una amenaza, entendida como una condición latente de posible generación de eventos perturbadores (CENAPRED, 2006).

En forma cuantitativa se ha adoptado una de las definiciones más aceptadas del riesgo, entendido como la función de tres factores: la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino (peligro), la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos. (CENAPRED, 2006). (Fórmula para calcular el riesgo).

Riesgo= (Peligro, Vulnerabilidad, exposición)

$$R = f (P, V, E)$$

El peligro 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. Para el estudio de los peligros, es importante definir los fenómenos perturbadores mediante parámetros cuantitativos con un significado físico preciso que pueda medirse numéricamente y ser asociado mediante relaciones físicas con los efectos del fenómeno sobre los bienes expuestos. En la mayoría de los fenómenos pueden distinguirse dos medidas, una de magnitud y otra de intensidad. (CENAPRED, 2006).

La vulnerabilidad se define como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas (CENAPRED, 2006).

La exposición expresa la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y son factibles de ser dañados. Por lo general se le asignan unidades monetarias puesto que es común que así se exprese el valor de los daños, aunque no siempre es traducible a dinero. En ocasiones pueden emplearse valores como porcentajes de determinados tipos de construcción o inclusive el número de personas que son susceptibles a verse afectadas (CENAPRED, 2006).

Una variable que también es tomada en cuenta en toma de decisiones es la resiliencia es la capacidad de un territorio y de su población, de resistencia y recuperación ante un desastre natural asimismo puede entenderse como la minimización de los desastres, esto como consecuente a que la población reside en viviendas y barrios que cuentan con servicios e infraestructura adecuados, que cumplen con códigos de construcción razonables otorgados por ley, y en la que no existen asentamientos informales (ONU, 2012).

2.2 Fracturas y fallas

Fractura

La fractura es una discontinuidad geológica en las rocas o suelos y es a su vez la separación en dos o más partes de un cuerpo sólido bajo la acción de un esfuerzo con una correspondiente pérdida de cohesión bajo condiciones frágiles (Twiss y Moores, 1992). La generación de una fractura ocurre cuando se libera la energía de deformación acumulada en algún suelo o roca como reacción a un cambio en las condiciones del equilibrio natural. Los procesos geológicos generan una gran variedad de tipos de fracturas, por ejemplo, fracturas relacionadas a deformación de las rocas (juntas, fallas, pliegues), fracturas relacionadas con enfriamiento de rocas ígneas, fracturas relacionadas a intrusiones salinas, fracturas relacionadas a deslizamientos, fracturas relacionadas a terremotos, fracturas relacionadas a procesos tectónicos, fracturas por subsidencia de terreno, etc. Existen también fracturas originadas por la acción de la actividad humana como pueden ser fracturas asociadas a la sobreexplotación de acuíferos en ciudades, fracturas generadas en las rocas y suelos por la construcción de obras civiles, etc.

En esta parte se hablará de dos tipos de fracturas que son las diaclasas y fallas (Angelier, 1994):

- **Juntas o diaclasas**

Las diaclasas o juntas no muestran desplazamiento aparente, son fracturas sin estrías a diferencia de las fallas. Una grieta es una abertura larga y estrecha, que a final de cuentas es un tipo de fractura, y que por presentar una separación de dos bloques de roca o material es lo mismo que una diaclasa o junta. Las fracturas pueden estar rellenas de minerales fibrosos como carbonatos, cuarzo u otro mineral; cuando están de esta forma se denominan entonces venas, vetillas o vetas.

Las fracturas por su modo de fracturamiento pueden ser de apertura (modo I), de deslizamiento (modo II) o de desgarre (modo III). La diferencia está en la relación entre la dirección del desplazamiento relativo de los bloques separados con la dirección del crecimiento de la fractura (Figura 3).

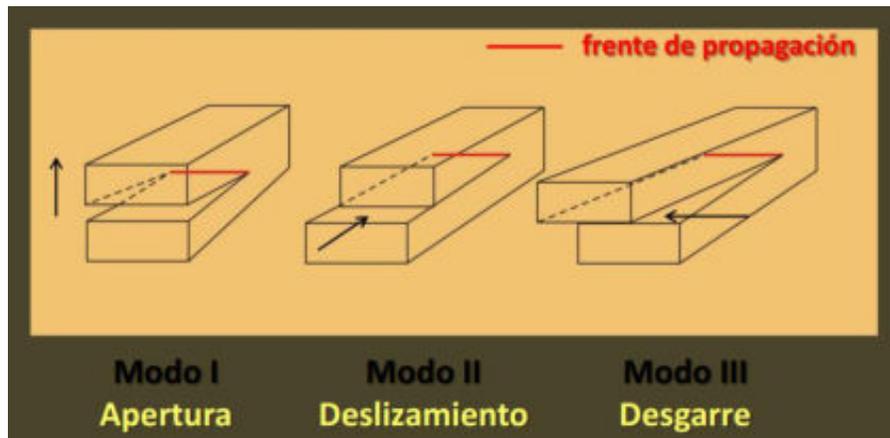


Figura 3 Tipos de fracturas según modo de fracturamiento (Twiss y Moores, 1992).

- **Fallas**

La falla es un tipo de fractura y por ende una discontinuidad en las rocas y suelos a lo largo de la cual se ha producido el desplazamiento apreciable de los volúmenes rocosos que la flanquean (Krantz, 1988). La superficie de falla principal se encuentra en el núcleo de la falla. Lo que rodea al núcleo de la falla se denomina zona de daño de la falla o también denominada zona de falla. En la superficie de la falla se encuentra el espejo de falla, que es una superficie pulimentada por asperezas y abrasión mecánica que forman estrías o surcos que evidencian la dirección y sentido del desplazamiento de los bloques (Krantz, 1988).

Una de las clasificaciones de las fallas está en función del movimiento relativo de los bloques y respecto del echado del plano de falla; bajo este criterio existen cuatro tipos: falla normal, falla inversa, falla lateral y falla oblicua (Fossen, 2010).

Una falla normal es aquella en la que el bloque superior ha sufrido un movimiento descendente respecto al bloque de piso (figura 4). En la falla inversa el bloque de superior o del alto asciende por sobre el bloque de piso. En fallas normales e inversas el deslizamiento, que es denotado por la estría, en general forma 90° con respecto al rumbo del plano de falla. En la falla lateral o de rumbo el deslizamiento de los bloques es paralelo al rumbo del plano de falla (figura 4). Existen dos tipos de fallas laterales, falla lateral izquierda (sinestral) y falla lateral derecha (dextral). Una falla se dice que es dextral (dextrógira) cuando el sentido de movimiento entre los bloques es en sentido horario y la falla será sinestral (levógira) cuando el sentido de movimiento entre los bloques sea antihorario (Anderson, 1951). Las fallas oblicuas son aquellas fallas que tienen una combinación de movimientos de deslizamiento tipo normal o inverso y al mismo tiempo hay deslizamiento lateral.

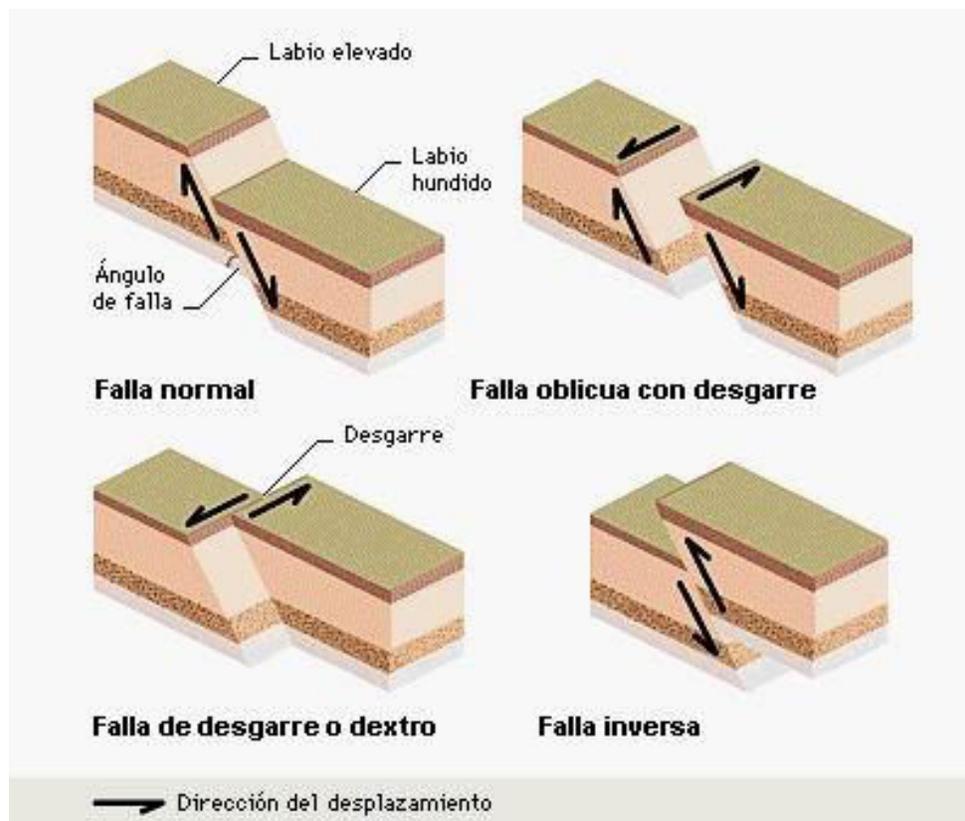


Figura 4 Principales tipos de fallas geológicas (Fossen, 2010).

De acuerdo a Twiss y Moores (1992) y a Fossen (2010) las partes básicas de una falla son: plano de falla, bloque de piso, bloque del alto, deslizamiento (estría), escarpe de falla, traza de falla, salto de falla y separación (Figura 5).

El plano de falla es la superficie de ruptura por el que se desplazan los bloques de roca. Si el plano de falla está pulido y estriado decimos que es un espejo de falla. Bloque de piso es el bloque inferior debajo del plano de falla siempre y cuando el deslizamiento de la falla sea normal, inverso u oblicuo. Bloque del alto, es el bloque superior al plano de falla, o superior a nosotros cuando estamos parados perpendiculares al rumbo de la falla (Fossen, 2010).

El deslizamiento es el desplazamiento relativo a lo largo de la superficie de falla entre dos puntos adyacentes que se encontraban unidos antes de ocurrir el desplazamiento de los bloques. El deslizamiento tiene un sentido y dirección de movimiento y en los espejos de falla aparece como un surco o rasgo lineal que se le llama estría de falla (Fossen, 2010).

El escarpe de falla es la expresión geomorfológica de la falla en la superficie de la tierra. En el escarpe de falla se presentan comúnmente abanicos aluviales y cuando las fallas están activas depósitos de gravas o sedimentos gruesos.

La traza de falla es aquella línea intersección entre la superficie de falla y la superficie topográfica. En los mapas geológicos comúnmente se observan las trazas de falla como líneas curvadas (Twiss y Moores 1992).

Se llama salto de falla, a la altura total del desplazamiento medido de manera vertical. Si el desplazamiento es horizontal en el mismo plano decimos que se trata de un desgarre o separación horizontal (Fossen, 2010).

Separación de falla, es un desplazamiento aparente de las capas de rocas que originalmente estaban unidas y este desplazamiento se puede ver en el corte de la falla o afloramiento perpendicular al rumbo de la falla (Fossen, 2010).

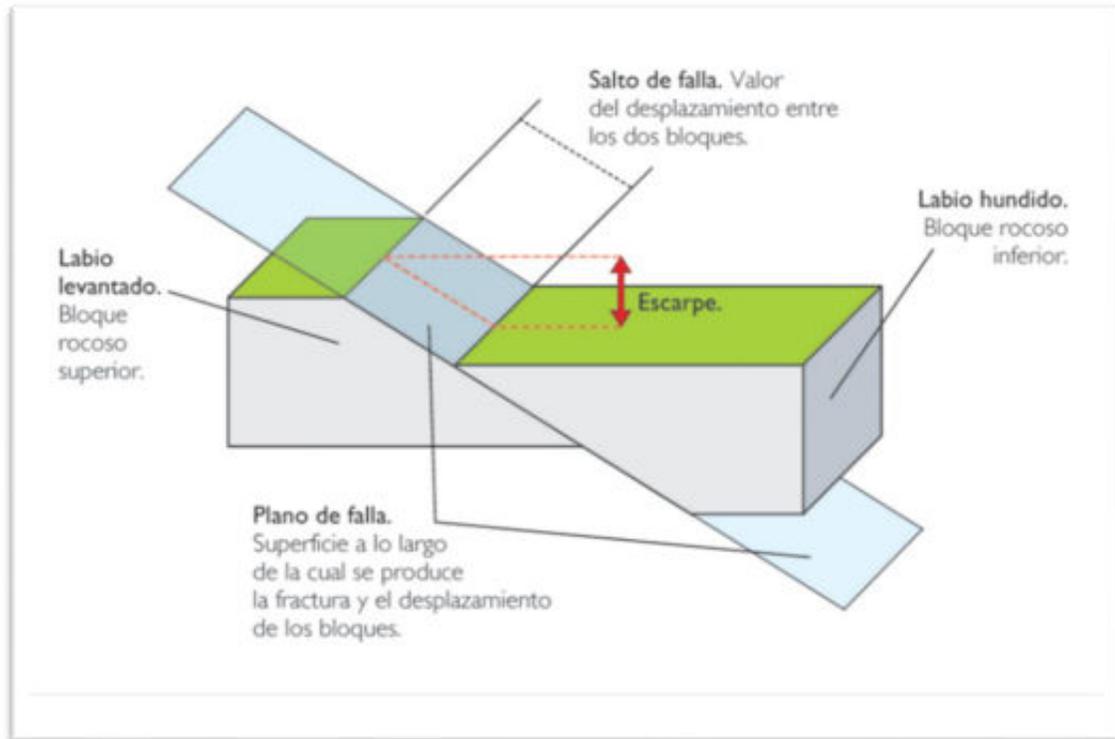


Figura 5 Partes de una falla geológica (Twiss y Moores 1992; Fossen, 2010).

2.3 Peligros geológicos asociados a fracturas y fallas en algunas ciudades del Centro de México

En algunas ciudades económicamente importantes del centro de México ejemplo, Querétaro, Morelia, Cd. De México, Puebla y que se encuentran a lo largo de la FVTM comparten en común problemas geológicos relacionados con la formación de fallas activas, pero también problemas con formación de fracturas y grietas relacionadas a la sobreexplotación de sus acuíferos de agua potable. En esta parte

se mencionarán estos casos de manera breve, esto como una base de comparación con la problemática que aborda este trabajo de tesis.

2.3.1 Ciudad de México

El Valle de México, donde se asienta la Ciudad de México, tiene zonas que se han hundido hasta 13 metros desde finales del siglo XIX y en la urbe es cada vez es más frecuente la aparición de grietas (Auvinet-Guichard, 2008 en García-Flores, 2013). Las grietas por sus dimensiones causan alarma entre la población y llegan a ocasionar daños importantes a las construcciones y servicios públicos así también las grietas más graves se producen por el hundimiento de la urbe o por el bombeo intensivo de agua de pozos profundos (Auvinet-Guichard, 2008 en García-Flores, 2013). Las zonas del Valle de México más afectadas por este fenómeno son Iztapalapa, Chalco, Xochimilco, la periferia de la Sierra de Santa Catarina, Xalostoc y Vallejo. (Cabral-Cano et al., 2000). (Figura 6).

Las observaciones de diferentes investigadores han permitido constatar que las grietas de Ciudad de México no están distribuidas al azar y se concentran principalmente en ciertas áreas (Domínguez, 2002) y otros autores mencionan que algunas pueden tener relación con fallas geológicas más antiguas (García-Palomo et al., 2008; Cerca-Martínez et al., 2012).

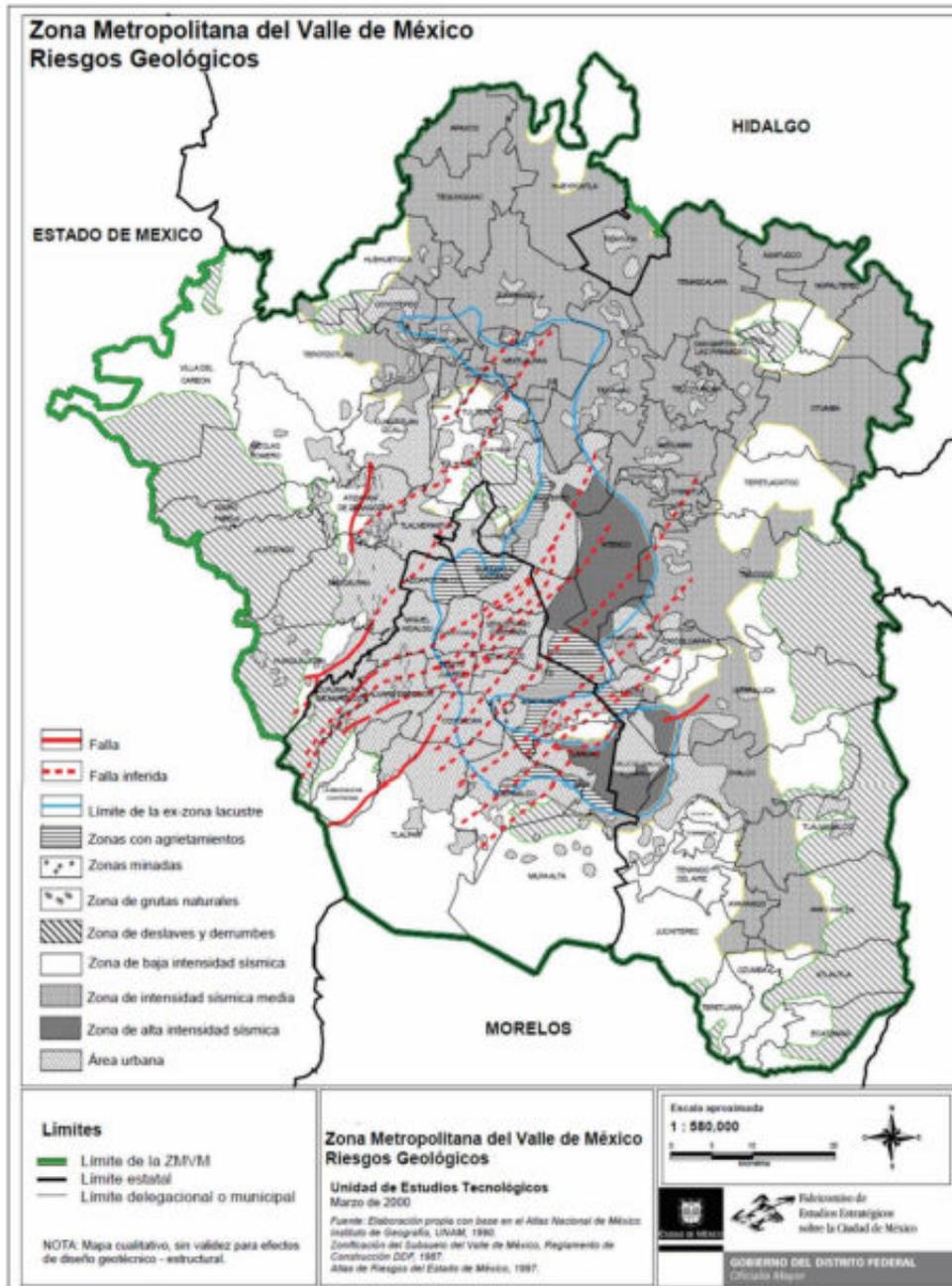


Figura 6 Estructuras geológicas del Distrito Federal (Unidad de Estudios Tecnológicos, GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL, 2000)

En el occidente de la ciudad de Querétaro se han registrado agrietamientos y subsidencia en el terreno a lo largo de una zona en que las autoridades locales la han interpretado como una falla de orientación SSE (Lermo et. al, 1996). Estas grietas y la subsidencia del terreno han ocasionado daños importantes a la infraestructura urbana (Figura 8), tales como la deformación de vías importantes de comunicación, como el caso de la avenida 5 de febrero, y daños a construcciones (Aguirre-Díaz et al., 2000). La deformación del terreno en este sector de la ciudad sigue una traza NNW-SSE, y coincide con la ubicación de la falla Santa Rosa. Sin embargo, aunque es evidente la continua subsidencia y deformación del terreno en esta área, no se ha registrado sismicidad que sugiera relación con la falla mencionada.

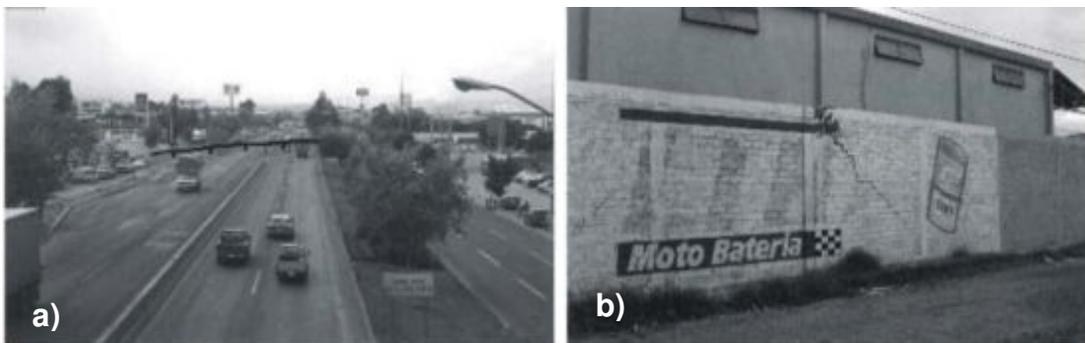


Figura 8 Muestra la ubicación de una de las estructuras geológicas que afectan calles y avenidas como la 5 de Febrero (a) del estado de Querétaro, casa habitación dañada por grietas (b), (Aguirre-Díaz et al., 2000).

El fallamiento NNW-SSE es considerado potencialmente activo en base a sismicidad reciente (enero-febrero de 1998) en una de las fallas con esta orientación cercana a Sanfandila, Querétaro y a que corta a fallas del sistema ENE-WSW (Aguirre-Díaz et al., 2000). El fallamiento ENE-WSW pertenece a la FVTM, aunque no se registran evidencias de actividad reciente en el graben de Querétaro.

De acuerdo a sus características se han agrupado las fallas de Morelia en dos tipos: fallas geológicas que se han reactivado por la actividad humana y fallas tectónicas potencialmente sísmicas (Garduño-Monroy et al., 2001) (Figura 9). Los daños a las obras civiles de Morelia parecen estar asociados a hundimientos diferenciales por compactación o bien, por su morfología, a inestabilidad de taludes en los escarpes de las fallas tectónicas (Suter et al., 1995; Garduño-Monroy, et al., 1997, 1998, 2001).

2.3.4 Antecedentes en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)

La ZMVT está ubicada una cuenca de tipo volcanosedimentaria que pertenece al sector central de la FVTM que es un arco volcánico que presenta algunos sectores con fallas geológicas activas (Martínez-Reyes *et al.*, 1990; Suter *et al.*, 1992; Quintero-Legorreta, 2002).

La definición y análisis a detalle de los peligros asociados a estructuras morfoestructurales (grietas, fracturas y fallas) dentro de la ZMVT no se habían considerado ni definido en trabajos antecedentes, hasta este trabajo ya que esos trabajos geográficos, geomorfológicos, geológicos fueron de carácter regional (García-Palomo *et al.*, 2008; Espinosa-Rodríguez *et al.*, 2014) y mucho menos se había planteado la elaboración de un mapa de peligros geológicos debido a la falta de un estudio de detalle morfoestructural. Otros trabajos geológicos en la ZMVT se han enfocado a algunos depósitos volcánicos del Nevado de Toluca y sus peligros volcánicos (Capra *et al.*, 2000; Aceves-Quezada *et al.*, 2006) y también a algunos flujos de escombros en Santa Cruz Nuevo al oriente del Nevado de Toluca (Aceves-Quezada *et al.* 2014) pero no a los peligros geológicos por fracturamiento o fallamiento.

En el oriente de la ZMVT, en la Sierra de las Cruces, García-Palomo *et al.*, (2008) realizó un trabajo morfoestructural de carácter regional mediante el empleo de procesamiento digital de imágenes de satélite, mapas temáticos y geología estructural llegando a determinar tres sistemas de fallas principales N-S, E-W y NE-SW (figura 10). La extensión de estas fallas hacia el interior de la ZMVT se desconoce. En la parte surponiente de la ZMVT, Espinosa-Rodríguez *et al.*, (2014) elaboró un estudio geomorfológico de carácter regional del Área Natural Protegida Nevado de Toluca abarcando los estratovolcanes San Antonio y Nevado de Toluca sin embargo no se considera el fallamiento geológico.

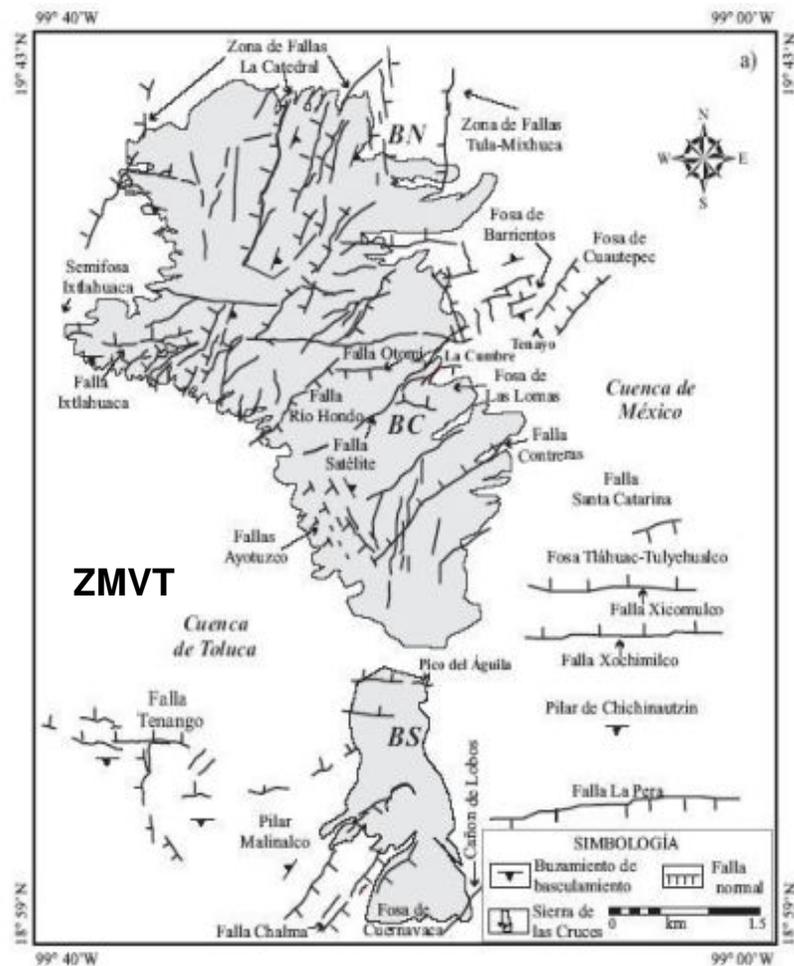


Figura 10 Fallas y fracturas alrededor del área metropolitana (García-Palomo *et al.*, 2008).

Se han realizado mapas geológicos regionales muy simplificados en apoyo para establecer el marco de referencia para algunos estudios hidrogeológicos en la cuenca alta del río Lerma y Valle de Toluca (Esteller *et al.*, 2012; Maderey-Rascón *et al.*, 2001; Salas-García *et al.*, 2011; Dávila-Hernández *et al.*, 2012) sin embargo el enfoque morfoestructural a escala de la ZMVT no existe. Y este trabajo morfoestructural de la ZMVT puede a largo plazo servir de apoyo para establecer relaciones con rasgos hidrogeológicos como por ejemplo permeabilidad y contaminación de agua subterránea, pero también con subsidencias por abatimiento de niveles freáticos (Dávila-Hernández *et al.*, 2012).

Algunos de los municipios del Estado de México se han visto afectados por diferentes desastres naturales relacionados con fallas geológicas activas y fracturamientos, por ejemplo, en Acambay (Urbina y Camacho, 1912, Langridge *et al.*, 2013), Nicolás Romero (Angeles-Moreno, 2005, 2014). Chalco y Ecatepec tienen problemas con la formación de fallas y grietas en relación con la subsidencia diferencial del terreno provocada por la extracción desmedida del agua subterránea en relación con la creación de nuevas áreas habitacionales (Cabral-Cano *et al.*, 2011). Se ha reportado también la presencia de subsidencia y grietas por probable extracción de agua de acuíferos en algunas partes de la ZMVT con base en estudios de imágenes satelitales (Dávila-Hernández *et al.*, 2012), sin embargo, no se descarta que algunas grietas o fracturas tengan alguna componente estructural.

La caracterización morfoestructural en las zonas metropolitanas de ciudades, es un aspecto importante en la determinación de los futuros peligros geológicos por grietas y fallas activas, sobre todo cuando los períodos de recurrencia de los mismos sobrepasan la duración de una vida humana. Asimismo, la investigación morfoestructural es un punto de partida para los estudios de movimientos de ladera, agrietamientos, subsidencia, sismicidad y la evolución de vertientes a la escala de decenas o centenares de años (Undha, *et al.* 1993).

3. Área de estudio y su localización

La ZMVT se localiza en la parte central del Estado de México, entre los paralelos 18°59'07" y 19°34'47" de latitud norte y los meridianos 99°38'22" y 99°56'13" de longitud oeste con respecto al meridiano de Greenwich (Figura 11).



Figura 11 Ubicación de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

La ZMVT está integrada por 22 municipios de carácter metropolitano que son: Toluca, Metepec, Lerma, San Mateo Atenco, Ocoyoacac, Xonacatlán, Zinacantepec, Almoloya de Juárez, Temoaya, Tenango del Valle, Santiago Tianguistenco, Jalatlaco, Almoloya del Rió, Santa Cruz Atizapán, Capulhuac, Calimaya, Chapultepec, Mexicaltzingo, Otzolotepec, Santa María Rayón, San Antonio la Isla y Texcalyacac; todos ellos cubren una superficie de 2,669 Km² (Figura 11). Los municipios conurbados en la ZMVT abarcan 1,820 km². La ZMVT colinda al norte con los municipios de San Felipe del Progreso, Ixtlahuaca, Jiquipilco y Nicolás Romero. Al oriente con Isidro Fabela, Jilotzingo, Naucalpan, Huixquilucan y con la Ciudad de México. Al Sur con Ocuilan, Joquicingo, Tenancingo, Villa Guerrero y Coatepec Harinas; y por último al poniente con Temascaltepec, Amanalco y Villa Victoria.

3.1 Orografía y relieve

La ZMVT está rodeada por sierras de origen volcánico. En el norte se encuentran la Sierra Mazahua de Ixtlahuaca y Sierra de las Cruces; al sur la Sierra Matlazinca de Tenango; en el suroeste, el volcán Nevado de Toluca; al oeste la Sierra de San Antonio y al este, la Sierra de las Cruces y Sierra de Ocoyotepec. Otras elevaciones aisladas ubicadas en el interior de la ZMVT son: el volcán Molcajete en Almoloya de Juárez; la Sierra Morelos ubicada entre las poblaciones Calixtlahuaca y San Mateo Oxtotitlán; Sierra de Toluca donde se encuentran algunas elevaciones, Cerro Coatepec, Cerro Agua Bendita y Cerro del Obispo (Figura 12).



Figura 12 Orografía y relieve de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, (elaboración propia con base en la imagen extraída de Google Earth.

3.2 Hidrología

La ZMVT está dentro de la región hidrológica Lerma-Chapala, la cual está atravesada por los ríos principales: el río Xicualtenco o Verdiguél que cruza la cabecera municipal y desemboca en el río Lerma; el río Tecaxic, en el municipio de Zinacantepec; el río Tejalpa que se alimenta de los ríos San Pedro y La Huerta y el río Lerma en Almoloya del Río; además de los ríos Acalotli y San Juan en el municipio de Capulhuac; el arroyo La Cañada del Huevito en el municipio de Chapultepec; los ríos el Salto del Agua, Flor de Gallo, San Mateo, Río Seco y Peralta en el municipio de Lerma; y por último los arroyos el Solanos, Mayorazgo y Zarco en el municipio de Oztolotepec. Muchos de estos ríos en su mayoría presentan una orientación E-W, N-S, por lo que podría haber una estrecha relación con algunas de las estructuras (Figura 13).

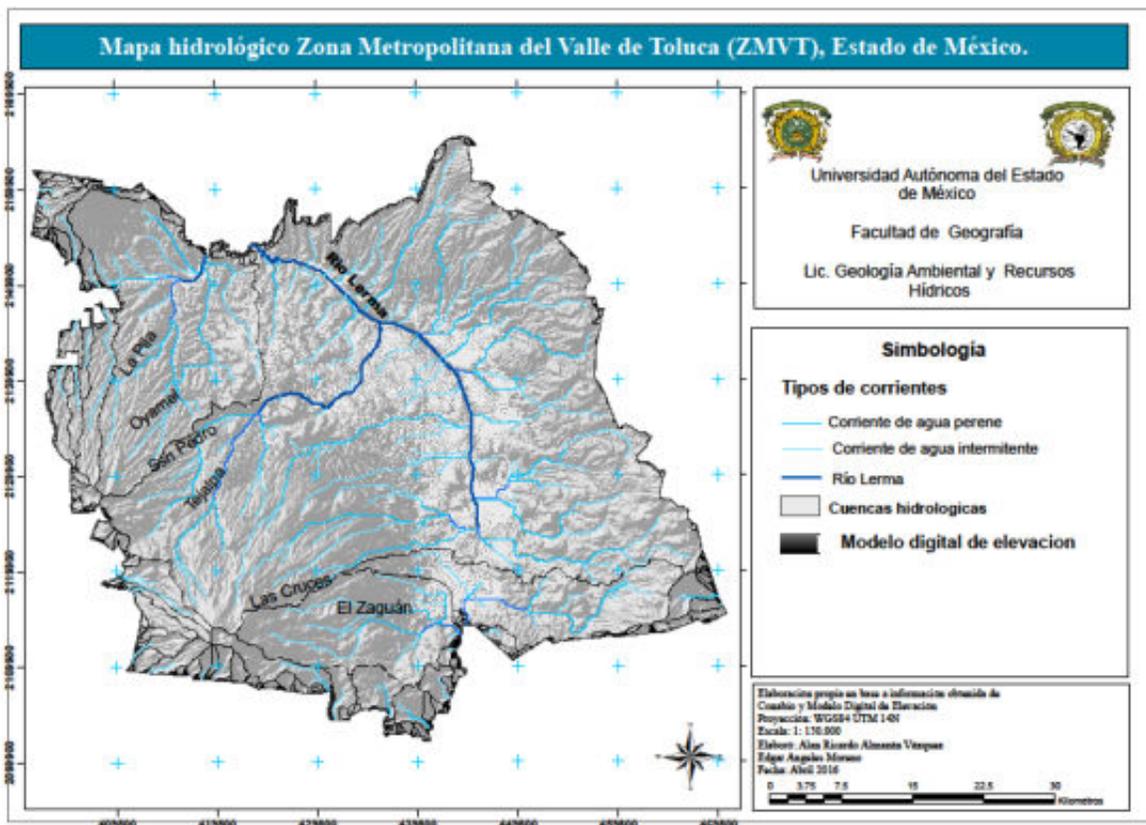


Figura 13 Mapa hidrológico de la ZMVT, elaboración con base a información obtenida de CONABIO y modelo digital de elevación.

El río Lerma, el Lago de Chapala y el río Santiago constituyen uno de los sistemas hidrológicos más importantes del país y en parte de la ZMVT, por su recorrido total del río Lerma desde sus orígenes en la Laguna de Almoloya del Río, hasta la desembocadura del Santiago en el Océano Pacífico. En la cuenca de Toluca existen ríos, lagunas, presas y bordos que son importantes para las actividades agrícolas de la región; sin embargo, la mayoría de ellas se encuentran contaminadas, ya que son utilizadas como receptores de aguas negras, perdiendo la función de mantener el equilibrio de la humedad entre la atmósfera y el suelo.

Existen además flujos subterráneos, uno proviene del Nevado de Toluca, dirigiéndose en un sentido norte para salir en Ixtlahuaca, otro tiene su origen en la Sierra de las Cruces, tomando rumbo al oeste para desembocar al Pie de la Sierra en la zona de las Antiguas Lagunas de Lerma-Almoloya (Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Lerma, 2002). Las principales zonas de recarga de agua subterránea se originan por las aportaciones provenientes de las elevaciones circundantes del Nevado de Toluca, Sierras de Monte Alto, Las Cruces, Sierra la Venta, Sierra de Tenango, Cerro de Jocotitlán y Cerro de Santa Cruz Tepexpan.

3.3 Edafología

En la ZMVT se encuentran 9 unidades de suelo: los 3 tipos de suelo que juntos representan el 76.8% son el feozem, vertisol y andosol. Las características principales de las unidades de suelo (CONABIO, 2014), y su porcentaje en la ZMVT se pueden observar en el gráfico, mismos se describen a continuación de mayor a menor porcentaje de superficie para la zona de estudio (figura 14).

- **Feozem (45%)** Símbolo: H. Del griego *phaeo*: pardo; y del ruso *semljá*: tierra. Literalmente, tierra parda. Suelo con una capa superficial oscura, algo gruesa, rica en materia orgánica y nutrientes. Son suelos que toleran exceso de agua, con drenaje, de fertilidad moderada. Permeables.
- **Vertisol (19.8 %)** Símbolo: V. Del latín *vertere*, voltear. Literalmente, suelo que se revuelve o que se voltea. Suelos muy arcillosos en cualquier capa a menos de 50 cm de profundidad; en época de secas tienen grietas muy visibles a menos de 50 cm de profundidad, siempre y cuando no haya riego artificial. Estos suelos se agrietan en la superficie cuando están muy mojados. Suelos muy impermeables. Debe controlarse el agua para que no se inunden. Cuando se secan son duros para labores de labranza. Admiten variedades de cultivos. Rinden buenas cosechas.
- **Andosol (12 %)** De las palabras japonesas *an*: oscuro; y *do*: tierra. Literalmente, tierra negra. Suelo de origen volcánico, constituidos principalmente de ceniza, la cual contiene alto contenido de alófono, que le confiere ligereza y untuosidad al suelo. Tienen alta capacidad de retención de humedad, en condiciones naturales presentan vegetación de bosque o selva. Tienen generalmente bajos rendimientos agrícolas debido a que retienen considerablemente el fósforo y este no puede ser absorbido por las plantas. Son muy susceptibles a la erosión eólica.

- **Luvisol (7.3 %)** Símbolo: L. Del latín luvi, luo: lavar. Literalmente, suelo con acumulaciones de arcilla. Suelos con mucha arcilla acumulada en el subsuelo. Se diferencian de los Acrisoles en que son más fértiles en general. Suelos en los que su uso está en función con los suelos correspondientes al grupo. Son impermeables.
- **Cambisol (7 %)** Del latín cambiare: cambiar. Literalmente, suelo que cambia. Estos suelos son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en los de zonas áridas. Suelos con un subsuelo muy diferente a simple vista en color y textura a la capa superficial. La capa superficial puede ser oscura, con más de 25 cm de espesor pero pobre en nutrientes y en ocasiones no existe. Suelos pobres en materia orgánica. Suelos de características variables en su horizonte A. Son de color oscuro y claro. Permeables.
- **Histosol (1.8 %)** Del griego histos: tejido. Literalmente, suelos de tejidos orgánicos. Son suelos con muy alto contenido de materia orgánica (más del 20 % en peso), generalmente de color negro, esponjoso, ligero y con alta capacidad de retención de humedad. Se encuentran restringidos a sitios donde se acumulan desechos orgánicos y agua tales como pantanos.
- **Planosol (1.7 %)** Símbolo: W. Del latín planus: plano, llano. Connotativo de suelos generalmente desarrollados en relieves planos que en alguna parte del año se inundan en su superficie. Suelos situados generalmente en depresiones topográficas. Tiene un subsuelo arcilloso que disminuye el drenaje considerablemente. Suelos de drenaje deficiente. Suelos susceptibles de erosionarse. Pobres en nutrientes. Su segunda capa horizonte (B), es tepetata y arcillosa. Son impermeables, drenaje deficiente. Algunos de los subgrupos son adecuados para la practicultura con

buenos resultados. Pueden destinarse al cultivo de raíces someras (espesor de 10 a 50 cm).

- **Regosol (1.5 %)** Símbolo: R. Del griego reghos: manto, cobija o capa de material suelto que cubre a la roca. Suelos poco desarrollados, sin estructura y de textura variable, muy parecidos a la roca madre. Suelos sueltos como dunas, playas, cenizas volcánicas, ningún horizonte. Muy permeables.
- **Litosol (1.3 %)** Símbolo: I. Del griego lithos: piedra. Literalmente, suelo de piedra. Suelo con menos de 10 cm. de espesor. No aptos para cultivos de ningún tipo. Pueden destinarse al pastoreo.
- **Fluvisol (0.1 %)** Suelos aluviales. Del latín fluvius: río. Literalmente, suelo de río. De fácil manejo. Necesitan fertilización. Son muy permeables. Suelos arenosos, ligeros.
- Y el resto (**1.6 %**) corresponde a superficie de agua y asentamientos.

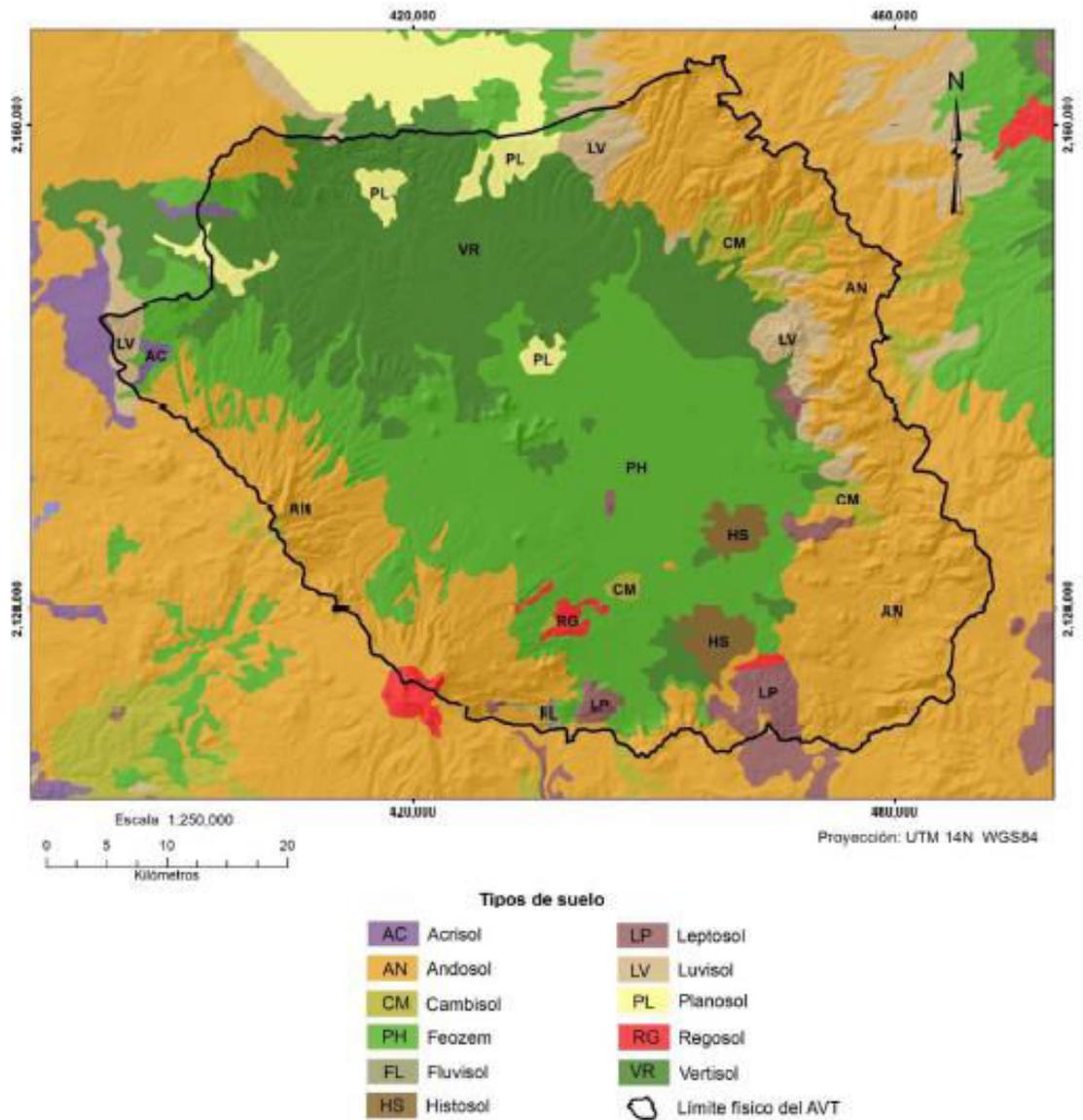


Figura 14 Edafología de la región del acuífero del valle de Toluca (CONABIO, 2012)

4. Metodología y materiales

Para alcanzar el objetivo principal y los objetivos específicos de este trabajo de investigación se emplearon metodologías y técnicas concernientes al método científico, a la topografía, geomorfología, geología estructural y geología ambiental. En este estudio morfoestructural de la ZMVT se empleó algunas veces el enfoque inductivo y otras el enfoque deductivo.

El mapa topográfico es una representación de la superficie terrestre mediante el uso curvas de nivel las cuales tienen como finalidad mostrar los rasgos naturales del relieve de la Tierra (INEGI, 2010) y en conjunto con las curvas de nivel, suelen incluirse otras variables geográficas como la vegetación, los suelos, hidrografía y toponimia; todas ellas con su correspondiente color y símbolo. Estos mapas topográficos sirvieron de base para elaborar los mapas temáticos geomorfológicos o geológico-estructurales de la ZMVT.

La Geomorfología es el estudio del relieve terrestre, procesos que dieron origen a este como tectonismo, vulcanismo, erosión, y depósito, así como la determinación de la edad absoluta o relativa de las formas de relieve, historia del desarrollo del relieve (Lugo-Hubp, 1998). En la geomorfología existen metodologías y técnicas variadas para caracterizar las formas naturales de un relieve y procesos, en este trabajo se elaboró un mapa hipsográfico, un mapa de pendientes y un mapa geomorfológico.

El mapa hipsométrico es una representación de las alturas del terreno agrupadas en rangos de colores. Refleja el relieve mediante curvas de nivel que conectan puntos de la misma altura. Para la elaboración del mapa hipsométrico se utilizaron los mapas topográficos digitales a escala 1:50 000 de INEGI y con intervalos entre curvas de nivel de 20 m. Una vez integrados en el sistema de información geográfica, el Modelo de Elevación Digital (MDE) se construyó mediante triangulación de Delaunay. El modelo resultante TIN (*triangulated irregular network*)

se transformó a una estructura matricial regular con 50 m de tamaño de celda. Después se utilizó la aplicación *ArcGIS* 10.2.2 con la extensión *Spatial Analyst* y se generó la estructura TIN a partir de las curvas de nivel originales se utilizó la extensión *3D Analyst*. (Lindsay W. 1999)

El mapa de pendientes es una técnica cartográfica en la geomorfología aplicada para representar la variable morfométrica del gradiente de la pendiente de terreno en grados. La pendiente topográfica es la inclinación de una superficie con respecto a la horizontal y el gradiente de la pendiente en porcentaje de 15 % (Rodrigo, M. L., Roura, E y Obrador, A. 1984). Cuando existe una falla geológica se expresa en un escarpe en donde la pendiente tiene valores que tienden a la vertical, por ello en este estudio se tomó en cuenta el mapa de pendientes.

El mapa de pendientes se elaboró con el software *ArcGIS* 10.2.2 empleando las curvas de nivel de la zona de estudio en formato vectorial para crear un TIN (*Triangulated Irregular Network*) en el software *ArcGIS* 10.2.2, usando la herramienta *3D Analyst / Create Tin from features*. A partir del TIN se convirtió a un raster de elevación (*convert tin to raster*) para después crear una superficie y pendiente (*Surface and Slope*) y por último se empleó la herramienta de análisis espacial (*Spatial Analyst*) para lograr el resultado.

Los mapas geomorfológicos es una de las formas gráficas más apropiadas y sintéticas para mostrar la distribución de la geoformas y unidades de relieve, siendo su objetivo el de proporcionar una imagen precisa y sistemática de las formas y procesos de la superficie terrestre (Peña-Moné, 1997). Los mapas geomorfológicos pueden tratar con contenidos morfométricos, morfológicos, morfográficos, morfogenéticos, morfocronológicos y morfolitoestructurales (Peña Moné, J.L. 1997). Para la construcción de un mapa geomorfológico de la ZMVT se partió del análisis de mapa topográfico e interpretación de imágenes de google Earth definiendo e identificando unidades morfológicas, posteriormente se realizó el reconocimiento de las unidades de relieve con base a su origen endógeno o exógeno.

Los mapas hipsográficos, de pendientes y geomorfológicos se analizaron por separado y luego de manera integral desde el punto de vista de la geología estructural.

La geología estructural estudia las estructuras geológicas de deformación (fallas, fracturas, pliegues) de la corteza terrestre desde escala microscópica a escala regional. Las metodologías y técnicas que se emplearon son:

- a) Interpretación de estructuras a partir de imágenes de satélite extraídas de Google Earth y mapas geomorfológicos elaborados en este trabajo y algunos de referencias.
- b) Toma de datos estructurales de campo mediante el empleo de brújula tipo brunton. Colocación de estructuras y tipos de fracturas en un mapa base.
- c) Definición del tipo de fallas, fracturas y grietas en campo.
- d) Integración de las estructuras de campo con la interpretación de estructuras de gabinete.

En el análisis de las fotografías aéreas se empleó la fotointerpretación que consistió en interpretar geológicamente las diferentes texturas y tonalidades de escalas de colores de la fotografía aérea y después se un mapa estructural de la ZMVT.

Se empleó la brújula tipo brunton para caracterizar la actitud estructural de fallas, grietas y fracturas, así como la orientación de las laderas y otras lineaciones naturales.

En el campo se emplearon criterios y clasificaciones geológicas de fracturas y algunas geotécnicas muy básicas referentes a tipo de grieta, su geometría, espaciamientos y tipo de afectación estructural a la obra civil.

En lo que respecta a la geología ambiental se definieron e identificaron los fenómenos perturbadores que generan zonas de peligro por efecto de fracturamiento, agrietamiento o fallamiento.

La identificación de los peligros geológicos perturbadores de la ZMVT se llevó a cabo mediante dos métodos: directo e indirecto. El método directo fue la observación sistemática del fenómeno y sus efectos, por ejemplo, fracturamientos en estructuras civiles como son casas, edificios, banquetas, etc. El método indirecto fue la recopilación y análisis de información documental (bibliográfica, hemerográfica, fotográfica, cartográfica) referente a reportes de protección civil y notas periodísticas. El método indirecto permitió detectar mediante indicadores de peligro ante la ocurrencia pasada de eventos de subsidencia, agrietamientos, movimientos de ladera, fallas y fracturas.

Con base en la integración de los resultados de geomorfología, geología estructural y de geología ambiental, se construyó un mapa de peligros que contiene algunos indicadores de peligro que muestran la exposición a la que se encuentran diferentes áreas urbanas habitadas de algunos de los municipios que integran a la ZMVT.

5. Geomorfología

5.1 Análisis geomorfológico como contribución a los estudios de peligro por fallamiento y fracturamiento en la ZMVT.

En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se pueden encontrar a grandes rasgos dos tipos de formas de relieve que son la de origen endógeno y las de origen exógeno. Los procesos endógenos son los creadores del relieve y los procesos exógenos son los niveladores de la superficie terrestre mediante la destrucción del relieve por diversos agentes de erosión (agua, aire, gravedad) y en otras partes relleno de depresiones (acumulación) (Lugo-Hubp, 1988).

Relieve de origen endógeno

Los relieves de origen endógeno que presenta la ZMVT son variados y asociadas a un contexto volcánico y de fracturas. La ZMVT contiene varios tipos de relieve volcánicos acumulativos que son: estratovolcanes, laderas acumulativas de piroclastos, conos monogenéticos, domos, derrames lávicos y flujos piroclásticos (Figura 15). Los estratovolcanes limitan a la ZMVT orográficamente ya que los parteaguas más importantes están en estas formas de relieve. En el suroeste de la ZMVT se encuentran los estratovolcanes Nevado de Toluca y San Antonio (Figura 15), estos volcanes presentan una combinación de relieves de origen explosivo y efusivo, como una combinación de ambos, y que son cráteres, domos, planicies de piroclastos, y derrames lávicos cubiertos por piroclastos. En los trabajos de Espinosa-Rodríguez, (2003) y Espinosa-Rodríguez et al. (2014) se puede encontrar una descripción detallada de las formas del relieve para estos estratovolcanes. En la Sierra de Las Cruces García-Palomo et al. (2008) propone la presencia de ocho estratovolcanes que rebasan los 3000 m snm y que siguen morfolineamientos con dirección NW-SE (Figura 15).

En los bordes de los estratovolcanes de la ZMVT se pueden identificar las laderas acumulativas con depósitos de material piroclástico. En los estratovolcanes San Antonio y Nevado de Toluca se localizan hacia la parte norte y noreste y cubren una gran área de la ZMVT (Figura 15). En la Sierra de Las Cruces las laderas acumulativas de piroclastos se localizan hacia el oeste y suroeste y abarcan grandes áreas en la cercanía del norte de Temoaya y Xonacatlán (Figura 15).

Los conos monogenéticos y tefra abundan en el este y sureste de la ZMVT. Muchas de estos relieves volcánicos están alineados a fracturas y fallas porque se ven varios conos en dirección E-W (Figura 15). En esta región, alrededores de Xalatlaco, los conos monogénéticos forman un campo volcánico con formas de relieve de tipo efusivo como derrames de lava y conos volcánicos; estos relieves son muy similares desde el punto de vista geomorfológico y litológico a los volcanes de la Sierra Chichinautzin en el sur de la Ciudad de México en donde las edades de los volcanes, desde el punto de vista geológico, van de los 1600 a 5000 años de edad aproximadamente (Siebe et al., 2004). La presencia de derrames de lava muy bien definidos y poco afectados por los procesos exógenos sugiere edades muy jóvenes del relieve. Los relieves de domos están ubicados en la Sierra de Las Cruces, en la ciudad de Toluca, y otros en las partes altas de los estratovolcanes de Nevado de Toluca y San Antonio (Espinosa-Rodríguez et al., 2014). En la Sierra de Las Cruces los domos están relacionados especialmente con formas de relieve de estratovolcanes y en ocasiones se presentan como complejos de domos. Los domos se presentan relacionados con formas de relieve explosivas efusivas como derrames de lava cubiertas por piroclastos. García-Palomo et al. (2008) realiza un análisis morfoestructural que indica que varios domos de la Sierra de Las Cruces se presentan como morfolineamientos y siguiendo a fracturas con direcciones N-S y NW-SE.

En el sur de la ZMVT, hacia Tenango, las formas de relieve que se presentan de conos monogénico y tefra. Estos conos monogénicos están compuestos de piroclastos y derrames de lava. Muchos de estos relieves están alineados a fracturas y fallas porque se ven varios conos en dirección E-W (Figura 15) y esto fue mostrado en un estudio morfoestructural de Norini et al. (2006), en donde demuestra la presencia de fallas y fracturas activas que moldean activamente las formas de relieve acumulativas volcánicas de esta región.

Relieve de origen exógeno

Los relieves formados por procesos exógenos de la ZMVT se presentan de dos tipos erosivos y acumulativos. Los erosivos comprenden valles fluviales, circos de erosión, cárcavas y escarpes de laderas. Los relieves acumulativos comprenden planicies formadas por depósitos fluvio-lacustres y piroclastos, planicies dominadas por depósitos fluvio-lacustres sin piroclastos, terrazas fluviales, abanicos aluviales y escarpes de laderas.

Los valles fluviales se presentan en las laderas altas de estratovolcanes, y en las planicies fluvio-lacustres. En las laderas altas de los estratovolcanes los valles presentan formas muy angostas y estrechas; en estos valles dominan los procesos de erosión que son controlados por el factor gravedad y la pendiente topográfica. Es común que se encuentren circos de erosión en estas laderas altas de estratovolcanes como el caso de Sierra de Las Cruces (Figura 15) y que presentan una actividad intensa con la presencia de reptación en los suelos y otros procesos de remoción de masa como deslizamientos. Los valles fluviales en las planicies fluvio-lacustres con depósitos piroclásticos presentan valles angostos y profundos debido a la presencia de intercalaciones de depósitos sedimentarios y piroclásticos; los patrones del drenaje que dibujan estos valles son de tipo sinuoso y dendrítico. En las planicies fluvio-lacustres dominadas por sedimentos como las zonas de

Metepec, Lerma, Santiago Tianguistengo, y una parte del área metropolitana de Toluca, los valles son más amplios a veces comunicados por lagos y ciénegas.

Las terrazas fluviales son más frecuentes que se presentan en los bordes de valles fluviales de las planicies fluvio-lacustres, muchas de estas terrazas fluviales atestiguan períodos de inundaciones y cambios en la dirección de las corrientes fluviales activas.

Los patrones de drenaje que esbozan los valles fluviales que se presentan a lo largo de la ZMVT van desde dendrítico, a rectilíneo y radial. El dendrítico se presenta en los relieves más antiguos aparentemente, mientras que el drenaje rectangular aparece en algunas partes de la Sierra de Las Cruces (García-Palomo et al., 2008) y del volcán San Antonio sugiriendo el control por fracturas y fallas geológicas. En el límite sur de la ZMVT, en Tenango, se presenta un patrón de drenaje rectangular y lineal controlado por el sistema de falla de Tenango (Norini et al., 2006). En la ciudad de Toluca parece haber control de los ríos a lo largo de direcciones NE-SW, N-S y E-W lo que sugiere un control estructural como se verá más claramente en las secciones de geología estructural (Figura 15).

Los abanicos aluviales están al pie de las mayores sierras volcánicas como la Sierra de Las Cruces, el sistema montañoso Nevado de Toluca-Volcán San Antonio y al pie de la Falla Tenango. Los abanicos aluviales se presentan coexistiendo con las formas de relieve acumulativo volcánicas de tipo laderas volcánico acumulativas de material piroclástico como puede verse en las cercanías de Jiquipilco, Temoaya, Ixtlahuaca y Atarasquillo. En otras partes los abanicos se presentan al pie de fracturas como en algunas partes de la Sierra de Las Cruces (García-Palomo et al., 2008). La presencia de abanicos es abundante y sugiere que estos tienen un carácter importante en la infiltración hídrica hacia la cuenca del valle de Toluca (Figura 15).

Los escarpes de laderas se presentan en la Sierra de Las Cruces y están relacionados con lineamientos estructurales (García-Palomo et al., 2008). En algunos lugares los escarpes de ladera coinciden o coexisten con circos de erosión como en la Sierra de Las Cruces y el estratovolcán Nevado de Toluca (Espinosa-Rodríguez et al., 2014) en parte debido a la intersección entre las laderas de volcanes con fracturas geológicas.

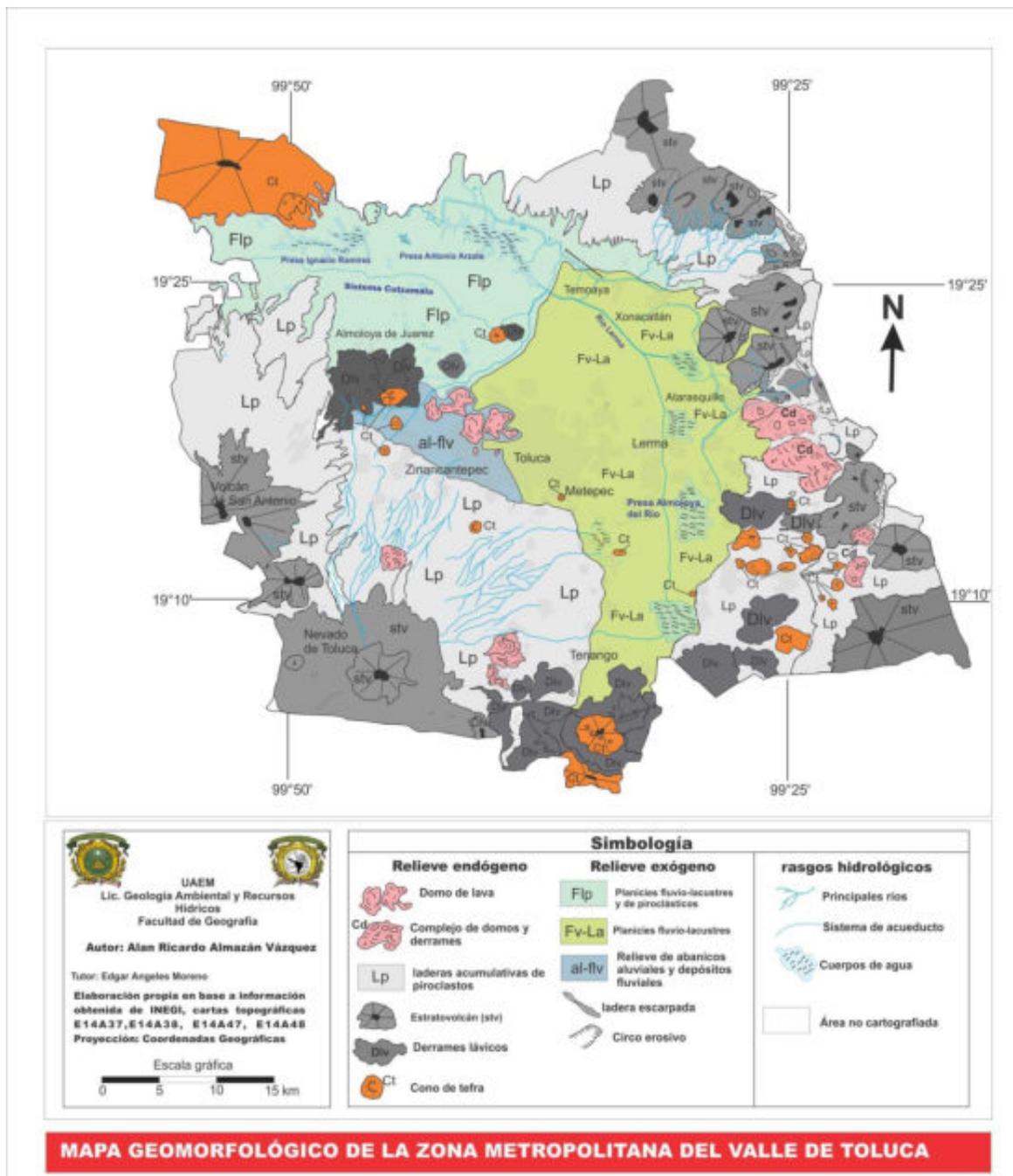


Figura 15 Mapa geomorfológico de la ZMVT. Elaboración con base en información obtenida de INEGI, cartas topográficas E14A37, E14A38, E14A4, E14A47, E14A48

5.2 Hipsometría de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

El mapa hipsométrico de la ZMVT se realizó para 7 clases de rangos de elevación, las cuales son mostradas en la figura 16. Las zonas más bajas de la ZMVT oscilan de 2332 a 2674 msnm, en estas elevaciones se ubican las siguientes formas de relieve: llanuras lacustres, lomeríos de cenizas volcánicas, cuerpos de agua y algunas geoformas de flujos piroclásticos. La mayoría de las poblaciones se ubican en alturas de 2332 a 2674 msnm y coinciden con los cuerpos de agua y llanuras lacustres (Figura 16). Entre 2800 y 3000 m sobre el nivel del mar aparecen las zonas de inicio de las geoformas de abanicos aluviales y hay una gran cantidad de arroyos.

Se realizó la combinación de la hipsometría con los lineamientos estructurales (fracturas y fallas) se puede observar que en las zonas de geoformas volcánicas que limitan a la ZMVT se ve un fuerte control por los lineamientos. Se puede ver que es un relieve muy joven porque presenta elevaciones de 2716 a 4645 msnm y por el grado de disección del relieve mostrado por las cañadas y con las que coinciden lineamientos estructurales, con direcciones NE-SW y E-W (Figura 16).

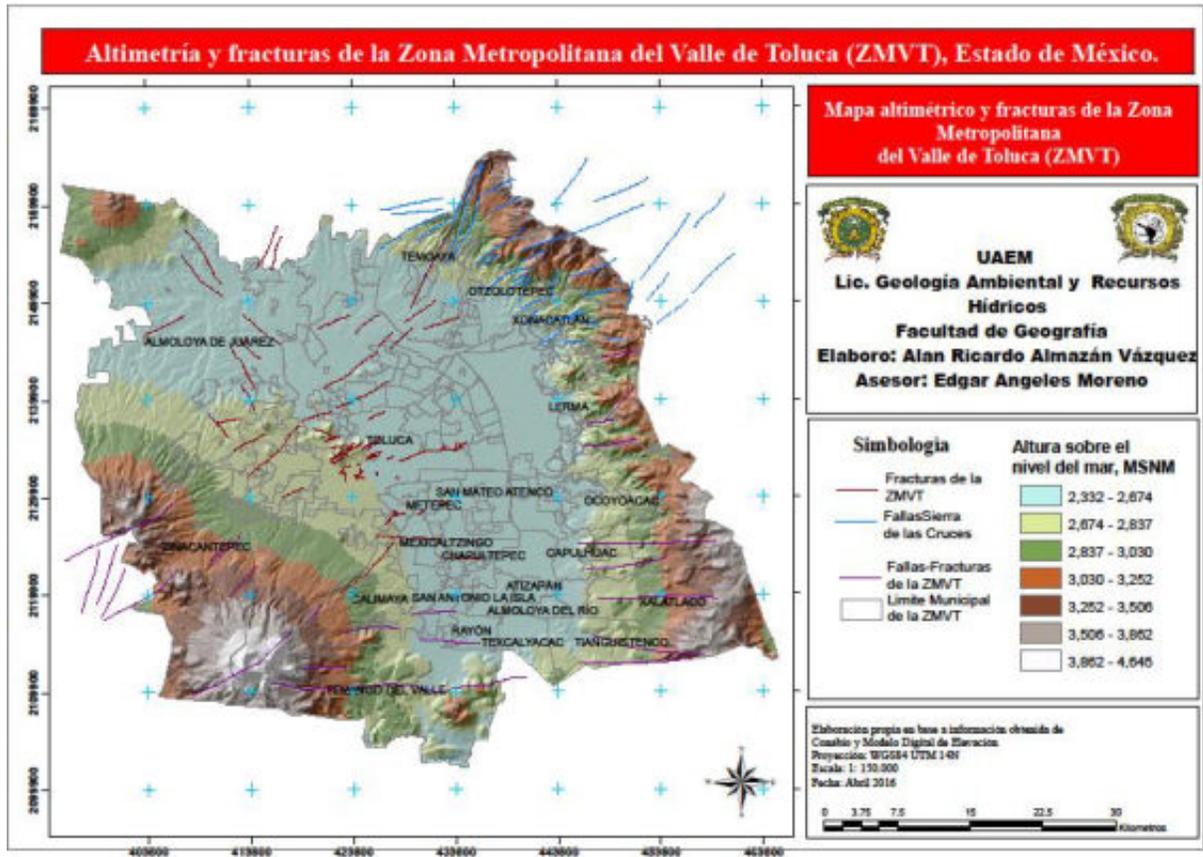


Figura 16 Mapa altimétrico de la ZMVT. Elaboración con base en información obtenida de CONABIO y modelo digital de elevación.

5.3 Analisis de pendientes en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

El mapa de pendientes muestra 7 rangos de valores de pendiente que fueron los mejor ajustados para la ZMVT (Figura 17). Los valores van de menores a 2°, entre 2° y 3°, 10° a 15°, 20° a 30° y mayores de 45°. Se puede ver que en el área con valores de pendiente menores a 2° se encuentran la gran mayoría de formas de relieve como llanuras, planicies y valles fluviales, así como las depresiones lacustres; esta área abarca por lo menos un 40% del total de la ZMVT manejada en este trabajo. El cambio de pendiente es más abrupto hacia el pie de monte con la Sierra de Las Cruces en donde hay un cambio de pendiente de 3° a 10° que se ubican poblaciones como Temoaya, Xonacatlán, Atarasquillo, Lerma y Capulhuac; esto sugiere que hay un basculamiento natural importante en el borde oriente y nororiente de la ZMVT (Figura 17). Los valores entre 30° y 45° están relacionados con valores de elevaciones de 2966-3980 m snm estos ambientes geomorfológicos implican procesos de reptación de suelo y la presencia de escarpes con pendientes fuertes como es el caso de la Sierra de Las Cruces.

Al combinar el mapa de pendientes y los lineamientos estructurales de la ZMVT se puede ver que los mayores grados de pendientes que van de los 15° hasta más de 45° grados, se ubican en los límites montañosos de la ZMVT coincidiendo con los valores mayores de altimetría y que coinciden con algunos lineamientos de fracturas que se ubican en cañadas que dividen a estratovolcanes y a complejo de domos en la Sierra de las Cruces, sierra de San Antonio y Nevado de Toluca (Figura 17).

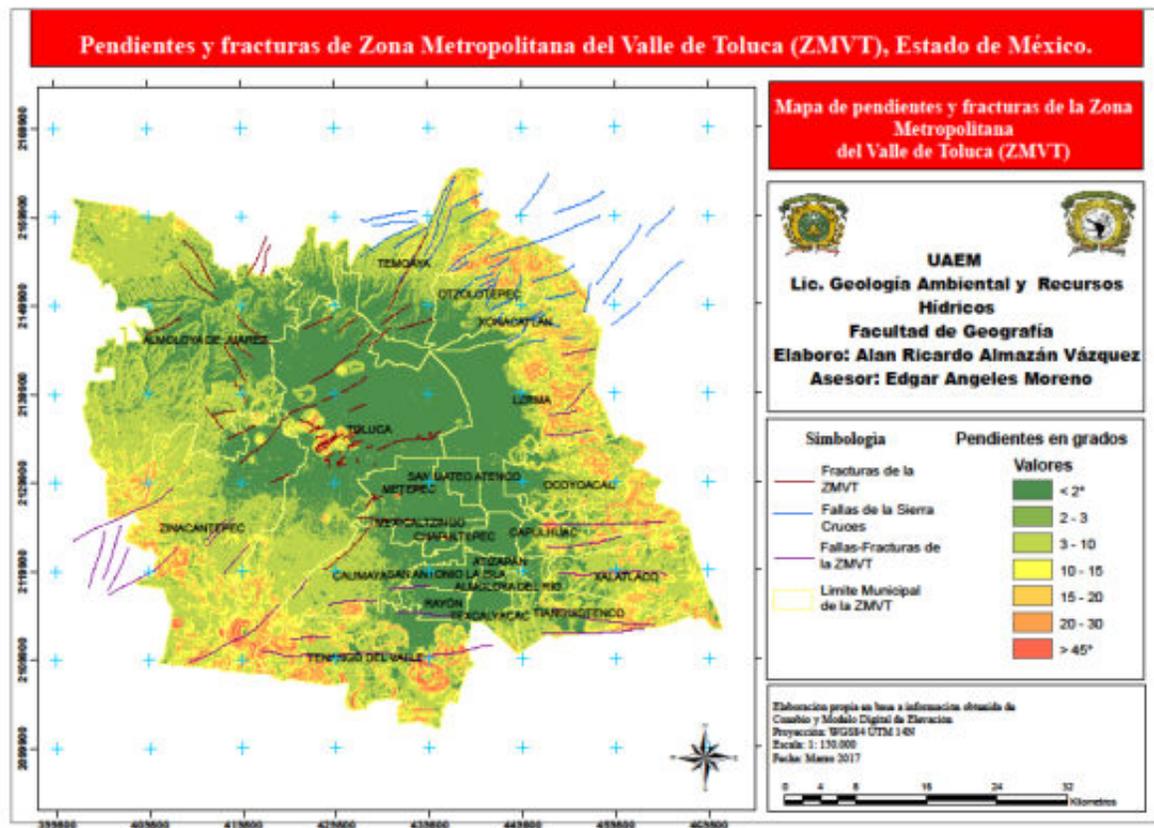


Figura 17 Mapa de pendientes de la ZMVT. Elaboración con base en información obtenida de CONABIO y modelo digital de elevación.

6. Geología estructural de la Zona Metropolitana Valle de Toluca

En diversas zonas de la ZMVT han sido reportados, desde hace más de 10 años, la presencia de agrietamientos en el suelo de acuerdo a la Coordinación Municipal de Protección Civil de Toluca (CMPCT), 2016, que han provocado la afectación de edificios, casas habitación, infraestructura urbana y algunas zonas de cultivos. Estas afectaciones se han reportado por Protección Civil Estatal y en notas periodísticas ocurriendo principalmente en las colonias Independencia, Morelos, San Buenaventura, Santiago Miltepec, Los Ángeles, San Pedro Totoltepec y Santa María Totoltepec. El presente capítulo trata de la descripción, orientación espacial, distribución, análisis y posible origen de los fracturamientos y agrietamientos reportados y de nuevos datos de campo obtenidos en este trabajo (Tabla 1 en anexos).

Una gran parte del fracturamiento cartografiado en campo y compilado no sigue direcciones aleatorias o desordenadas como inicialmente se había pensado, sino que presenta direcciones sistemáticas con orientación noreste-suroeste (NE-SW) y este-oeste (E-W) principalmente y en menor medida norte-sur (N-S). Esto sugiere una relación de las fracturas y fallas de la ZMVT con su contexto geológico regional (figura 18).

Existen fallas importantes por su longitud de 5 a 8 Km que afectan la ZMVT las cuales presentan desplazamiento tipo normal y con orientación NE-SW y E-W y que en este trabajo se denominan Falla Totoltepec y Falla La Virgen (figura 18). La densidad del fallamiento y fracturamiento se concentra en la Delegación de Toluca y los Cerros de La Teresona, las fracturas y fallas de esta zona se han denominado en este trabajo como fallas y fracturas La Mora, Miltepec, Lerdo, Cerro del Calvario, Coatepec, Teresona, y Sierra Morelos; estas fallas y fracturas presentan orientación NE-SW y E-W; estas fracturas y fallas presentan segmentos de 1 a 2 km de longitud. Otras fallas con orientación NW-SE y N-S se han identificado con una longitud menor de 1 km en su traza de falla como por ejemplo las fallas Oxtotitlán.

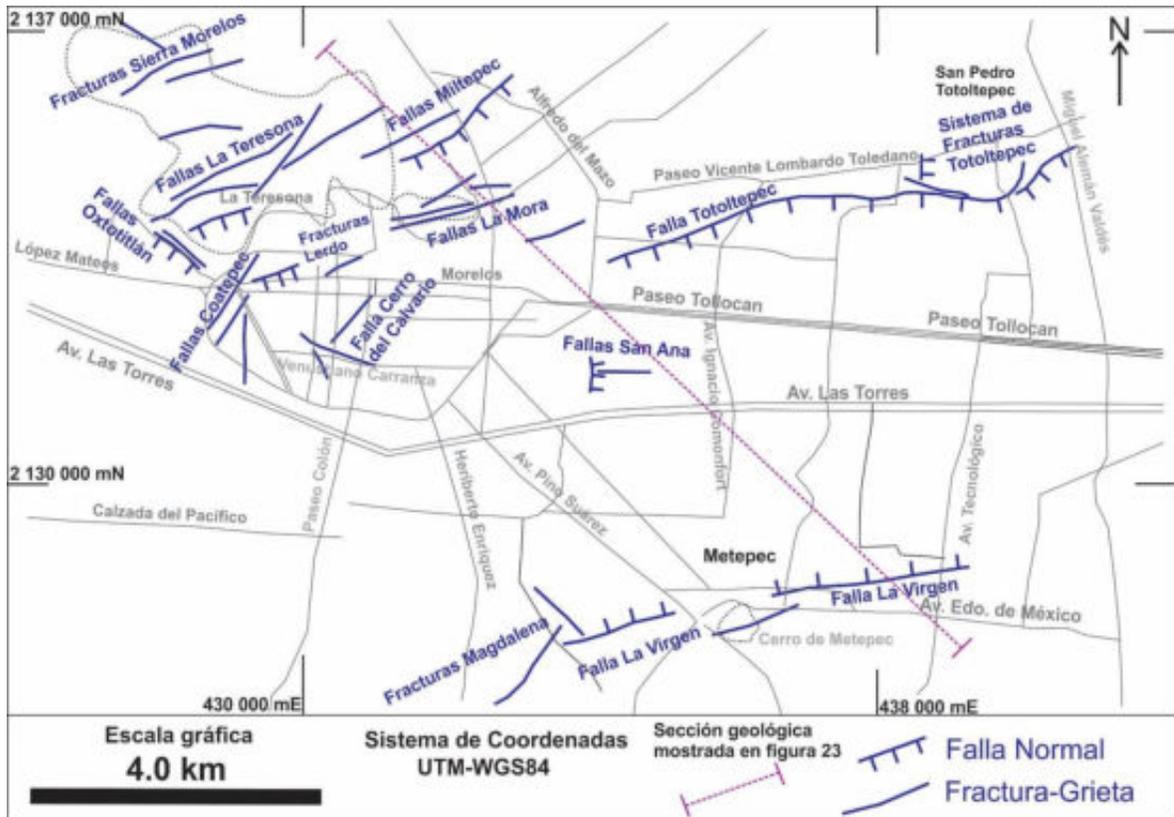


Figura 18 Sistemas de fallas, grietas y fallas en la parte central de la ZMVT

Las grietas, fracturas y fallas estudiadas en este trabajo afectan una estratigrafía de la ZMVT constituida por tres grandes grupos de rocas y depósitos: depósitos aluviales y fluvio-lacustres (Qal-Qla), rocas efusivas volcánicas (andesíticas-dacíticas, Tpl(A-Da) y basálticas, Qho (A-B)) y depósitos piroclásticos intercalados con volcanosedimentos (Tpl (Lh-TA)) (Servicio Geológico Mexicano, 2012 y mapa geológico de INFOMEGEN de 2009). Los depósitos aluviales y fluvio-lacustres (DAFL) son de probable edad del Holoceno. Las rocas volcánicas efusivas (RVE) son de dos tipos por su composición unas andesítico-dacíticas y otras basálticas; Las rocas andesítico-dacíticas se formaron en estructuras volcánicas de domo y lava-domo, mientras las basálticas en estructura volcánica de conos monogenéticos, piroclásticos y de escoria. Estas rocas basálticas son más jóvenes

que algunos de los depósitos piroclásticos basados en observaciones de campo. Las rocas piroclásticas y volcanosedimentos (RPVS) abarcan la mayor parte de la ZMVT y comprenden flujos piroclásticos, depósitos de caída y oleadas piroclásticas que están intercaladas con volcanosedimentos, sus edades van del Plioceno al Holoceno (Figura 19).

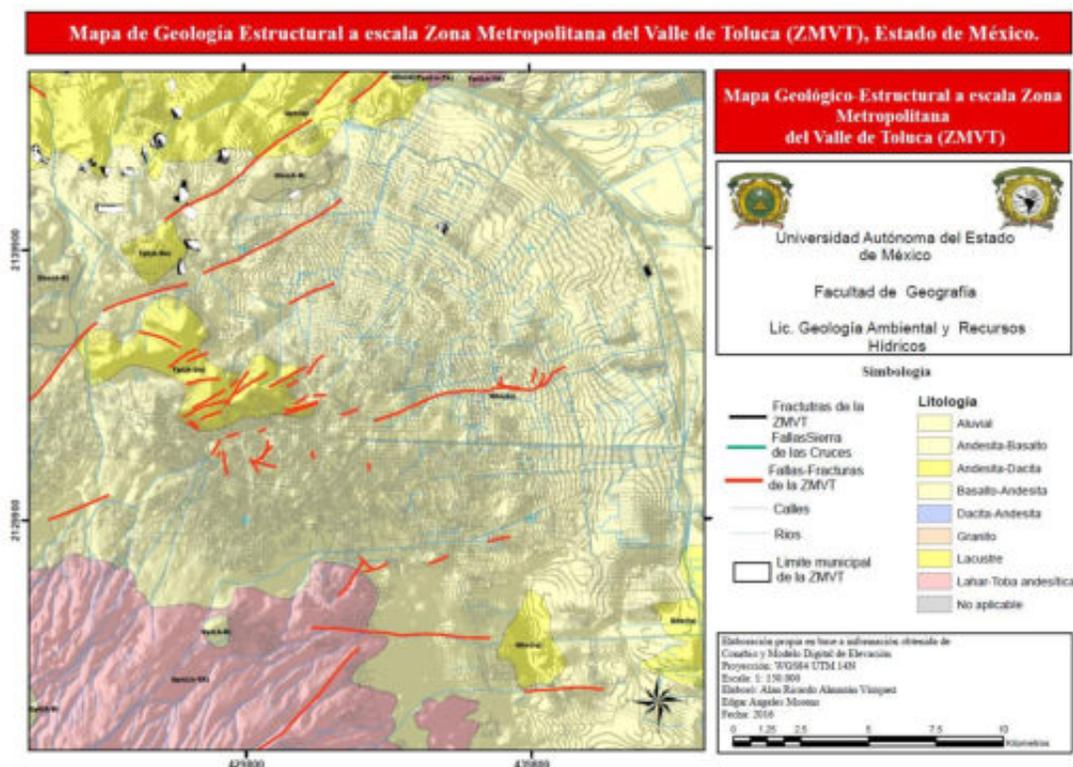


Figura 19 Mapa de geología estructural de la ciudad de Toluca sobre la geología de INFOMESEM, 2009.

6.1 Tipos de fracturas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

6.1.1 Fracturas y grietas

Las grietas y fracturas en la ZMVT están asociadas a sistemas de fracturamiento y fallas mayores por su longitud. En este apartado se describen los sistemas de fracturas ubicados al este y sureste de la Delegación Toluca como son fracturas Totoltepec, de la falla Totoltepec, La Virgen, Magdalena y Santa Ana; también se tratan las fracturas y grietas cartografiadas en Santiago Miltepec, La Mora, Cerro La Teresona, Cerro Chichipilcas, centro de Toluca, Cerro de Coatepec, Cerro del Calvario y Delegación de San Mateo Oxtotitlán (figura 18) muchas de ellas asociadas a fallas activas que se han definido en este trabajo.

Fracturas Totoltepec

Características estructurales

Las geometrías estructurales de las grietas y fracturas que se presentan a lo largo de la falla Totoltepec y en el sistema de fracturas Totoltepec son de tipo en escalonamiento o echelón, en zonas de relevo, en sigmoides extensionales, anastomosadas, paralelas, en arreglo riedel, conjugadas y terminaciones de cola de caballo y ramificadas (figura 20). Las geometrías de fallas y fracturas encontradas en el centro de la ZMVT (figura 20) son: a) fracturas escalonadas y en echelón; b) sigmoides extensionales a lo largo del rumbo de las fallas principales; c) fracturas conjugadas; d) fracturas en cola de caballo o ramaleada; e) fracturas y fallas paralelas y f) fracturas en cola de caballo.

Los arreglos geométricos de estas fracturas sugieren un régimen de deformación extensional en su mayor parte y relacionadas a la cinemática de la falla Totoltepec. Las orientaciones de las fracturas y grietas son principalmente NE-SW sin embargo en San Pedro Totoltepec se tiene una geometría de cola de caballo y ramificada en donde hay fracturas con direcciones N-S. El rumbo de la mayoría de las fracturas y

grietas tiene valores de N70°E, N60°E y E-W. Las fracturas de la Falla Totoltepec continúan hacia la dirección oriente cerca del Cerrillo Vista Hermosa.

Afectación a infraestructura urbana

El fracturamiento se concentra principalmente en San Pedro Totoltepec y Santa María Totoltepec, de las cuales se describe a continuación los problemas de fracturas y agrietamientos.

En San Pedro Totoltepec el fenómeno del agrietamiento se ha presentado según afectados de las colonias desde hace aproximadamente 15 años (CMPCT, 2016) en donde notaron la presencia de grietas en la superficie de los terrenos de cultivo y en la afectación directa a casas habitación, así como a las redes de agua potable y drenaje. En el área de San Pedro Totoltepec y Santa María Totoltepec, es donde se presentan los daños más graves en casas habitación, sobresaliendo las siguientes:

En el Callejón de las Delicias en el área de San Pedro Totoltepec, se presenta una casa (que tuvo que ser desalojada), totalmente dañada, pasando exactamente por la parte central de ella una grieta asociada a la falla Totoltepec. En el patio exterior e interior de la casa, se puede observar que la grieta presenta un desplazamiento horizontal de aproximadamente 80 centímetros, y un desnivel vertical de 1.40 metros, encontrándose el bloque caído hacia el sur. La traza del fracturamiento se puede identificar en el terreno de la parte trasera del predio, por la irregularidad del mismo, siguiendo una dirección oriente-poniente. Sobre la misma calle se han presentado grietas sobre todo en temporadas de lluvias, la grieta abrió el trazo de la calle de terracería habiéndose y presentando una profundidad aproximadamente de 1 metro y un ancho. El agrietamiento se prolonga hacia el poniente, afectando a otra casa a escasos 10 metros de la anterior, donde se puede apreciar un hundimiento del suelo que la rodea, de aproximadamente 25 centímetros. Los habitantes de esta propiedad también tuvieron que abandonar su vivienda.

En Santa María Totoltepec, las fracturas y grietas asociadas a la falla Totoltepec se hacen evidentes por los daños causados a las casas habitación, encontrándose afectados los pisos y muros de éstas con grietas de 2 a 3 centímetros de ancho. En varias de estas casas, todavía se encuentran viviendo familias completas. La presencia de la grieta también es evidente por la afectación a obras de infraestructura urbana, como algunas guarniciones y banquetas, donde se notan rompimientos y desplazamientos de éstas.

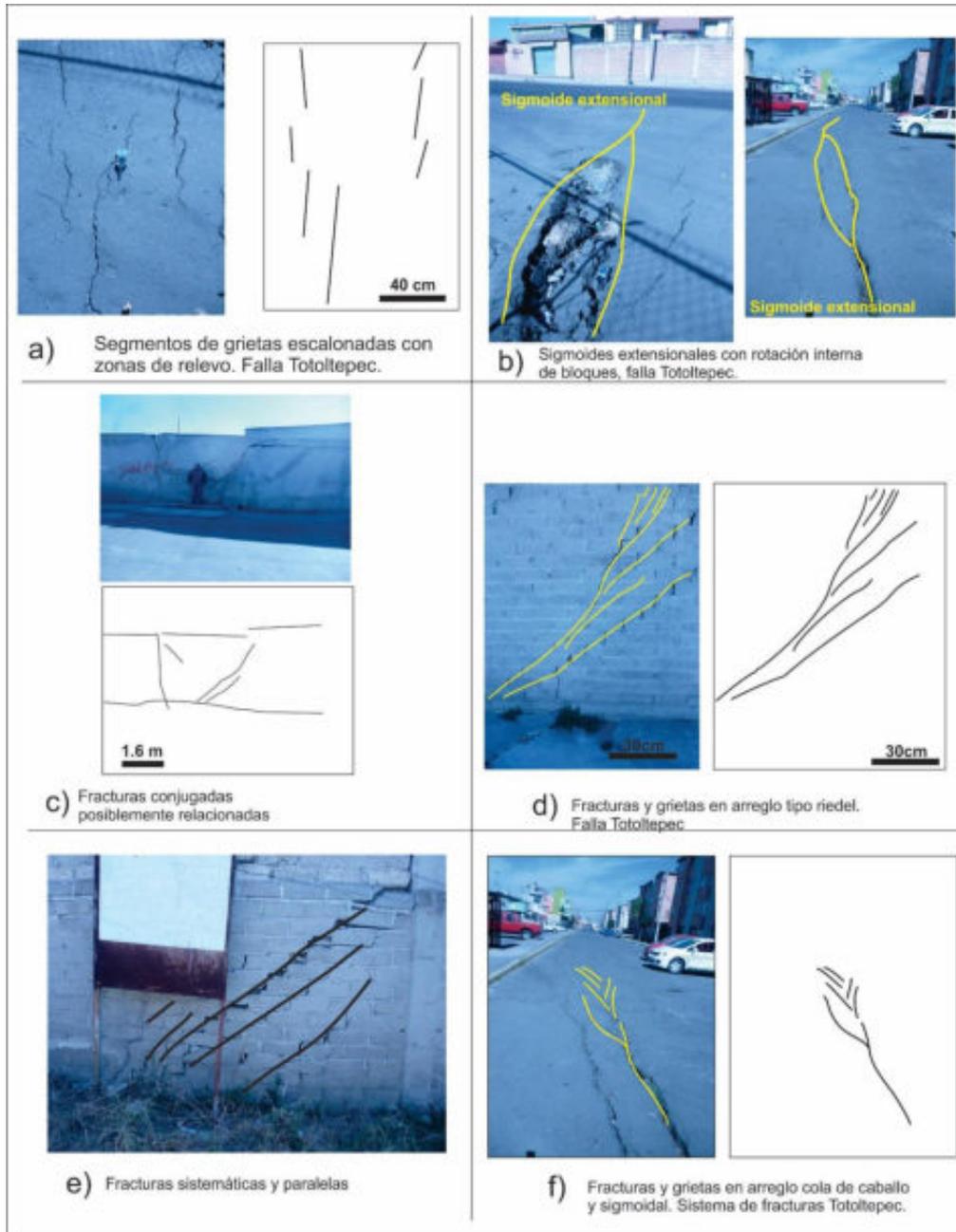


Figura 20 Geometrías de fallas y fracturas encontradas en el centro de la ZMVT. a) Fracturas escalonadas y en echelón; b) sigmoides extensionales a lo largo del rumbo de las fallas principales; c) fracturas conjugadas; d) fracturas en cola de caballo o ramaleada; e) fracturas y fallas paralelas y f) fracturas en cola de caballo y sigmoidal, Sistema de fracturas Totoltepec.

Fracturas Miltepec y La Mora

Características estructurales

En este sector de Santiago Miltepec y La Mora se presentan fracturas con dirección NE-SW asociadas a sistemas de fallas denominados Miltepec y La Mora en este trabajo. Estas grietas afectan a las colonias Santiago Miltepec, Independencia, Los Ángeles, Carlos Hank González, y el Fraccionamiento Los Frailes.

Los sistemas de fracturas y grietas presentan arreglos paralelos y sistemáticos con dirección NE-SW. Los sistemas de fracturas siguen un rumbo en específico de N60°E a N70°E. Las geometrías que se observaron en campo comprenden escalonada (*echelón*), segmentos de grietas, sigmoides, en arreglo riedel y ramificadas y con terminaciones de cola de caballo (Figura 20). Las geometrías de fallas y fracturas encontradas en el centro de la ZMVT (Figura 20): a) Fracturas escalonadas y en echelón; b) sigmoides extensionales a lo largo del rumbo de las fallas principales; c) fracturas conjugadas; d) fracturas en cola de caballo o ramaleada; e) fracturas y fallas paralelas y f) fracturas en cola de caballo).

Afectación a infraestructura urbana

Protección Civil de Toluca (2016) reporta que en la colonia los Ángeles la manifestación de las grietas de Miltepec y la Mora se determinan por la afectación de las casas en las siguientes calles:

Santos Degollado (casas 939 y 941) y calle José Clemente Orozco (casas 117 y 114, en la colonia Santiago Miltepec). En este trabajo se observó en la calle José María Velasco la afectación de la grieta se manifiesta por el rompimiento de la guarnición de la banqueta a la altura de la casa número 112 y se midió una longitud mínima de la grieta en esta colonia de 130 m, con una orientación N85°W

En la colonia Santiago Miltepec uno de los edificios del condominio ubicado en la calle Benito Juárez, presenta daños totales en su estructura, debido a que pasa una grieta por la parte central de éste, que tiene una dirección N58°E-S58°W, con una longitud aproximada de 100 m, medidos del edificio hacia la calle Benito Juárez donde se presentan evidencias de la estructura. Esta zona se encuentra a 180 m al sur de la sierra de las cruces de origen volcánico que presenta un notorio escarpe de falla, que pudiera estar relacionada con la grieta que afecta a los condominios. Ambas estructuras son casi paralelas (CMPCT, 2016).

El sistema de fallas y grietas de Miltepec y la Mora afecta a las colonias Tres Caminos, los Frailes y Carlos Hank González, Guadalupe, Club Jardín y la Magdalena; una de las grietas tiene una longitud mínima de aproximadamente de 967 metros lineales, misma que afecta en su trayectoria, inmuebles habitacionales, terrenos baldíos y de cultivo. Un reporte reciente del 13 de abril del 2010 es que se generó un asentamiento diferencial del terreno, al mismo tiempo un drenaje al interior del Fraccionamiento Los Frailes, se rompió provocando la filtración de agua al subsuelo, situación que generó la erosión de material formando una oquedad que variaba en diámetro de 1.80 metros por 80 centímetros (CMPCT, 2016).

Fracturas Lerdo

Características estructurales

Las fracturas y grietas del Sistema Lerdo presentan dos direcciones NE-SW y E-W algunas asociadas a fallas normales con caída del bloque de alto hacia el sur. El rumbo en específico de las fracturas es N70°E con echado al SE. Se presentan arreglos geométricos de tipo paralelo y sistemático, también con segmentos de grietas y zonas de relevo a escala métrica. La longitud de este sistema de fracturas o grietas alcanza por lo menos 1.4 Km y parece conectar con las fracturas de La Mora y de la Colonia Independencia que alcanzarían una longitud de 5 km (figura 15). Los espaciamentos de las grietas varían de 1 mm a 5 cm.

Afectación a infraestructura urbana

Se observó a estas fracturas y grietas a lo largo de la avenida Lerdo de Tejada siguiendo un rumbo E-W, las cuales afectan a la vialidad y a edificios históricos antiguos. En la esquina de noroeste de la Alameda se observa a estas fracturas siguiendo un rumbo NE-SW que parecen continuar en dirección hacia el Teatro Morelos.

Fracturas del Cerro de Coatepec

Características estructurales

Las fracturas y grietas del Cerro de Coatepec en donde se ubica Ciudad Universitaria de la UAEMex presentan direcciones NE-SW y N-S. El rumbo específico de las fracturas es NE-SW con algunos datos de N30°E-S30°W con echados que varían de 80° al NW y 65° al SE. Estas fracturas y grietas se asocian a fallas geológicas denominadas en este trabajo como fallas Coatepec. Las fracturas NE-SW afectan a los domos dacíticos y sus derrames en el Cerro de Coatepec (figura 18).

Afectación a infraestructura urbana

Las fracturas y grietas del Cerro de Coatepec afectan a algunos edificios y estacionamientos de Ciudad Universitaria de la UAEMex. Los edificios que se ven afectados son pertenecientes a la Facultad de Geografía, Contaduría, Administración, Ingeniería y el Estadio Alberto “Chivo” Córdoba. En la Facultad de Geografía se observa el desprendimiento de columnas de muros y grietas con subsidencia local en el estacionamiento superior, cerca del edificio C.

Fracturas Oxtotitlán

Características estructurales

Las fracturas y grietas de este sector se encuentran en la Delegación San Mateo Oxtotitlán. Estas fracturas y grietas se presentan en dos sistemas uno con dirección NE-SW y otro NW-SE. Las fracturas que tienen mayor expresión por la afectación que ocasionan son las fracturas de dirección NW-SE y que tienen rumbos N50°W con echados al SW. La geometría que presentan son grietas escalonadas, conjugadas, arreglos tipo riedel, sigmoidales y de cola de caballo (figura 18). Estas fracturas están asociadas a fallas que en este trabajo se han denominado fallas Oxtotitlán.

Afectación a infraestructura urbana

Las fracturas y grietas de este sector afectan a calles de Morelos, Galena e Hidalgo y siguen una dirección subparalela con la calle Benito Juárez de San Mateo Oxtotitlán. Se observó una afectación importante a casas habitación y de hecho se platicó con algunos dueños de las casas afectadas. Varias casas no están habitadas y en otras existe un riesgo latente por el movimiento de las fracturas. Una escuela primaria ha sido afectada por el movimiento y ha sido evacuada por recomendaciones de Protección Civil.

Fracturas La Teresona

Características estructurales

Las fracturas y grietas de este sector presentan una orientación general NE-SW y N-S, siendo las de mayor claridad en su expresión fisiográfica las NE-SW. El sistema NE-SW presenta rumbos que varían en valores de N60°E, N70°E y N35°E. La longitud del sistema NE-SW varía de 800 m a 3.5 km como mínimo. Se presenta como fracturas asociadas a fallas frágiles quebradizas denominadas fallas La Teresona y que se presentan afectando a los domos volcánicos andesítico-dacíticos del Cerro de la Teresona, Cerro Chichipilcas y de San Luis Obispo (figura 18). Las geometrías estructurales que se observaron en campo son fracturas de tipo riedel, arreglos escalonados y sigmoidales.

Afectación a infraestructura urbana

Las fracturas y grietas La Teresona afectan a la Delegación san Mateo Oxtotitlán principalmente casas habitacionales con agrietamientos de tipo extensionales provocando daños irregulares en la infraestructura urbana a lo largo de la traza de la falla. El sistema de fracturas y grietas afecta las calles causando daños progresivos en la red de drenaje y agua potable, arroyo vehicular, predios baldíos, una Escuela Primaria y a una iglesia. En la Delegación Santiago Tlaxomulco el daño nos es tan relevante sin embargo si hay afectaciones en algunas de las habitaciones por donde pasa la falla básicamente en los muros de contención y algunas de las calles de la delegación presentan deterioro del asfalto por movimientos relativos del terreno.

Fracturas El Calvario (Parque Matlatzincas)

Características estructurales

Las fracturas en el Cerro del Calvario que es el parque Matlatzincas presentan dos direcciones principales NE-SW y NW-SE. Las fracturas NE-SW presentan una longitud mínima de 700 m y con rumbo específico N40°E-S40°W; estas fracturas controlan la morfología del cerro. En la parte baja a escasos 60 metros se forma una grieta que afecta a casas y que sigue el mismo rumbo de la fractura principal del Cerro del Calvario (figura 18) Sistemas de fallas, grietas y fallas en la parte central de la ZMVT). Las fracturas NW-SE se localizan en la parte sur del Cerro del Calvario y tienen rumbos que varían de S70°E a S20°E. La longitud mínima de este sistema de grietas es de 900 m y afectan a casas habitación en las cercanías de la avenida Venustiano Carranza.

Afectación a infraestructura urbana

Las fracturas y grietas de este sector afectan principalmente muros de contención con un riesgo relativo inminente ya que los desplazamientos son de 30 cm y en

algunas de las casas habitacionales el daño parece ser progresivo con grietas de tensión provocando el fracturamiento en las habitaciones.

6.1.2 Fallas

En la ZMVT se han cartografiado las siguientes fallas de grandes dimensiones en función de su longitud y grado de afectación a infraestructura urbana, definidas como falla Totoltepec, falla La Virgen-Magdalena, Sistemas de fallas Miltepec, La Mora y Lerdo, fallas La Teresona, fallas Oxtotitlán, fallas Coatepec, y fallas Santa Ana. Estas fallas están ubicadas básicamente en la ciudad de Toluca y desde el punto de vista morfoestructural son las estructuras geológicas que más están afectando principalmente a la infraestructura urbana, cabe señalar que la mayoría del fallamiento es activo con dos direcciones predominantes NE-SW y E-W (figuras 18 y 20). Las personas afectadas por este fenómeno geológico comentan que es un evento que por lo menos tiene de 10 años de antigüedad; con base en ello se considera que el fallamiento es activo. En Protección Civil de Toluca se han reportado por lo menos 22 fracturamientos en la Delegación Toluca.

Falla Totoltepec y sus sistemas de fallas

Características estructurales

La Falla Totoltepec es una falla formada en un régimen extensional y es de tipo normal. La falla tiene un rumbo que varía de N70°E, N60°E y E-W con echados probables de 60° a 50° al Sur. La falla tiene una longitud mínima cartografiada en campo de 8 Km. El desplazamiento de la falla en todas las estaciones estructurales observadas es hacia el sur. Esta falla presenta fracturas asociadas en el bloque del bajo y del alto, estas geometrías fueron descritas en el apartado de fracturas. La falla va desde la vialidad Alfredo del Mazo hasta el Aeropuerto de Toluca como mínimo en su expresión geográfica, y afecta a varias naves industriales en Avenida Industria Automotriz, Avenida Albert Einstein., Paseo Totoltepec y también afecta a zonas habitacionales en San Pedro Totoltepec (figuras 18, 21 y 22).

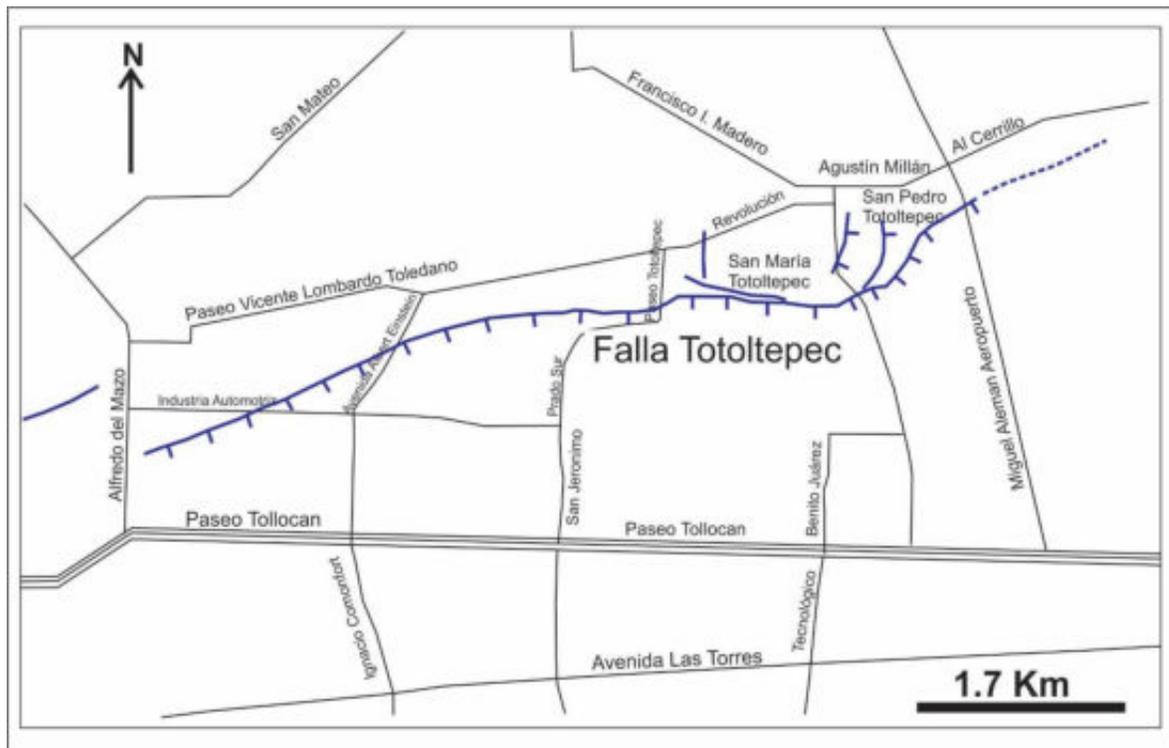


Figura 21 Faja Totaltepec que tiene una longitud de por lo menos 8 Km y su ubicación con respecto a las avenidas principales del centro de la ZMVT. Elaboración propia.

La geometría de la falla es curvilínea siempre con la tendencia NE-SW y E-W. Se presentan fallas con geometrías sigmoidales, en segmentos de falla y zonas de relevo, fallas escalonadas y en San Pedro Totaltepec la falla forma un arreglo de fallas en geometría ramificada y en cola de caballo. Existen fallas que aparecen al norte de la falla y que luego se unen a la principal a lo largo de su rumbo.

La cinemática de la falla a escala regional kilométrica es definida por el desplazamiento de estructuras civiles como bardas, traveses de concreto, vallas, pavimentos de calles, edificios, y banquetas. La cinemática que se determinó es una cinemática de falla normal con el bloque hundido hacia el sur. Es característico

de esta falla que a escala de afloramiento y métrica aparecen fallas internas de acomodo de tipo inverso (figura 22). Se observaron en bardas estructuras de tipo riedel, fallas ramificadas, y fallas de tipo cola de caballo. Las fracturas de extensión asociadas con la falla son abundantes en las bardas y a veces son modificadas en su orientación por la heterogeneidad de los materiales de construcción y al final se tiene un desplazamiento de tipo normal (figura 23).

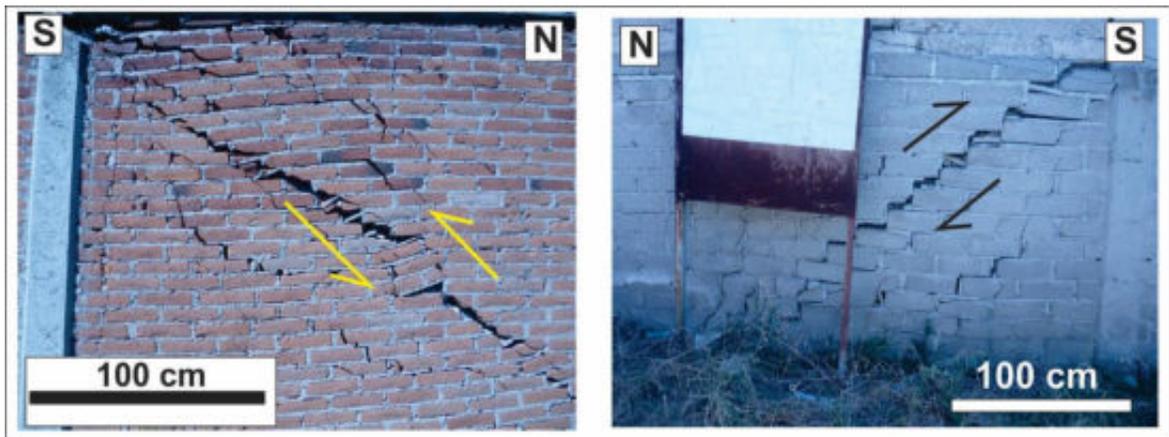


Figura 22 Fallas inversas de acomodo a lo largo de la traza de la falla Totoltepec. Localidad de Santa María Totoltepec.

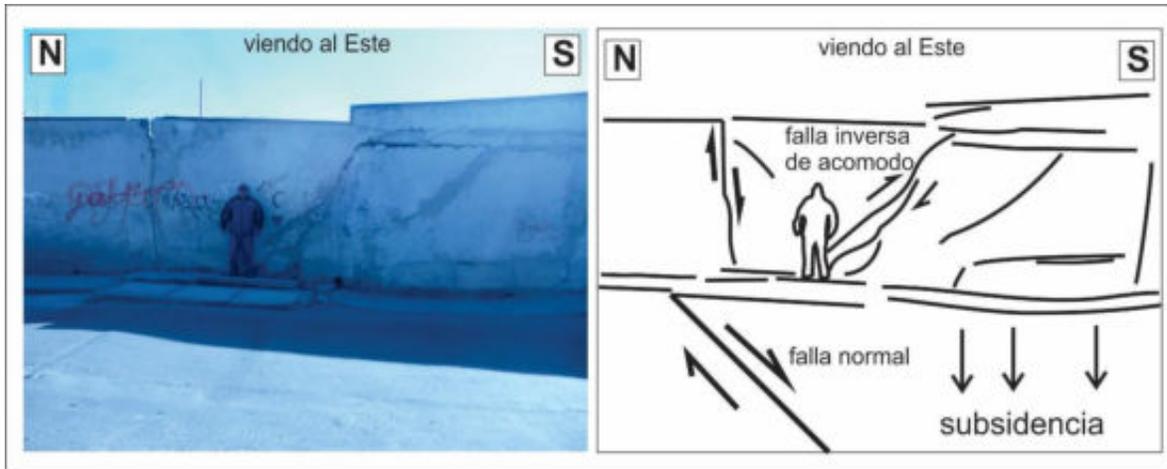


Figura 23 *Falla Totontepec en la localidad de Santa María Totontepec en la calle José María Morelos y Pavón, se observa un sistema principal de falla normal con fallas internas de acomodo inversas y numerosas fracturas extensionales.*

Afectación a infraestructura urbana

Las fracturas y grietas en esta zona afectan calles como Tlatelolco, José María Morelos, El Coecillo, Callejón de las Delicias, Benito Juárez, Cda. de Morelos, Canal Totontepec, Miguel Hidalgo, Ignacio Allende, Ignacio Allende, Felipe Chávez, Progreso, San Antonio, 5 de mayo, San Lorenzo, San Felipe, Retorno 8, Cuauhtémoc, Francisco I. Madero, Priv. Niños Héroes, Gabino Vázquez e Ignacio Zaragoza. Las fracturas se observaron dañando casas habitación con desplazamientos relativos verticales de aproximadamente 1.50 m y en algunas de las casas afectadas hay familias viviendo en dichas habitaciones por lo que el riesgo es inminente (Figura 20). Se observan las relaciones geométricas de las distintas fallas y fracturas, se interpretan los movimientos relativos que definen una deformación extensional y falla de tipo normal).

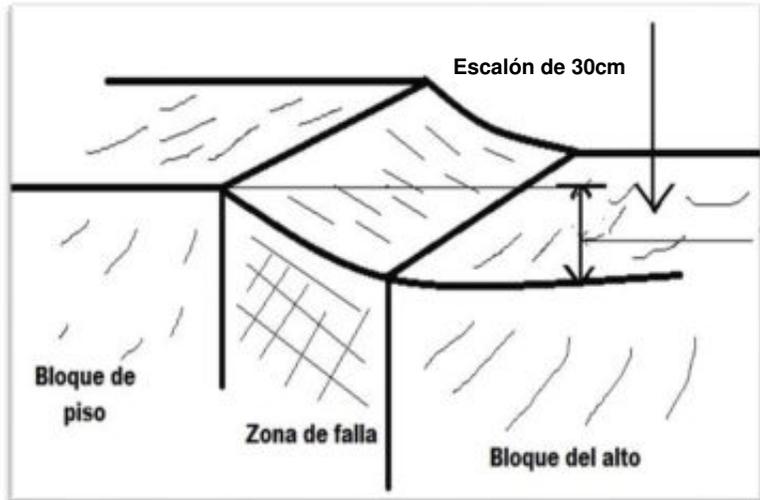
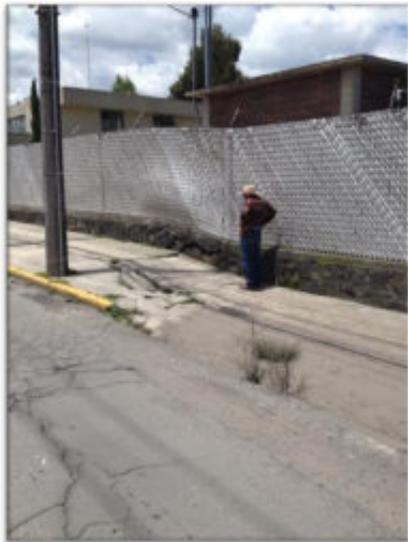


Figura 24 Falla Totoltepec en la calle Leonardo Da Vinci y esquema de falla normal con escalón aproximado de 30cm de altura, afectando gran parte de infraestructura urbana como calles, guarniciones, industrias, casas, etc.

Falla La Virgen-Magdalena

Características estructurales

La Falla La Virgen-Magdalena tiene una orientación que varía en los siguientes valores N70°E, N50°E y N65°E. Esta falla se presenta en segmentos de falla con longitudes de alrededor de 1 Km y en la longitud de falla total llega a alcanzar como mínimo 6 Km. Se encuentra localizada en el Municipio de Metepec y es probable que cruce por Avenida Tecnológico mientras que el extremo poniente de la falla llega hasta la población de Santa María Magdalena Ocotitlán. La mayor parte de la geometría de la falla es de tipo escalonada. A escala de afloramiento o métrica se observan fracturas asociadas al alto y bajo de la falla, y se observan pequeños pilares estructurales limitados por los segmentos de falla (figuras 18 y 20).

Afectación a infraestructura urbana

Las principales afectaciones que causa la falla La Virgen-Magdalena en infraestructura se observan en algunas residencias en la parte noreste del Fraccionamiento La Virgen con movimientos relativos del terreno provocando daños irregulares en los muros de contención de las habitaciones y calles aledañas a dichas residencias. En la Avenida Tecnológico y particularmente en el Tecnológico Regional de Toluca el daño se observa en un muro de contención con una inclinación 30 cm en dirección Este y por lo que se observó que está en riesgo de una posible caída hacia la Avenida. En el sector Poniente, la falla provoca daños en la calle de Av. Las Palmas con un desplazamiento vertical de aproximadamente 2m de escalón dañando calles, muros de contención, drenaje y banquetas.

Sistemas de fallas La Mora, Miltepec y Lerdo

Características estructurales

El sistema de Fallas La Mora, Miltepec y Lerdo tienen una orientación que varía en los siguientes valores N85°E, N80°E y N65°E con una influencia de 3m, se presenta en segmentos de falla con longitudes de alrededor de 1 Km (figuras 18 y 20), la geometría del sistema de fallas es de tipo escalonada con desplazamientos verticales mínimos y relativos de 25cm.

Afectación a infraestructura urbana

Las principales afectaciones ocurren en edificios de las calles Tenango, Ignacio López Rayón, Diego Rivera, Sebastián Lerdo de Tejada, Priv. De Lerdo, Nicolás Bravo, Benito Juárez, Miguel Hidalgo. Estas afectaciones se manifiestan por la presencia de grietas de tensión en muros de contención y bardas con aberturas de hasta 1.5m.

Fallas La Teresona

Características estructurales

El sistema de fallas La Teresona tienen orientaciones con valores N 55°E, S66°E, S52°E y S86°E. Estas fallas presentan segmentos de falla con longitudes de hasta 4Km (figuras 18 y 20), con una influencia transversal al fallamiento de hasta 2.50m en fallas individuales. El sistema de fallas de la Teresona presenta una geometría de tipo escalonada con desplazamientos verticales mínimos de 20 a 30cm.

Afectación a infraestructura urbana

Las afectaciones en casas habitación o edificios por parte del sistema de fallas de la Teresona ocurre en las casas habitacionales de la Av. Constituyentes y Calle Juan Aldama siendo mayor intensidad de la afectación en las casas de adobe. Otras afectaciones se observaron en muros de contención, banquetas, zonas baldías y calles aledañas a las construcciones presentándose con movimientos relativos del asfalto y fracturas de tipo riedel.

Fallas Oxtotitlán

Características estructurales

Las fallas de San Mateo Oxtotitlán presentan direcciones NW-SE con rumbos en específico de N50°W-S50°E con echados que varían de 60° a 80° al Suroeste (SW). La longitud mínima de las fallas es de 500m. La geometría que se presenta es curvilínea y aparecen fracturas abundantes al alto y bajo de los bloques. En algunas construcciones se observó como mínimo una separación vertical de 1.7m basados en los marcadores de las construcciones civiles. Se observan fracturas y fallas de tipo riedel y fallas en arreglos conjugados, y se observan fallas de reacomodo inverso con rotación de bloques al alto de la falla. En los desplazamientos de tipo normal se observaron pliegues de arrastre que se expresan en el dobléz de estructuras metálicas como algunos letreros (figura 25).

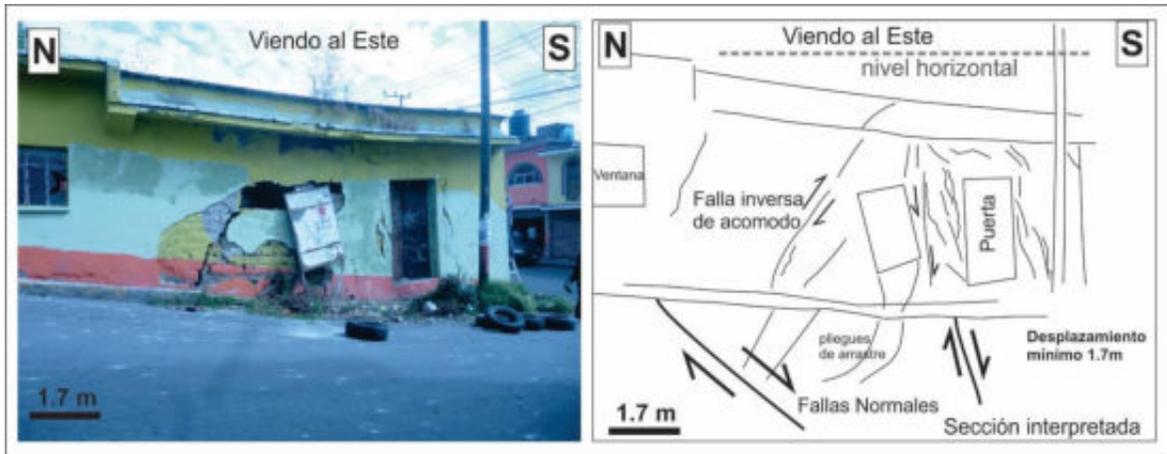


Figura 25 Falla de Oxtotitlán, en la colonia San Mateo Oxtotitlán, calle Benito Juárez que afecta a casa habitación. Se observan las relaciones geométricas de las distintas fallas y fracturas, se interpretan los movimientos relativos que definen una deformación extensional y falla de tipo normal.

Afectación a infraestructura urbana

Las fallas de San Mateo Oxtotitlán afectan principalmente las calles de la Privada Héroes de Nacozari, Juan Aldama, José María Morelos, Ignacio Allende, Benito Juárez, Nicolás Bravo, Alhóndiga de Granaditas, Galeana, Miguel Hidalgo, Privada De Benito Juárez provocando daños a la infraestructura urbana debido a los movimientos verticales que ha provocado la falla.

Fallas Coatepec

Características estructurales

La falla presenta una orientación NE-SW con algunos rumbos específicos de N25°W-S23°E (figuras 18 y 20), con una geometría lineal y con presencia de fracturas abundantes al alto y bajo de los bloques. En algunas construcciones se observó una separación vertical mínima de 25cm en su desplante y fracturas y las fracturas asociadas a estas fallas tienen influencia transversal de 3 a 5 m

Afectación a infraestructura urbana

Las afectaciones principalmente son a las obras civiles como los edificios de la Facultad de Geografía, su estacionamiento, calles y banquetas. Las fracturas asociadas a las fallas Coatepec son de tipo riedel que afectan el asfalto de estacionamientos y muros de contención.

6.2 Mapa de estructuras en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Se elaboraron dos mapas de estructuras uno a escala del total de la ZMVT (figura 26) y otro de las fallas y fracturas en la Ciudad de Toluca que corresponde con la parte central de la ZMVT (figuras 18 y 20). En el mapa del total de la ZMVT en que se compilaron e integraron datos estructurales de este trabajo de tesis, con datos del Atlas de Riesgos del Estado de México del año 2015, y algunos datos geológicos del INFOME GEM (2009).

A partir del presente mapa geológico-estructural de la ZMVT (Figura 26) se visualizan en general varios lineamientos estructurales que presentan orientaciones NE-SW, E-W, y en menor medida NW-SE. En la parte noreste de la ZMVT hacia Temoaya y San Pedro de Abajo se observan lineamientos estructurales con direcciones NE-SW, y que alcanzan a entrar al Complejo volcánico de Sierra de Las Cruces. En el norte de la ZMVT hacia las presas Ignacio Ramírez y Antonio Álzate se observan dos sistemas de fracturas regionales que tienen direcciones de E-W y NE-SW por lo que se observa es una región compleja desde el punto de vista geológico-estructural. En la parte noroeste (NW) de la ZMVT aparecen lineamientos estructurales NW-SE principalmente que son paralelos con el rumbo de la Falla Perales en la región de Ixtlahuaca. En el poniente de la ZMVT hacia Villa Victoria no hay mucha evidencia de estructuras. En el suroeste (SW) de la ZMVT que comprende a los estratovolcanes San Antonio y Nevado de Toluca se han descrito y definido sistemas de fallas NE-SW que son paralelos a fallas mayores como son la falla San Antonio, falla San Miguel y falla Zacango (García-Palomo et al., 2000).

La falla Zacango corta al Nevado de Toluca. En el sur de la ZMVT se interpretaron varios lineamientos estructurales con dirección E-W que son paralelos a la falla Tenango y falla San Pedro. La falla Tenango se ha estudiado estructuralmente y se definió por Norini et al. (2006) como un sistema de fallas con deformación lateral izquierda y con comportamiento transtensional con desarrollo de cuencas pull-apart y sigmoides de fallas laterales. Norini et al. (2006) apunta que se trata de un sistema sísmicamente activo y con riesgos para la parte sur de la ZMVT en las cercanías de Tenango; él calculó velocidades de deslizamiento holocénicas de 0.3 a 0.5 mm/año. Este Sistema de fallas hacia el poniente de Tenango hacia la Sierra de Chichinautzin se han llamado el sistema de fallas Aztlán por Campos-Enríquez et al. (2015) con sismicidad activa. En el este de la ZMVT se encuentra el Complejo Volcánico de Sierra de Las Cruces en donde desde el punto de vista morfoestructural se han identificado por García-Palomo et al. (2008) tres sistemas de fracturas y fallas que presentan direcciones NE-SW, E-W y N-S.

Mapa de Geología Estructural de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), Estado de México.

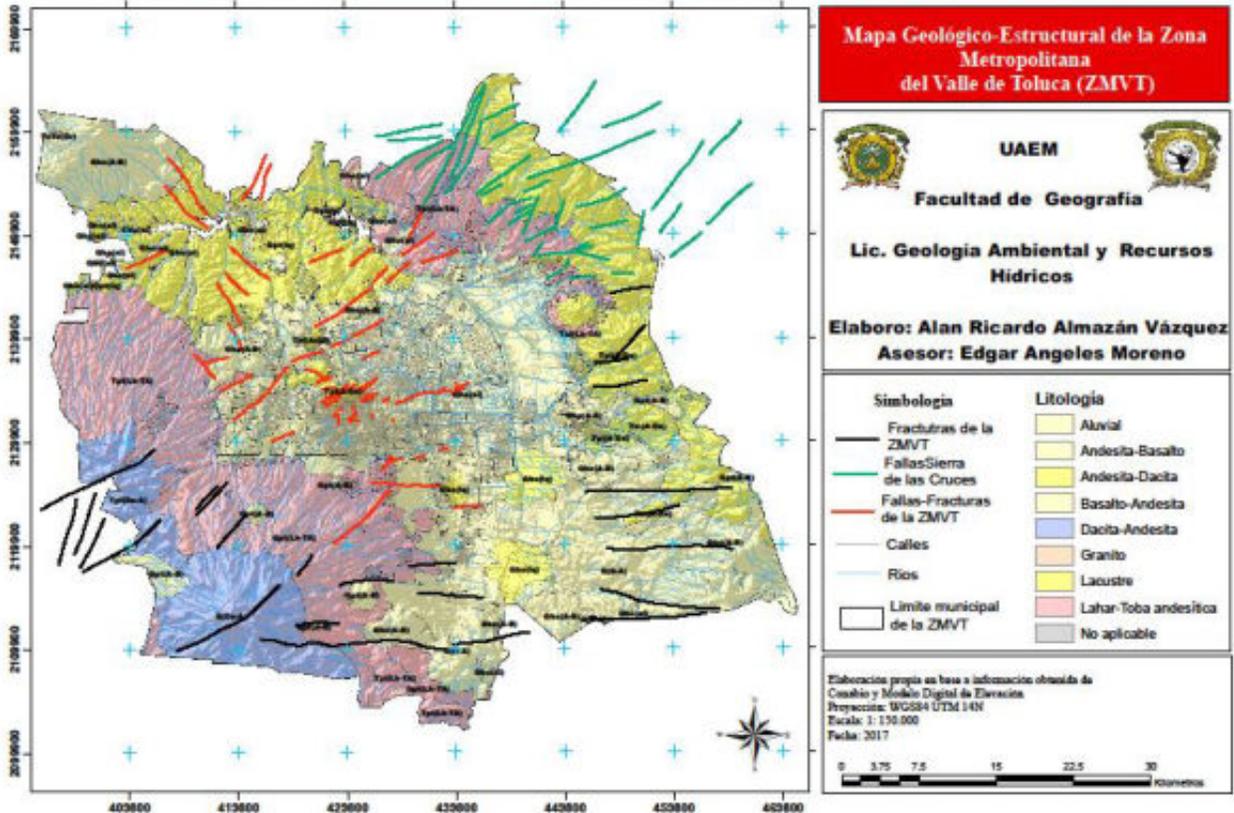


Figura 26 Mapa de geología estructural de la ZMVT, elaboración propia con base a información obtenida del IMFEMEGEM, 2016)

6.3 Análisis de estructuras

Relaciones estructurales entre la ZMVT con sus alrededores

Las estructuras cartografiadas en este trabajo a escala del centro de la ZMVT son un reflejo de las estructuras alrededor del total de la ZMVT. Las orientaciones más importantes de los sistemas de fallas, fracturas o grietas son NE-SW y E-W sin embargo a partir de Almoloya de Juárez aparecen estructuras con orientaciones NW-SE. Las fallas con orientación E-W son puramente extensionales mientras que las fallas NE-SW parecen tener una componente lateral menor como se ve en el volcán San Antonio y Nevado de Toluca con base en las geometrías de tipo escalonado o echelón (figura 27). La falla Coatepec en la UAEMex parece tener más relación con la falla de Zacango por su misma orientación. Las fallas activas reconocidas, hasta antes de este trabajo, eran la falla Tenango (Norini et al., 2006) y algunas fallas en la Sierra de Las Cruces (Angeles-Moreno et al., 2014), ahora se tienen evidencias de un fallamiento activo en el centro de la ZMVT.

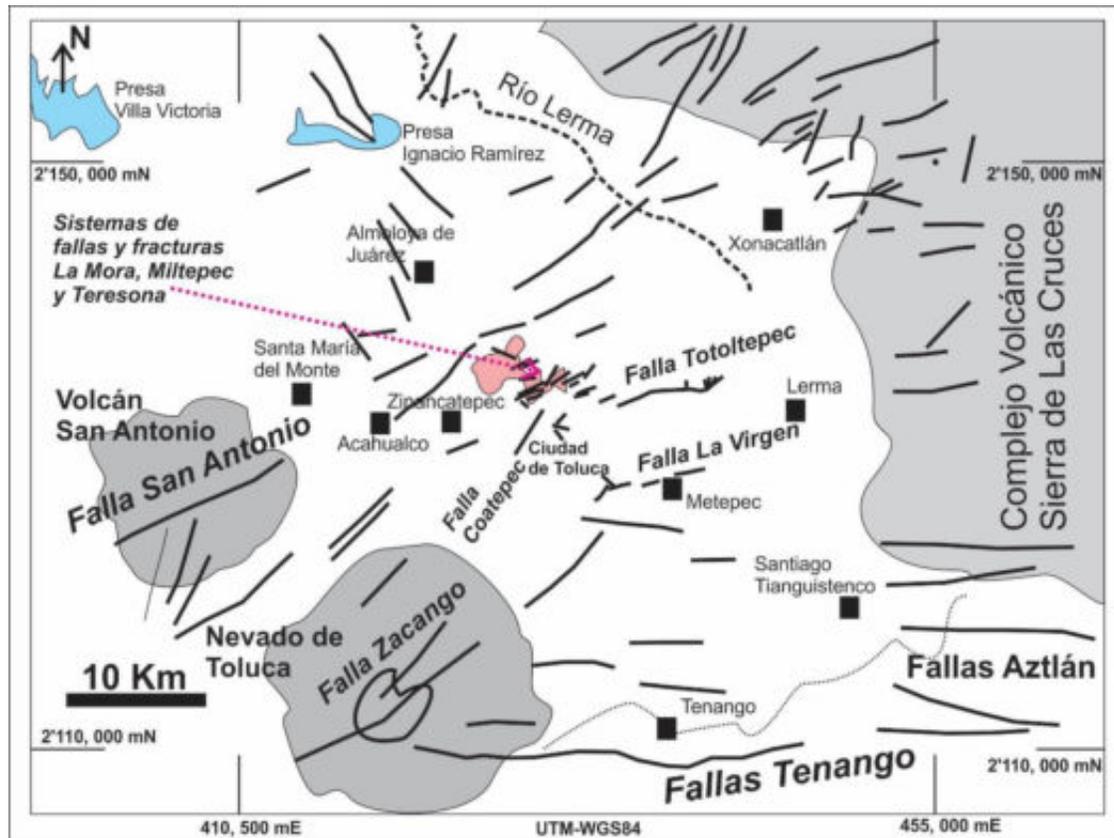


Figura 27 Mapa esquemático elaborado a partir del mapa 5 de geología estructural, que muestra la integración de las fallas y fracturas de este trabajo con otros datos estructurales (Norini et al, 2006; García-Palomo et al., 2008; Atlas de Riesgos del Estado de México 2016. Se observa una relación estructural de las fracturas, grietas y fallas de la ZMVT con su contexto estructural a escala regional.

Análisis de estructuras en el centro de la ZMVT (Ciudad de Toluca)

Las estructuras descritas en la parte 4.1 de tipos de fracturas presentan geometrías y cinemática que indican que hay fallamiento de tipo normal y con deformación extensional. Las estructuras más extensionales parecen ser las que presentan orientación E-W.

La falla Totoltepec es una falla normal con sus fracturas y grietas asociadas en el bloque del alto y bajo. La presencia de geometrías ramaleadas de esta falla en el Aeropuerto sugiere que hay cambios litológicos laterales. A escala de afloramientos esta falla tiene numerosos acomodamientos de fallas inversas que se manifiestan en los muros de casas o terrenos baldíos, este movimiento inverso se interpreta como un acomodamiento a nivel de las construcciones civiles (figura 30).

La falla La Virgen es otra estructura mayor y su echado parece ser hacia el norte. Esta estructura presenta ramaleo de fallas menores hacia el poniente y también puede ser debido a cambios litológicos de manera lateral.

La presencia de abundantes segmentos de falla en los sistemas de fallas de La Teresona, Miltepec y La Mora sugiere que la deformación se acomoda disminuyendo la energía para romper los domos dacítico-andesíticos de los cerros La Teresona.

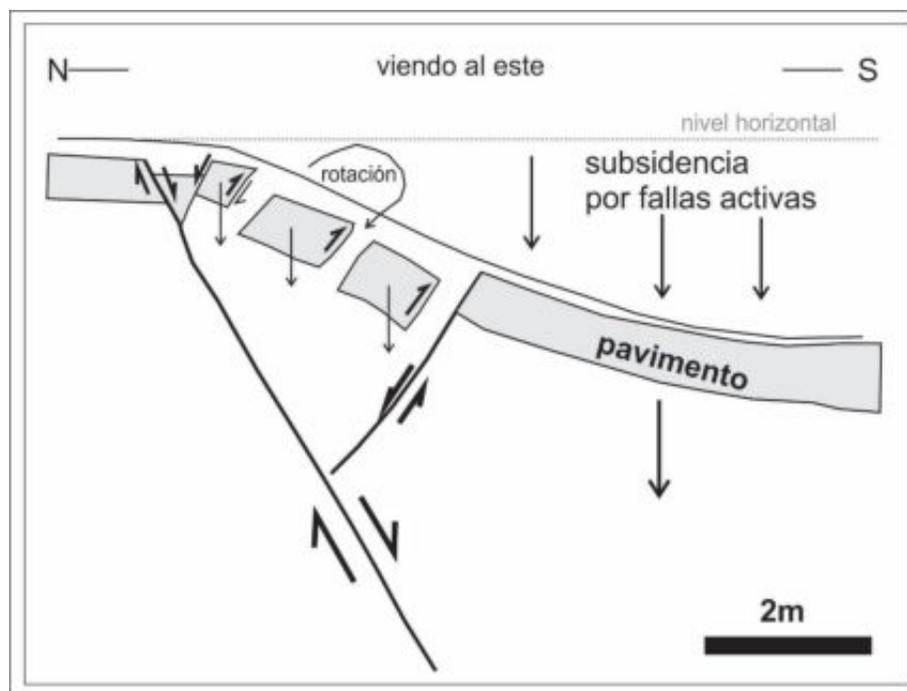


Figura 28 Modelo estructural de las relaciones de fallas y grietas en la falla Totoltepec. Elaboración propia.

Las fallas NW-SE como el sistema de fallas y grietas en Santa María Oxtotitlán y las fallas del Cerro El Calvario y otras grietas que aparecen en la zona entre las fallas de Coatepec y La Virgen, son de menor longitud en comparación con la longitud de las fallas Totoltepec y La Virgen; estas fallas NW-SE parecen ser fallas de acomodo de las fallas mayores o ser fracturas más antiguas que se quedaron dentro del sistema de fallas NE-SW.

Sección estructural Miltepec-Metepec

Se elaboró una sección estructural con rumbo NW-SE que va desde el Cerro Agua Bendita hasta la falla La Virgen en Metepec (figura 29). En esta sección muestra los sistemas fallas y grietas principales E-W y NE-SW en el que se define un fallamiento de tipo normal en un régimen de deformación extensional. Entre la falla Totoltepec y la falla La Virgen se define un graben que en este trabajo se denomina graben de Tollocan. Los domos dacítico-andesíticos de los Cerros de La Teresona, Cerro El Barrigón y Cerro de Agua Bendita parecen definir un alto estructural o pilar estructural. Los desplazamientos verticales más antiguos de las fallas activas están en las rocas del basamento eocénico y miocénico. Las profundidades de estas rocas son variables entre 50 m a 500m con base en la sección. Los desplazamientos verticales más recientes son los que se observaron en campo y cortan paleosuelos, depósitos lacustres, piroclásticos y rocas volcánicas con edades de menos de 10, 000 años de edad sin embargo estos desplazamientos recientes tienen una fuerte componente de la subsidencia hídrica. La Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA, 2002) ya había sugerido con base en sus pozos de agua subterránea que la Cuenca de Toluca presenta escalonamientos en forma de fosas limitadas por pilares.

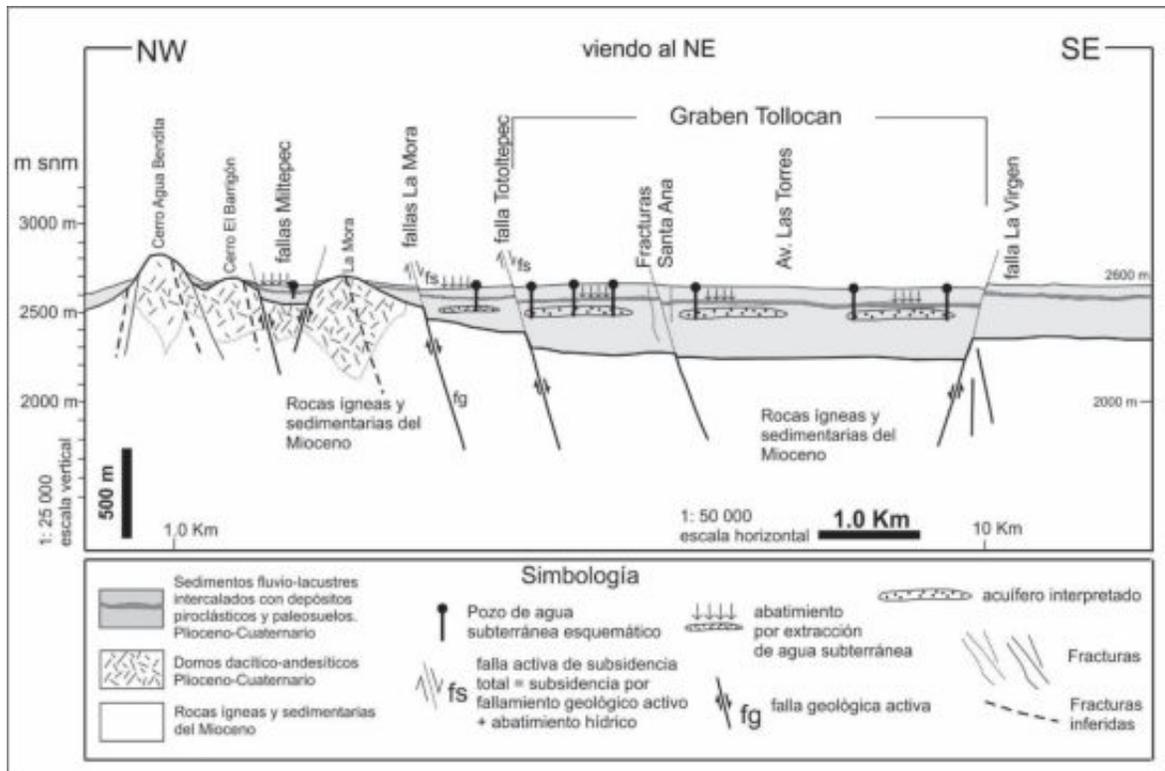


Figura 29 Sección geológico-estructural NW-SE que va del Cerro Agua Bendita al norte de Miltepec hasta falla La Virgen en Metepec. *Elaboración propia.*

6.4 Análisis morfoestructural

En el análisis morfoestructural se emplearon los mapas de pendientes, el hipsográfico, el geomorfológico y el geológico estructural elaborados en ARCGIS. A partir del empalme de estos mapas se llega a los siguientes resultados e interpretaciones:

Al sobreponer el mapa de pendientes con las fallas y fracturas en los alrededores de la ZMVT se observa que, si existe una relación entre fracturas con las pendientes más fuertes, esto se observa en la Sierra de Las Cruces (SC) y en los volcanes del Nevado de Toluca y San Antonio. En la parte central de la ZMVT que corresponde a la Ciudad de Toluca no es muy clara esta relación y es muy débil en los domos dacítico-andesíticos de La Teresona; sin embargo, en Metepec que corresponde a la falla La Virgen si se observa un ligero cambio de pendiente con una dirección NE-SW y en Almoloya de Juárez también hay un lineamiento estructural que corresponde con cambio de pendiente NE-SW (Figura 17).

En la sobreposición de las estructuras con el mapa hipsográfico se pueden observar a escala del total de la ZMVT una ligera relación de nuevo con lineamientos NE-SW en Almoloya de Juárez y Metepec. Y a escala del centro de la ZMVT en la Ciudad de Toluca en donde se ve los lineamientos estructurales reflejados en la hipsografía es en los Cerros de La Teresona, Agua Bendita y El Barrigón (Figura 26).

7. Peligros geológicos por fallamiento y fracturamiento en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

7.1 Fracturamiento de obras civiles

Los sistemas de grietas, fracturas y fallas de la ZMVT afectan a distintos tipos de infraestructura civil como banquetas, calles pavimentadas, casas habitación, bardas perimetrales, estacionamientos, sistemas de drenaje, postes eléctricos o de teléfono y naves industriales.

A lo largo de la falla Totoltepec por ejemplo existen casas de habitación dañadas en sus pisos exteriores e interiores y también se observaron daños en cisternas o escaleras. El ancho de estos daños alcanza por lo menos 30 metros de influencia del fracturamiento en secciones perpendiculares a la traza de la falla. Los peligros que se ven originados ante la generación de estas fracturas son el colapso de los segundos pisos, la caída de materiales de construcción y aumento de humedad en las paredes. Se observaron varias casas que se abandonaron por las condiciones de deterioro en que se encuentran mientras otras tienen abundantes filtraciones, humedad en muros y aberturas de hasta 20 cm de ancho de grietas lo que las vuelve insalubres y peligrosas para habitarlas.

Al fracturarse y agrietarse los muros perimetrales de casas habitación, estos en algunos casos se observaron colapsados o a punto de colapso. Esto origina un peligro para la gente que camine por las banquetas o que se traslade en auto y que de manera súbita pueda caerle la barda (figura 30). En Santa María Totoltepec se me informó que había habido accidentes al pasar grietas que estaban separadas por lo menos en 2 metros.

En algunas industrias por la que pasa la falla Totoltepec fracturas estacionamientos y afecta bardas de naves industriales. En las industrias de los peligros que se

pueden originar son la fractura de tuberías de gas que posteriormente puede desencadenar incendios.

En la mayoría de las fallas como Totoltepec, La Virgen, Coatepec, La Mora, Miltepec y Oxtotitlán se observan escalones de falla en los pavimentos que varían en desplazamientos verticales entre 10cm a 60 cm. Estos desplazamientos se ven a manera de topes ya que se recubren con asfalto constantemente por los servicios municipales. Se observaron tuberías de drenaje, tuberías de agua potable y postes eléctricos afectados por el desplazamiento vertical del fallamiento.

A partir de mediciones estructurales de rumbo y echado de las grietas en algunas bardas y en el interior de casas dañadas en San Pedro y Santa María Totoltepec se observa que las orientaciones de las grietas son correspondientes con las orientaciones de las fallas mayores como en la falla Totoltepec y el sistema de fallas en Oxtotitlán. La heterogeneidad de los materiales y la estructura de construcción en las casas originan la apertura de grietas siguiendo estas heterogeneidades de la construcción, como por ejemplo la unión de bardas de tabique con traveses de soporte se separan. Los sistemas de grietas y fracturas de las casas habitación se comportan con direcciones de extensiones y cinemática estructural correspondiente con fallas normales.



Figura 30 Distintos tipos de afectaciones a la infraestructura urbana en la ZMVT. a) Fallas inversas de acomodo y grietas asociadas en la falla Totoltepec. b) Casa habitación ubicada en la calle 5 de mayo, col. San Pedro Totoltepec, afectada por grietas y se abandonó la idea de continuar su construcción en el segundo piso. c) Fallas y grietas de la falla Totoltepec que pasa por la avenida en Santa María Totoltepec. d) Afectación a una escuela primaria en la calle 16 de septiembre de la col. Santa Ana Tlapaltitlan. e) Casa habitación totalmente destruida por falla geológica en la calle Benito Juárez de la col. San Mateo Oxtotitlán. f) Falla normal con desplazamiento de 50cm, afectando la avenida Ocotitlán, de la colonia la Magdalena Ocotitlán.

7.2 Subsistencia por fallamiento

La subsidencia es el hundimiento progresivo de la superficie con respecto a un nivel de referencia estable, producido por causas naturales o causas humanas. La subsidencia es un riesgo natural que afecta a amplias zonas de un territorio causando importantes daños económicos y una gran alarma social (Tomás et al., 2009). La subsidencia en la literatura la clasifican desde varios enfoques: por deformación de materiales, por los mecanismos que la desencadenan o por factores naturales o de actividad humana. La subsidencia por deformación de los materiales terrestres como suelo o roca (Prokopvich et al., 1979 en Tomás et al., 2009) en donde la deformación se da por compactación de suelos o puede darse por procesos geológicos. Scott (1979) en Tomás et al. (2009) y González-Vallejo et al. (2002). Consideran que una subsidencia puede ser desencadenada por mecanismos, como las actividades de minería extractiva, construcción de túneles y otros tipos de obras civiles, la extracción de fluidos (agua, petróleo, o gas), el descenso del nivel freático durante el estiaje, disolución natural del terreno ya sea sedimentos terrígenos o calizas por el efecto del agua, los procesos morfotectónicos y procesos de consolidación de suelos blandos u orgánicos (Figura 21). Y también puede verse a la subsidencia que puede ser provocada por factores naturales o causados por la actividad humana (Tomás et al., 2009).

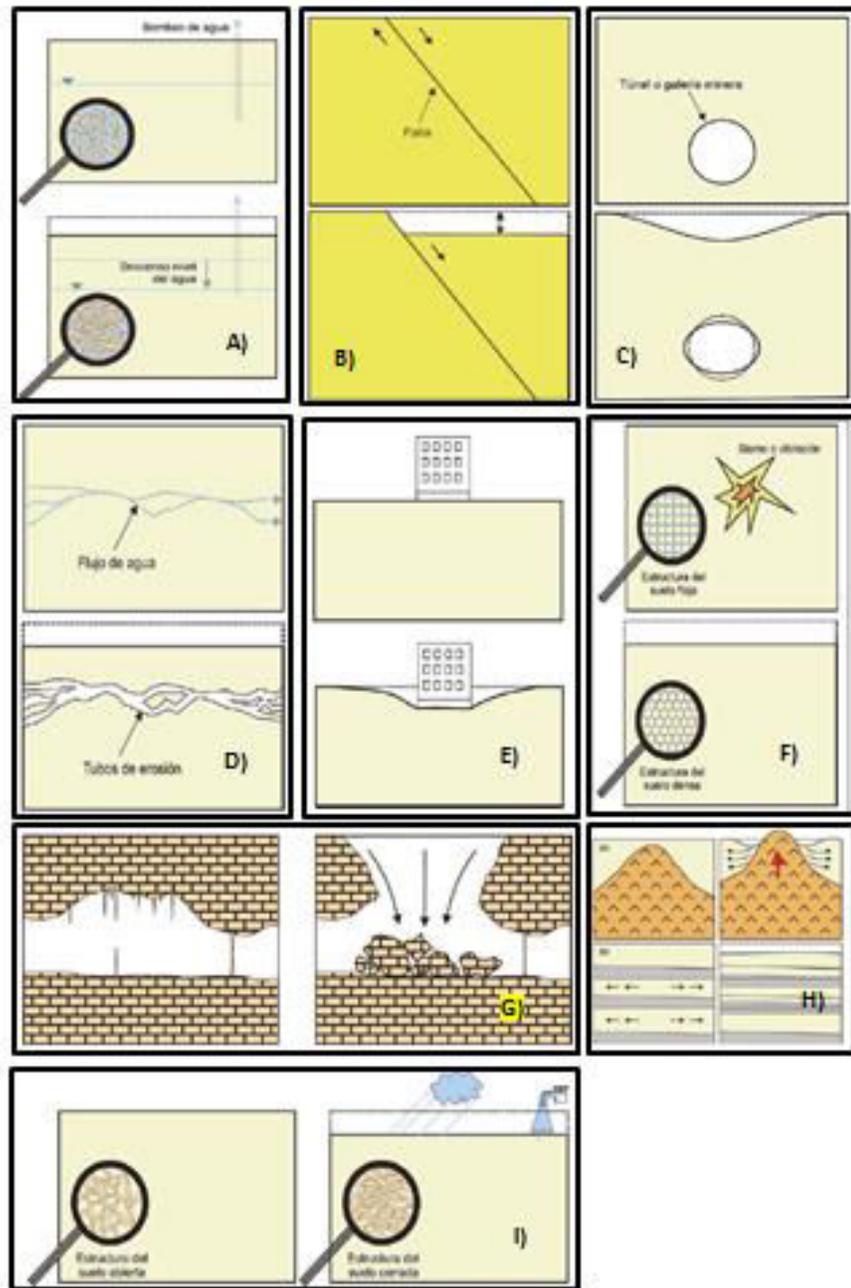


Figura 31 Tipos de subsidencia que se presentan en función de los mecanismos que la desencadenan. A) Subsistencia por extracción de agua subterránea; B) Subsistencia por fallamiento activo y tectónica; C) Subsistencia minera; D) Subsistencia por erosión; E) Subsistencia por carga; F) Subsistencia por vibraciones; G) Subsistencia por disolución de rocas carbonatadas; H) Subsistencia por flujo lateral y I) Subsistencia por hidrocompactación. Figura tomada de Tomas et al., 2009.

Los sistemas de fallas y grietas de la ZMVT como se ha visto siguen orientaciones regulares NE-SW y E-W principalmente y en menor medida orientaciones NW-SE y N-S. Al compararse con las estructuras geológicas de la Sierra de Las Cruces (SC) (García-Palomo et al., 2008) y con estructuras que se ubican al suroeste y sur de la ZMVT como son el sistema de fallas Tenango y fallas en el Nevado de Toluca (García-Palomo et al., 2000 y Norini et al., 2006), se puede observar que existe una relación entre la orientación estructural de las fallas y fracturas descritas en este trabajo de la ZMVT y las fallas de los alrededores. Esto sugiere que las fallas y grietas de la ZMVT y en consecuencia la Ciudad de Toluca tienen un control estructural geológico importante.

A lo largo de los sistemas de fallas y grietas de la ZMVT se observaron desplazamientos verticales que varían de 10 cm a 1.0 metro para algunas casas habitación y calles (Figura 33), esto documentado a lo largo de la falla Totoltepec, falla La Virgen y el sistema de fallas Miltepec-La Mora. En las fallas de Santa María Oxtotitlán se observaron desplazamientos verticales que pueden alcanzar 2.0 metros. En algunas colonias los habitantes mencionaron que por lo menos estos desplazamientos estaban ocurriendo desde hace diez años al presente. Los daños de algunas casas habitación de no más de 10 años de antigüedad sugieren que puede haber subsidencia 10 mm/año a 100 mm/año considerando de 10 cm y 100 cm de desplazamientos verticales en 10 años. Estos valores sugieren subsidencias con velocidades altas y que pueden deberse a extracción de agua subterránea sin embargo las orientaciones estructurales geológicas añaden otro factor a considerar.

En el sur de la ZMVT Norini et al. (2006) calculo velocidades de movimiento de las fallas Tenango de 0.3 a 0.55 mm/año basado en el fechamiento de Carbono 14 y relaciones de corte geológicas; el también muestra una actividad sísmica en las fallas. En este trabajo se observó no solo a las fallas de la ZMVT afectando infraestructura urbana, se observó que las fallas desplazan capas suelos de origen volcánico intercalados con depósitos volcanosedimentarios y depósitos piroclásticos. Si suponemos una edad para las rocas piroclásticas desplazadas de

alrededor de 10 500 años, ya que pertenecen a algunos de los depósitos volcánicos más jóvenes del Nevado de Toluca (Arce et al., 2003), entonces si se toma un desplazamiento máximo observado en este trabajo en las fallas de la ZMVT de alrededor de 1.0 metro se tendrá una velocidad de desplazamiento vertical para las fallas de la ZMVT de 0.1 mm/año y si se toman 2 metros como desplazamiento máximo se tendrá una velocidad de desplazamiento vertical de 0.2 mm/año. Estos resultados anteriores son comparables y no alejados a los obtenidos por Norini et al. (2006) y por ello se puede decir que existen evidencias de geología estructural y morfoestructural de que existe una subsidencia por un proceso geológico como es el fallamiento activo además las fallas geológicas deben continuar a profundidad su movimiento y deben ser más antiguas que el Holoceno porque en la Sierra de Las Cruces las fallas NE-SW y E-W cortan a las rocas volcánicas que van edades de 3.71 Ma a 38, 790 años (García-Palomo et al., 2008) y en el Volcán San Antonio que se fecho en 3 Ma es cortado por la falla San Antonio (García-Palomo et al., 2000) así también en el Nevado de Toluca que es afectado por fallas con rocas en edades que van de 1.6 Ma a 10, 500 años que son cortadas por la falla Zacango (García-Palomo et al., 2000); en desplazamientos verticales recientes se ha fechado en 6045 años en la falla Tenango (Norini et al., 2006). Estos últimos datos geocronológicos nos llevan a sugerir que el sistema de fallas de la ZMVT tiene una actividad de por lo menos desde los 3.71 Ma hasta hoy en la actualidad y que va acompañada de una subsidencia por fallamiento geológico. Esta subsidencia por fallamiento geológico debe sumarse a la subsidencia por extracción de agua subterránea y daría una subsidencia total (figura 32 y 35).

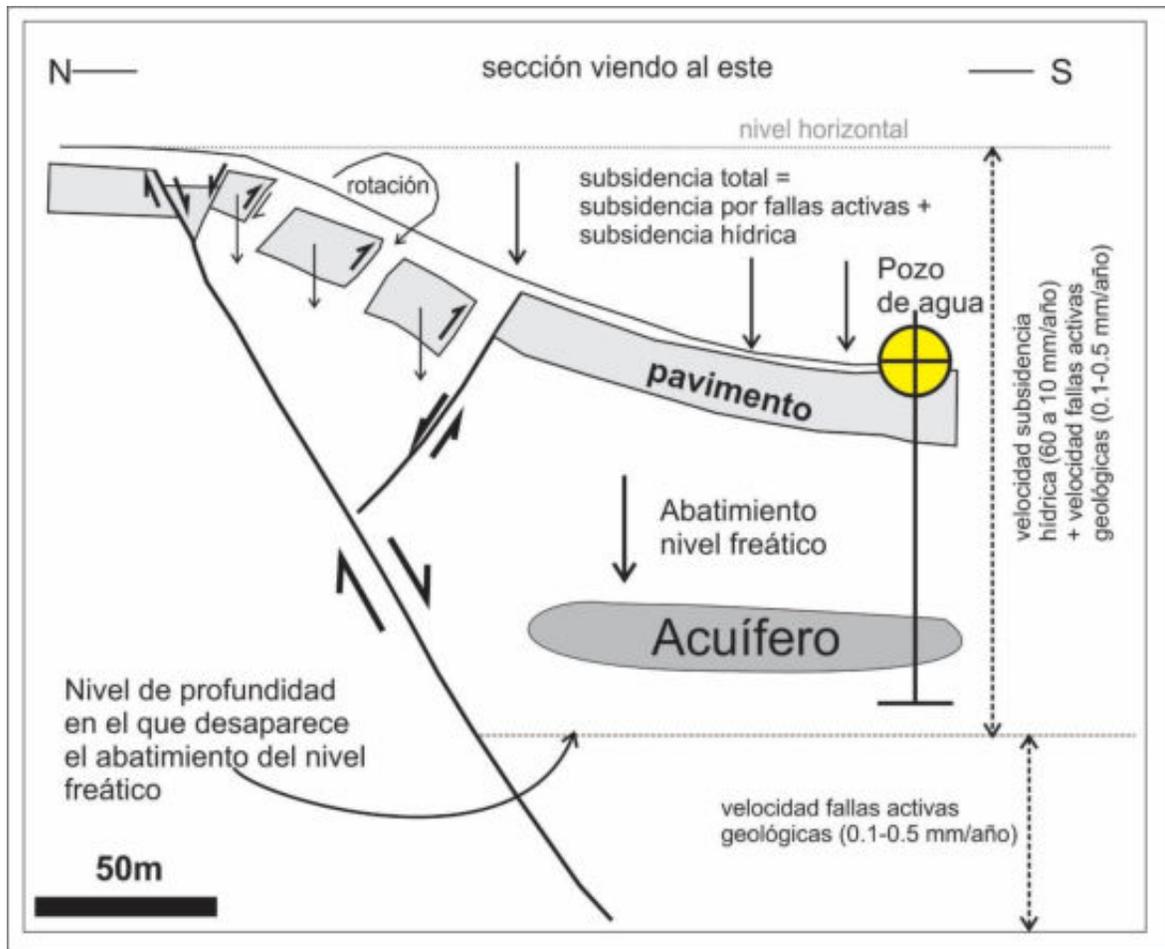


Figura 32 Modelo estructural que muestra el actuar simultáneo de ambos tipos de subsidencia por extracción de agua subterránea y por fallamiento activo geológico. A cierto nivel de profundidad actúa en mayor medida la subsidencia por extracción del agua subterránea y después a mayor profundidad la subsidencia por fallamiento activo se vuelve más importante. El fallamiento activo con valores de 0.1 mm/año a 0.2 mm/año como mínimo calculados en la falla Totoltepec.



Figura 33 Foto de la falla Totoltepe, en la calle Albert Einstein y esquema de falla normal con escalón aproximado de 30cm en la calle Albert Einstein y en la zona industrial. Se observa un desplazamiento vertical de tipo normal.

7.3 Algunas relaciones entre fallamiento y extracción de agua de pozos hídricos

En el informe de la Comisión Nacional del Agua (CNA) de 2002 publicado en el DOF de 2015 muestran que en la ZMVT las extracciones de agua subterránea han rebasado la potencialidad de los acuíferos que se reflejan en abatimiento de los niveles piezométricos y formación de grietas en el terreno. En este informe se muestra que efectos simultáneos son la desaparición manantial, descenso nivel freático, abatimiento de niveles piezométricos y aumento en el costo de bombeo. Estos efectos se relacionan con el crecimiento de población notable en la ZMVT que inició en 1980 paralelo con el desarrollo industrial, crecimiento de zona urbanizadas y con la captación de agua potable del Sistema Cutzamala y del Valle de Toluca hacia la Ciudad de México desde los años sesentas y setentas (CNA, 2002). Los estudios de grietas empiezan en los años setentas como lo muestra el informe de la CNA de 2002. Menciona este informe que en 1977 la Compañía de Ingenieros

Civiles y Geólogos Asociados realizó el levantamiento de grietas para Comisión Nacional de Aguas del Valle de México (CNA, 2002) caracterizando su localización, abertura, profundidad y orientación; así también que la empresa CONSULTEC entre 1978 y 1979 detecta grietas por sobreexplotación agua subterránea en depósitos lacustres compresibles y realiza mediciones durante un año para determinar desplazamientos verticales y horizontales empleando piezómetros y mecánica suelos al final reportan 100 grietas en un área de 1500 km² y que 21 grietas están al sur de la carretera Toluca-Lerma.

En 1987 la Cía. Lesser y Asociados muestra que durante 1970 a 1980 hay una evolución piezométrica con abatimientos que varían de 70 m en la zona industrial de Toluca y que disminuyen radialmente hasta abatimientos 10m a 20m (CNA, 2002); esta compañía menciona que en Almoloya del Rio existen abatimientos de 30m y en Atarasquillo hay abatimientos de 30 y 60 m; mientras que en el norte de Toluca existen abatimientos de 10m. Al final el informe de CNA (2002) concluye que los abatimientos son notables en zona industrial de la ciudad de Toluca y al pie de la Sierra de Las Cruces.

Hernández-Conde (2014) muestra con imágenes satélite de interferometría y con datos piezométricos muestra que de 2003 al 2010 ha habido subsidencia en la ZMVT con velocidades de 53 mm a 30 mm/año noreste de la ciudad de Toluca y en Toluca de 30 a 19 mm /año aproximadamente.

En algunas casas las personas mencionaron que existe una alta permeabilidad a lo largo de las fracturas y grietas ya que, al romperse tuberías de agua, el agua seguía el rumbo de la falla moviéndose lateralmente y salir en otro lugar. Otras personas en San Pedro Totoltepec mencionan que cuando hay lluvia el agua corre por las grietas y se desplaza a casas vecinas. En otros lugares de las fallas se mencionó que cuando llovía en abundancia y duraba tiempo las grietas aumentan su abertura. En varias localidades adyacentes a la falla Totoltepec y a las fallas Santa Ana en el bloque del alto de las fallas se observó la ubicación de varios pozos de agua

subterránea. En una casa habitación se nos mencionó que cuando el pozo trabaja sí parece haber movimientos ligeros en los cimientos de la casa. Esto sugiere que la extracción de agua subterránea puede estar ejerciendo control en la compactación de niveles estratigráficos del bloque del alto de la falla.

Estas observaciones sugieren los siguientes procesos que parecen ocurrir simultáneos con la subsidencia por abatimiento hídrico y subsidencia por fallas activas geológicas:

- a) Existe una remoción de materiales en las paredes de las grietas a distintas profundidades.
- b) Se presenta una alta permeabilidad en las fracturas de la falla.
- c) Es probable que se esté dando el proceso de reptación de suelo a niveles locales.
- d) Es probable que haya expansión de arcillas al recibir agua de lluvia
- e) La recarga de agua a los acuíferos puede estar influyendo en cambios de volumen a profundidad y originar nuevas grietas.
- f) A nivel de mayor de profundidad y pasando las posiciones del final de los pozos de agua subterránea deben continuar las fallas geológicas y deben tener movimiento.

Las zonas de mayor subsidencia hídrica en los mapas Hernández-Conde (2014) muestran direcciones radiales regionales y algunas con orientación NW-SE (Figura 34). Mapa de velocidad de desplazamiento en el acuífero del Valle de Toluca (Hernández-Conde, 2014), y con un control notable por el curso del río Lerma. En el informe de la CNA (2002) también se mencionan abatimientos radiales en la zona de Lerma. Estos abatimientos radiales generan grietas radiales que tomando en cuenta la orientación obtenida por CNA (2002) y Hernández-Conde (2014) no corresponden con las orientaciones documentadas en este trabajo de tesis.

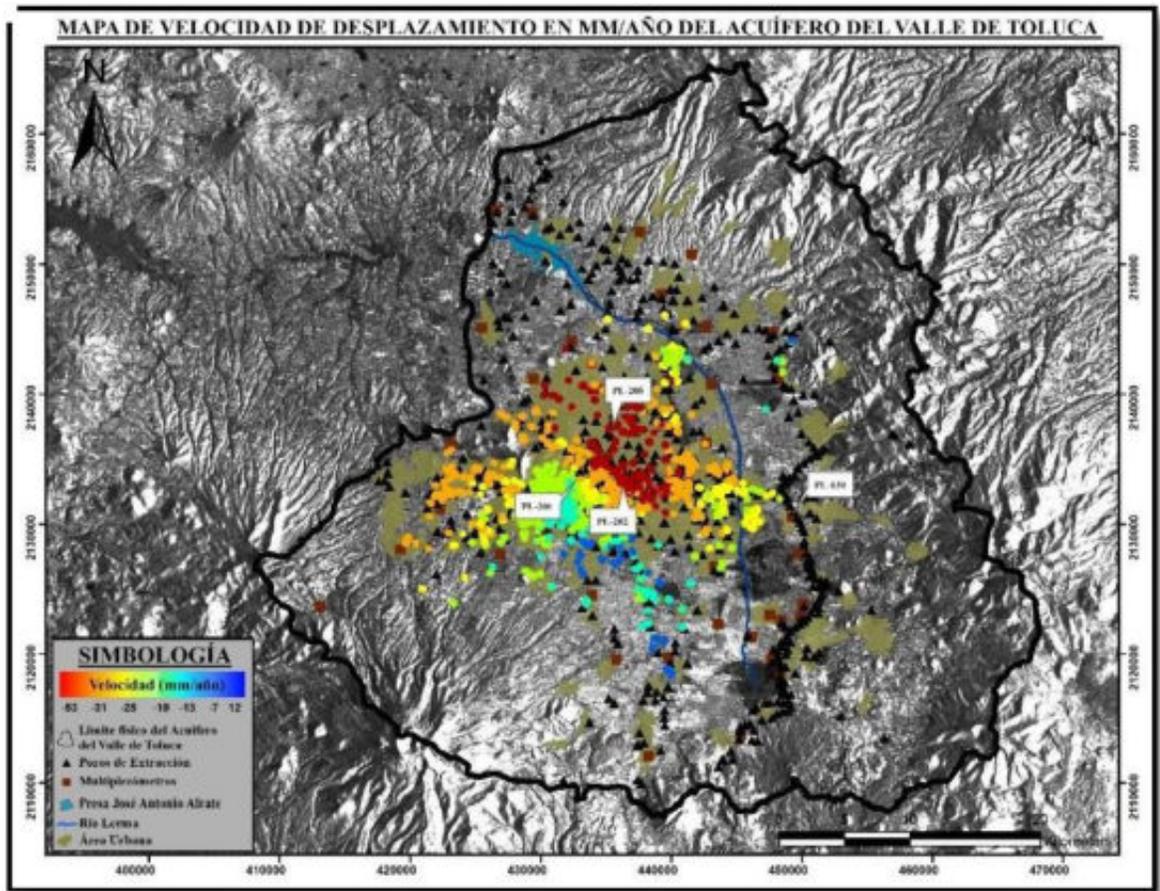


Figura 34 Mapa de velocidad de desplazamiento en el acuífero del Valle de Toluca (Hernández-Conde, 2014).

Los resultados de este trabajo muestran que la orientación de las fallas y grietas en la ZMVT tienen direcciones NE-SW, E-W y N-S y estas direcciones de estructuras no coinciden con los resultados de los trabajos previos mencionados que toman en cuenta la subsidencia por abatimiento hídrico. Esto lleva a establecer que existe una componente de fallamiento geológico activo a niveles más profundos de los acuíferos explotados por agua subterránea y que en niveles de profundidad (función de la profundidad de pozos de agua de 100 a 300 m) donde se encuentran los acuíferos, las fallas y grietas muestran una mayor velocidad de desplazamiento intensificada por el abatimiento del nivel freático, los niveles piezométricos y procesos de compactación por pérdida de volumen en capas geológicas. Es por ello que se considera que existe una subsidencia total o neta que es la suma de la subsidencia por abatimiento hídrico y la subsidencia por fallas geológicas activas

(figuras 32 y 35). Los pozos de extracción de agua se ubican al alto y bajo de las fallas normales y debido a que las fallas geológicas no se reflejen en los valores de subsidencia de Hernández-Conde (2014) puede ser debido a que las fallas tienen una alta permeabilidad hídrica.

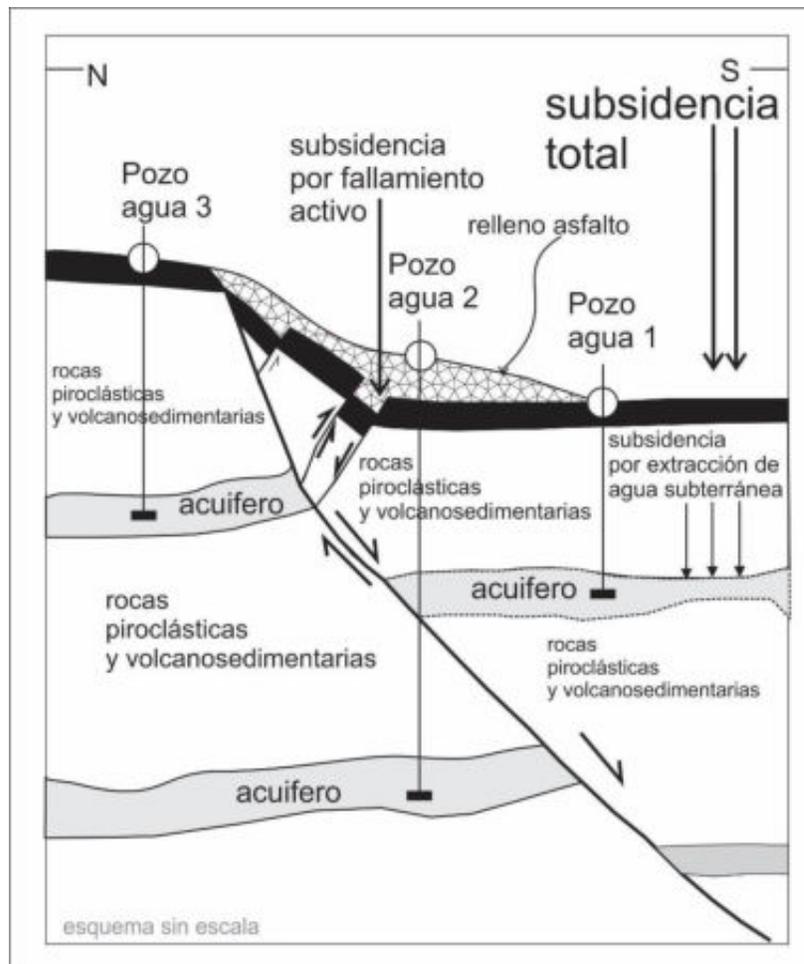


Figura 35 Proceso de subsidencia total o neta que es la suma de la subsidencia por extracción de agua subterránea mediante pozos más la subsidencia por fallamiento activo y a mayor profundidad prevalece el fallamiento geológico activo. *Elaboración propia*

8. Discusión de la problemática

8.1 Evolución del fallamiento geológico activo

El fallamiento geológico activo en la ZMVT no se había considerado como una alternativa y relacionado a la presencia de grietas en trabajos anteriores hasta este trabajo de tesis. La presencia de las fallas geológicas se evidencia por los siguientes resultados:

- a) Las grietas presentan una orientación y actitudes estructurales similares a las fallas y fracturas que rodean a la ZMVT como en la Sierra de Las Cruces, en los volcanes San Antonio y Nevado de Toluca, y en el sur en el sistema de fallas de Tenango (figuras 25 y 27).
- b) El fallamiento y las grietas presentan desplazamientos verticales siguiendo planos de debilidad que ya existían a profundidad.
- c) Las geometrías de fracturas o grietas y su cinemática son concordantes con geometrías de fallas normales en un régimen extensional geológico.
- d) La ZMVT está rodeado al oriente y al sur por evidencias de fallamiento activo con direcciones E-W y NE-SW. En el oriente por el fallamiento activo poco estudiado de la Sierra de Las Cruces (Angeles-Moreno et al., 2014) y recientes trabajos en la ENES-Acatlán de la UNAM como la falla de Ciudad Satélite (Beatriz-Rodríguez, comunicación personal). En el sur el Sistema de Fallas Tenango que presenta evidencia de actividad y daña carreteras y casas (Norini et al., 2006). Subsistencia debido a fallas geológicas activas se han reportado en la ciudad de Morelia y presentan orientaciones NE-SW y E-W (Garduño-Monroy et al., 2001).

La evolución de estas fallas geológicas activas empieza por lo menos entre los 3 Ma y 50 000 años (figura 36), si se considera que las fallas activas en Tenango cortan rocas volcánicas andesíticas del Nevado de Toluca que presentan edades de 1.6 a 3.0 Ma (García-Palomo et al., 2000) y que en el valle de Tenango rocas piroclásticas de 50 000 años de edad rellenan el graben limitado por el Sistema de Fallas de Tenango (Norini et al., 2006). Las fallas geológicas fueron sepultadas por depósitos piroclásticos del Nevado de Toluca entre 12 000 y 10 000 años de acuerdo a los fechamientos existentes de las últimas erupciones del estratovolcán y en el que se ha interpretado que estos depósitos llegaron hasta la Ciudad de Toluca (García-Palomo et al., 2000; Arce et al., 2003; Norini et al., 2006). Las fallas se reactivaron probablemente alrededor de los 6000 a 5000 años fracturando los depósitos piroclásticos del Nevado de Toluca de 10 000 años esto es soportado, si consideramos que las fallas de Tenango (Norini et al., 2006) y las de la ZMVT de este trabajo tuvieron una similar actividad de fallamiento, ya que el Sistema de Fallas de Tenango ha tenido repetidos pulsos de fallamiento (Norini et al., 2006). Se analizó en el capítulo de peligros geológicos que la posible velocidad del desplazamiento vertical debería andar entre 0.1 mm/año a 0.5 mm/año con base en las consideraciones geológicas y la comparación con el Sistema de Fallas de Tenango. Las fallas continúan su actividad en el siglo XX y siglo XXI, sin embargo ahora el movimiento de estas fallas es enmascarado por velocidades de desplazamiento verticales mayores de alrededor 10 mm/año a 70 mm (Hernández-Conde, 2014) de debidas a la extracción de agua subterránea.

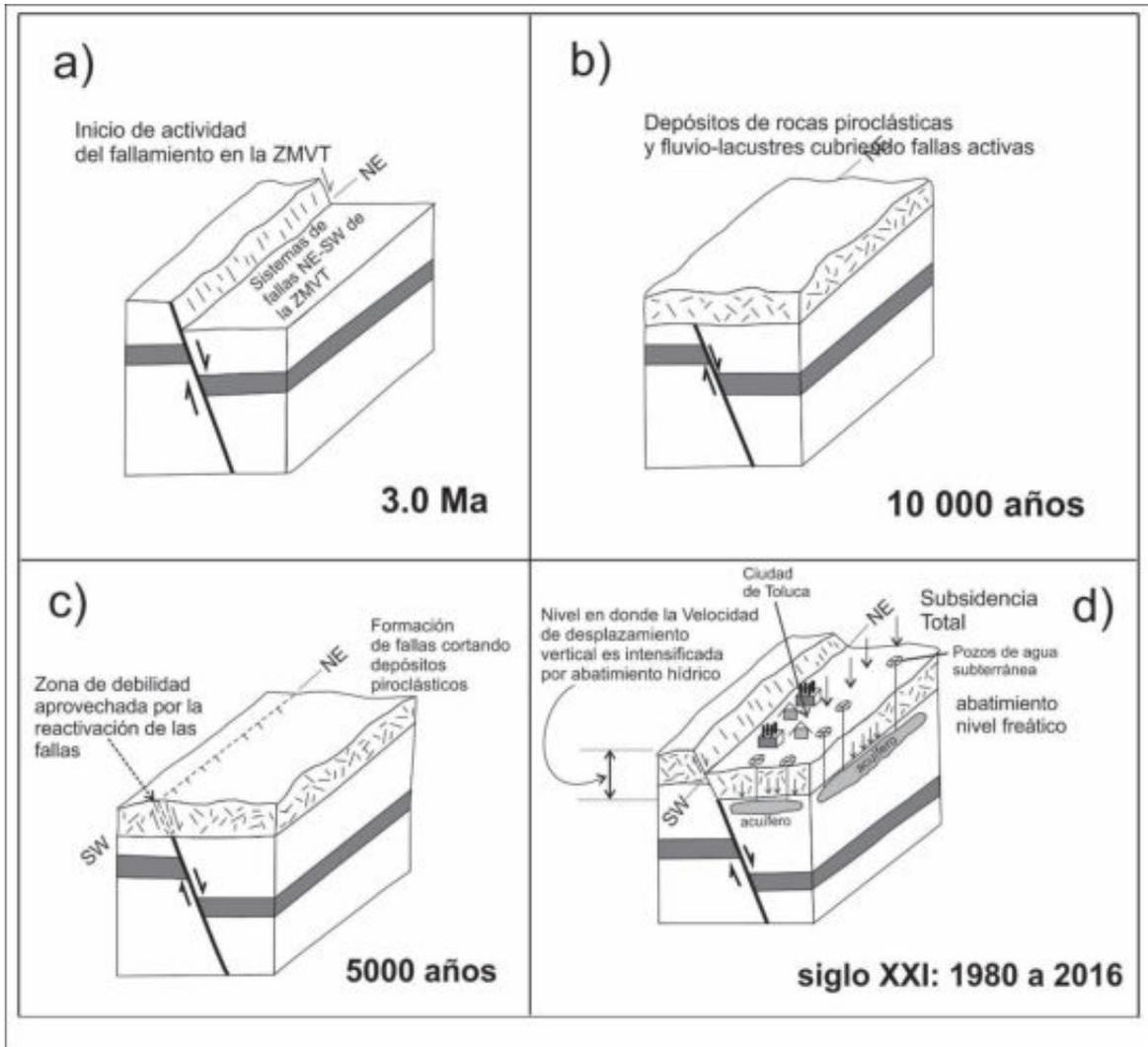


Figura 36 Se muestra un modelo geológico de la evolución de las fallas geológicas activas y la posterior aparición de fallas y grietas debidas a la subsidencia ocasionada por la extracción de agua subterránea. Las etapas a), b) y c) son dominadas por las fallas geológicas activas y la etapa actual d) es una subsidencia compuesta o total dada por subsidencia hídrica más la subsidencia por fallas geológicas activas. Elaboración propia.

8.2 Subsistencia por abatimiento de niveles freáticos y subsidencia por fallas geológicas activas

Las evidencias de abatimiento de niveles piezométricos y de niveles freáticos han sido reportadas en trabajos hidrológicos e hidrogeológicos en el acuífero del valle de Toluca (AVT) por distintas compañías desde el año de 1977 según el informe de la Subdirección General Técnica de la CNA (2002). Estos abatimientos de los niveles piezométricos del acuífero fueron registrados entre 1970-1987 y van del orden de los 70m (zona industrial de Toluca), 40 m (en Lerma) y que disminuyen radialmente hasta alcanzar valores de 10 m a 20 m resto de la zona (Informe CNA, 2002). Estos abatimientos hoy día deben ser mayores. Este comportamiento radial y controlado aparentemente por la cuenca del río Lerma, también se muestra en los resultados de estudios de subsidencia del terreno usando interferometría con períodos del 2003 al 2010 (Hernández-Conde, 2014) en donde los valores extremos en velocidad de subsidencia van de 10 mm/año a 76 mm/año. Las grietas de distribución radial de la CNA (2002) y los resultados de Hernández-Conde (2014) contrastan con los resultados de este trabajo ya que las fracturas y grietas no son en longitud pequeñas y siguen orientaciones preferenciales E-W y NE-SW que corresponden con las orientaciones de fallas geológicas activas que limitan a la ZMVT. Las profundidades que alcanzan los pozos de agua en el centro de la ZMVT, que van de 100m a 300m, en conjunto con la posición de los acuíferos a partir del incremento de la demanda de agua potable debido al crecimiento poblacional y las actividades industriales en la ZMVT, y la presencia de fallas geológicas activas provocan que el Acuífero del Valle de Toluca (AVT) llegue a mostrar velocidades de desplazamientos verticales importantes en los niveles superficiales; por ejemplo en la ciudad de Morelia algo similar ocurre ya que hay desplazamientos verticales van de los 4 a 6 cm anuales y también se ha propuesto la presencia de fallas geológicas activas en plena ciudad (Garduño-Monroy et al., 2001).

La velocidad de subsidencia por el fallamiento geológico activo es muy diferente y mucho menor a la subsidencia por abatimiento de niveles freáticos. Como ya se

había analizado la velocidad de fallamiento geológico es del orden de 0.1 mm/año a 0.5 mm/año mientras que la subsidencia por abatimiento hídrico según los datos de interferometría de Hernández-Conde (2014) es del orden de 10 mm/año a 70mm/año. En el Zócalo de la Ciudad de México la subsidencia se maneja de alrededor de 8 m/año (Tomas, et al., 2009) esto equivale a 8000 mm/año. Usando la técnica de análisis interferométrico InSAR (Solano-Rojas et al., 2015) obtuvieron valores de subsidencia por deformación de terreno que varían de 25 mm/año a 330 mm/año para la Ciudad de México y proponen que existe una relación a nivel local entre el abatimiento nivel freático con la velocidad de subsidencia a nivel superficial y aplican su modelo a Chalco en donde obtienen una velocidad de subsidencia del terreno superficial de 400 mm/año y que corresponde con 6.2 m/año de abatimiento del nivel freático. En la zona industrial de Toluca si se toma en cuenta que en 17 años ha habido un abatimiento del nivel piezométrico de 70m se tendrá el cociente $70\text{m}/17$ años cuyo resultado será igual a 4m/año de abatimiento. Los valores observados de desplazamiento vertical por ejemplo de 40 cm observados en ocasiones en la falla Totoltepec sugieren abatimientos 6m/año de acuerdo al modelo de Solano-Rojas et al. (2015). Se ve claro que la subsidencia debida al fallamiento geológico activo no es perceptible a cierto nivel estratigráfico y que dependerá la posición de este nivel de la profundidad de los pozos de extracción de agua subterránea y de la profundidad de los acuíferos. Las velocidades de subsidencia del terreno superficial y de los abatimientos de niveles freáticos enmascaran y ocultan la componente de la velocidad de subsidencia debida al fallamiento geológico activo.

8.3 Peligros y riesgos debido al fallamiento activo y a la subsidencia total

Los diferentes tipos de peligros debido a la subsidencia total en la ZMVT que es la suma de la subsidencia por extracción de agua subterránea y la subsidencia por fallamiento activo, es la formación de fallas y grietas, daños a infraestructura urbana como zonas industriales y habitacionales, la vulnerabilidad a inundaciones, daños a diferentes tipos de tuberías y sismicidad no estudiada. El mapa de peligros que se presenta en esta sección es un acercamiento a la integración de los siguientes factores o variables como: geología, fallas, fracturas y grietas, hipsografía, pendiente, subsidencia por extracción de agua subterránea y daños en infraestructura de zonas industriales y residenciales (Figura 37). Mostrando como resultado la clasificación de peligro por fallas y fracturas, con los colores: rojo que representa un alto índice de peligro, el rosa un peligro menor sin embargo con el paso del tiempo podría convertirse en peligro alto, el color azul es bajo debido a que el perímetro de influencia de las fallas no es mayor. Cabe señalar que con el paso del tiempo las estructuras activas pueden ir evolucionando y por ende incrementar el peligro en la ZMVT.

8.3.1 Formación de fallas y grietas

La formación de fallas y grietas implica un desplazamiento vertical y afectación a infraestructura urbana de la ZMVT lo largo del rumbo de la falla. El desplazamiento vertical que se ha documentado en este trabajo y por diferentes trabajos de Protección Civil de Toluca varía de los 50cm a los 10 cm sin embargo en Santa María Oxtotitlán se registran desplazamientos verticales de 1.70 m; este desplazamiento vertical, es deformación y afecta a casas habitación y fraccionamientos a lo largo del rumbo de la falla y de las grietas, así como a zonas industriales de la ciudad de Toluca. Si se considera que el riesgo (R) es igual al peligro (P) por vulnerabilidad (V) y que la vulnerabilidad es igual a la exposición por la susceptibilidad, entonces se tiene que la fallas al afectar a la población de la ZMVT y que tiene distintos niveles de ingreso económico y que se refleja en los materiales que usan en su casa habitación acordes a su situación económica hay un valor de vulnerabilidad importante con base en la ubicación de muchas casas habitación y zonas industriales a lo largo de la traza de las fallas y de las pérdidas y daños que no se ha considerado hoy día en la ciudad de Toluca y de la ZMVT. La probabilidad de ocurrencia del fracturamiento de las casas habitación y de las tuberías de gas o combustible de las zonas industriales se ha visto es muy alta y está ocurriendo y aumentando como se ha documentado en este trabajo y esta probabilidad está en función de las velocidades de subsidencia y que se prevé aumenten ya que la ciudad de Toluca y la ZMVT están en creciente desarrollo poblacional e industrial. La intensidad y la probabilidad de que se formen grietas o fallas en las capas de suelo y depósitos volcanosedimentarios es un factor a introducir en la probabilidad del fracturamiento de infraestructura y se ha visto por ejemplo que en la Ciudad de México depende de la heterogeneidad y de las propiedades geotécnicas de los suelos y depósitos lacustres (Carreón-Freyre et al., 2006).

8.3.2 Daños a infraestructura urbana, drenaje, naves industriales, tuberías de gas, y líquidos.

En los últimos 10 años en la ZMVT, como se ha visto en este trabajo, se han incrementado los reportes por aparición de grietas y fracturas en el subsuelo y en consecuencia agrietamientos en las obras civiles. Hasta el momento se ha logrado obtener un mapa de peligros geológicos por fallamiento y fracturamiento.

Los daños a casas de habitación en bardas, trabes, pisos y cisternas constituyen un problema social y económico y que ocurre a lo largo de la traza de las fallas y grietas de Totoltepec, La Virgen, Miltepec, La Teresona, La Mora, Oxtotitlán, Lerdo y Cerro de Coatepec. Estos daños están en función del tipo de calidad de los materiales de construcción y de la ubicación de las casas habitación y otros tipos de obras civiles con respecto al área de influencia de la zona de daño de las fallas, por ejemplo en la ciudad de Morelia las áreas de influencia de los daños dependen de la geometría de las fallas y llegan a alcanzar 25 m (Garduño-Monroy et al., 2001) mientras que en la ciudad de Toluca puede llegar a alcanzar valores de 100 m también dependiendo de la geometría de las fallas y grietas. Las demoliciones de casas de tipo interés social son una evidencia de la vulnerabilidad debido a materiales económicos usados en la construcción de estas casas y que repercute en pérdidas económicas por parte de constructoras y de los habitantes, esto se ha documentado en la ciudad de Morelia (Garduño-Monroy et al., 2001) y en el municipio de Nicolás Romero en el Estado de México (Angeles-Moreno et al., 2014).

En algunas calles la fractura de la tubería de drenaje ocasiona condiciones insalubres para los habitantes en las colonias afectadas como se observó en algunas partes de la falla Totoltepec. Las tuberías de gas o algún otro tipo de combustible se puede fracturar debido a los desplazamientos verticales en las fallas activas de la ZMVT esto puede provocar accidentes domésticos o industriales e incluso incendios, por lo que es necesario evaluar este peligro urbano.

8.3.4 Sismicidad

La ZMVT carece de estudios de sismicidad, y ahora que se conocen los resultados de este trabajo sería recomendable estudiar si las fallas activas de la ZMVT están relacionadas con eventos sísmicos históricos. En el sur de la ZMVT a lo largo de la parte oriente en el sistema de fallas de Tenango (García-Palomo et al., 2000; Norini et al., 2006) se han reportado valores que van de 2.6 a 4.0 (Campos-Enríquez et al., 2015), y entre el 18 al 31 de Agosto de 1980 se registró un enjambre de sismos de magnitud de 3.5 entre Tenango y Santiago Tianguistengo (Yammamoto y Mota, 1988 en Norini et al., 2006). La ZMVT desde el punto de vista sísmico es susceptible a presentar actividad y que es soportado por los resultados de este trabajo.

9. Conclusiones y recomendaciones

Tomando en cuenta la información estructural y geomorfológica de la ZMVT recabada en este estudio, el resultado de esta investigación es la presencia de fallas geológicas activas, ya que en la mayoría de las zonas afectadas hay un desplazamiento considerable de más de 30cm y alcanzando hasta 1.0 metro en algunos lugares de la zona centro de la ZMVT. Sin embargo, cabe mencionar la relación que existe entre la subsidencia del terreno y de algunas grietas, debido a alta demanda de recurso hídrico por las zonas industriales, residenciales y actividades agrícolas, ya que en los últimos años la extracción intensiva de agua ha ido aumentando paulatinamente, lo que provoca que el terreno donde se asienta la ZMVT sea inestable y de alto peligro con relación a fallas geológicas activas y de la subsidencia en el terreno con sus grietas que acompañan a este proceso.

Las zonas con mayor peligro por fallamiento y fracturamiento en la ZMVT son: San Pedro Totoltepec, Santa María Totoltepec, Santiago Miltepec, San Mateo Oxtotitlán, Santa Ana, Fraccionamiento La Virgen en Metepec, La Mora y la Teresona en Toluca. Esta zona es donde hay mayor afectación por fracturamiento y agrietamiento de casas habitacionales principalmente, así como también calles, bardas industriales, y escuelas. En algunas casas y escuelas es alto peligro porque hay familias completas que siguen habitando las casas a pesar del grado de fracturamiento de estas y los estudiantes en las escuelas que están propensos a sufrir daño por caída de partes de la construcción.

Las fallas geológicas activas tienen direcciones E-W, NE-SW y N-S principalmente y su presencia es evidenciada porque las fallas son acompañadas por fracturas y grietas con geometría muy regular, que presentan orientaciones y direcciones similares a las fallas y fracturas en la Sierra de Las Cruces, fallas en el Nevado de Toluca, y fallas de Tenango. Otra evidencia importante de la presencia de fallas geológicas es que actúan como “cicatrices antiguas a profundidad” y son zonas de

debilidad por las que la subsidencia hídrica aprovecha para formar fracturas y grietas de subsidencia. Y por último las grietas y fracturas presentan indicadores cinemáticos de fallamiento extensional principalmente.

Se recomienda mantener un monitoreo permanente de las evoluciones de las fallas geológicas que causan mayor afectación, evitar ampliaciones o modificaciones de casa habitacionales con el propósito de disminuir el peligro, monitorear el desarrollo de fracturas y grietas en las zonas con mayor peligro en periodos mensuales o trimestrales, dependiendo el grado de afectación y evitar cubrir las fracturas y grietas para observar su desarrollo.

Otra recomendación es realizar un inventario de terrenos superficiales que están cercanos a las zonas de influencia de las fallas y las mayores grietas activas para establecer mapas más detallados de peligros y riesgos geológicos por fracturamiento de zonas industriales y de viviendas u otro tipo de infraestructura como tuberías de gas o combustibles flamables.

Se recomienda por parte de las carreras de geología ambiental y geografía continuar con estudios de vulnerabilidad y de exposición por fallas y fractura en la ZMVT, ya que un inventario de tipos de materiales de construcción y condiciones económicas de las viviendas o industrias afectadas permitirá construir mapas de vulnerabilidad y exposición para poder establecer un riesgo cuantificado en valores de pérdidas económicas o riesgos por rompimiento de tuberías industriales y de viviendas ya sea de agua, drenaje o algún fluido flamable.

10. Bibliografía

Aceves-Quesada F., Legorreta-Paulín G., Alvarez-Ruiz Y. (2014). *Cartografía geomorfológica para el inventario de procesos gravitacionales en la cuenca endorreica del arroyo La Ciénega, flanco oriental del volcán Nevado de Toluca*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 66, P. 329-342.

Aceves-Quesada F., López-Blanco J., Martín del Pozzo A.L. (2006). *Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y SIG en el área del Nevado de Toluca, centro de México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 23, P. 113-114.

Aguirre-Díaz G. de J., Zuñiga-Dávila R., Pacheco-Alavarado F.J., Guzmán-Speziale M., Nieto-Obregón J. (2000). *El graben de Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo*. GEOS, vol. 20, P. 2-7.

Al Calderhead, A. Martel, P -J. Alasset, A. Rivera, y J. Garfias. (2010). *Land subsidence induced by groundwater pumping, monitored by D-InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico*. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 36, p. 9-23. 2017, De Taylor and Francis Online Base de datos.

Alaniz-Álvarez, S., Nieto-Samaniego, A.F. (2002). *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, Tomo LVI, p. 65-82.

Allegre, C (1987): *Les fureurs de la Terre*. Ed. Odile Jacob. Pans. 189 pp.

Anderson, E. M. (1951). *The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Brittan*, Edinburgh, Oliver and Boyd.

Anderson, E.M., 1951. *The Dynamics of Faulting, 2nd ed*. Olivier & Boyd, Edinburgh.

Angeles-Moreno E. (2000). *Estudio de Riesgo por fallamiento activo, problema geotécnico y geológico ambiental. (Manzana 2 de Ciudad Campestre, conjunto urbano la "Encarnación", Col. 22 de febrero, Municipio de Nicolás Romero. Estado de México*. Inédito.

Angeles-Moreno E. (2014). *Afectación estructural en casas de interés social de Ciudad Campestre debido a factores geotécnicos, geológico ambientales y fallas activas, Municipio de Nicolás Romero, Estado de México, México*. I Congreso Nacional de Geociencias Ambientales, Guatemala., 1, 75. Resumen. Facultad de Geografía, UAEMEX, Centro de Geociencias, UNAM.

Angelier, J., 1994. *Fault slip analysis and paleostress reconstruction*. In: Hancock, P.L (Ed.), *Continental Deformation*. Pergamon Press, Oxford, pp. 53±100.

Arce, J.L., Macías J.L., Vázquez-Selem, L. (2003). *The 10.5 ka Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, Mexico: Stratigraphy and Hazard implications*. Geological Society of America Bulletin. V. 115, P. 230-248.

Arreygue-Rocha, E., 1999, *Le Condizioni di pericolosità idrogeologica nella città di Morelia, Michoacan (Messico)*: Perugia, Italia, Università degli Studi di Perugia, Tesi di dottorato XI Ciclo 1995-1998, 171 p.

Ayala Carcedo, F. J. (1987). "Introducción a los riesgos geológicos" *Riesgos Geológicos*; I.G.M.E. Madrid. Vol. 1, 3-21.

Barreto Caro, (2005). *Estimación de un Índice Relativo de Riesgo Múltiple en Áreas Urbanas* (maestro en Ciencias de la Tierra). Universidad de Colima, facultad de ciencias.

Caballero Miranda C. I. (2013). *Riesgos Geológicos. Introducción a las Ciencias de la Tierra* (25). México: Ciencias de la Tierra.

Cabral-Gano, E., Lugo-Hubp, J., Ortega, A., Duran Carmona, V. (2000). "Análisis de fallas y fracturas en la delegación Iztapalapa: etapa I." UNAM, México, 4 pp.

Campos-Enríquez J.O., Lermo-Samaniego J.F., Antayhua-Vera Y.T., Chavacán M., Ramón-Márquez V. M. (2015). *The Azlán 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, Vol. 67, P. 315-335.

Capra, L., and Macías, J.L. (2000). *Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca volcano, central Mexico*: Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 102, p. 149–168.

Cardona, O.D. (1993). *Manejo ambiental y prevención de desastres: dos temas asociados, Anexos*, in *Los desastres no son naturales*, La Red, pp. 75-93:

Carreón-Freyre D.C., Hidalgo-Moreno C.M., Hernández-Marín M. (2006). *Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVIII, p. 237-250.

CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres, (2001); *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*.

CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres, (2006); *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*.

Cendrero, A (1980): *Bases doctrinales y metodológicas*. 1 Reunión Nac. De Geol. Amb. y Ord. del Territorio. Vol. Ponencias. Santander. p. 1-62.

Cerca, M., Carreón-Freyre, D., López-Quiroz, P., Ovando-Shelley, E., Doin, M.P., Gutiérrez-Calderón, R., Gonzalez-Hernández, M., Jimenez-Sánchez, A., Blancas-Domínguez, D., 2012, *Engineering geology approach to the effects of land subsidence in Mexico City*, in Aranda-Gómez JJ, Tolson, G., Molina-Garza, R.S. (eds.), *The Southern Cordillera and Beyond: GSA Field Guide 25*, p. 115-134.

Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. (2002). *Determinación de la disponibilidad del agua en el Acuífero Valle de Toluca, Estado de México*. Toluca, Estado de México: Unidad de Comunicación Social de la Comisión Nacional del Agua.

COORDINACIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL DEL ESTADO DE MÉXICO (CMPCT), 2016. Sistema Estatal de Riesgos del Estado de México.

Corapcioglu, M.Y. (1984). *Land subsidence a state of the art review. Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media. En: Bear and M. Y. Corapcioglu (Ed.), NATO ASI Series E.82, Martinus Nijhoff Publishers, 369-444.*

CONABIO. 2012. "Sistema nacional de información sobre biodiversidad: Portal de geo-información".

Dávila-Hernández N.A., Madrigal-Uribe D., Expósito-Castillo J.L., Avalos-Ortiz D.R. (2014). *Resultados preliminares por procesos de subsidencia en la cuenca alta del río Lerma utilizando el método persistent scatterer*. Universidad Autónoma del Estado de México.

Demant A. (1978). *Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación*. Revista Instituto de Geología, UNAM. Vol. 2, núm. 2, p. 172-187.

Dirección de Bomberos de Protección Civil de Toluca (2005), *Atlas de Riesgos de Toluca*, Dirección de Protección Civil de Toluca, Toluca.

Domínguez, L.M. (2002). "Recomendaciones sobre los agrietamientos del terreno en varias colonias y poblados de la delegación Tláhuac." CENAPRED, México.

Dunne, W.M. y Hancock, P.L. (1994) [In:] *Continental deformation*, P.L. Hancock (ed.): 101-120. Pergamon Press. Pollard D.D. & Aydin A. 1988 - Geol. Soc. Amer. Bull., 100: 1181-1204.

Eguiluz, S. Aranda, M. Marrett, R. (2000). *Tectónica de la Sierra Madre Oriental*, México: Bol. Soc. Geol. Méx. LUI: 1 - 26.

Enríquez Moreno, (2013). *Usos Específicos del Suelo Urbano en el Nororiente de la Ciudad de Toluca. Formación y Cambios, 1970-2010*. (Licenciada en Planeación Territorial). Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Planeación Urbana y Regional.

Espinosa-Rodríguez, L.M., Balderas-Plata M.A., Cabadas-Báez H.V. (2014). *Caracterización geomorfológica del área natural protegida Nevado de Toluca: Complejo de volcanes Nevado de Toluca y San Antonio*. Ciencia UAT. 9(1):6-14.

Esteller M.V., Rodríguez R., Cardona A. and Padilla L. (2012). "Evaluation of hydrochemical changes due to intensive aquifer exploitation: case studies from Mexico". *Environmental Monitoring Assessment*, vol. 184, no. 9, pp. 5725-5741, Netherlands.

Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. (octubre del 2007). *Determinación de Riesgos Geológicos en el Sureste del Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México (mederos)*. Estudios Geológicos y Geofísicos de Riesgos Naturales, vol. 27, 14-pp.

FAO-UNESCO 1998. *World Reference Base for Soil Resources, by ISSS-ISRIC-FAO*. World Soil Resources Report No. 84. Rome.

Fossen H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press. pp. 457.

Galindo-Jiménez, I.; Laín-Huerta, L.; Llorente, Isidro, M., eds. (2008). *El Estudio y la Gestión de los Riesgos Geológicos*. Instituto Geológico y Minero de España (IGME): Medio ambiente. Riesgos geológicos.

Gallardo, Mogens. (2004). Enzimas Citocromo P450. En: Universidad de Concepción. *Tópicos de Ciencias Ambientales*. Universidad de Concepción Centro-EULA.

García-Flores, C. (2013). *Control local del hundimiento regional mediante inyección de agua en el subsuelo del Valle de México*. UNAM, Instituto de Ingeniería. Tesis Maestría.

García-Palomo, A., Macías, J.L., Garduño, V.H. (2000). *Miocene to Recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano región, Central Mexico*. *Tectonophysics*, 318. P. 281-302.

García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., Macías, J. L. (2008). *El arreglo morfoestructural*

de la Sierra de Las Cruces, México central. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 25, p. 158-178.

Garduño, V.H., Israde, I., Francalanci, L., Carranza, O., Chiesa, S., Corona, P., y Arreygue, E., 1997, *Sedimentology, volcanism and tectonics of the southern margin of the lacustrine basins of Maravatío and Cuitzeo, Mich., Mexico*, in IAVCEI General Assembly, Fieldtrip guidebook, Puerto Vallarta, Jal., Guadalajara, Jalisco, Gobierno del Estado de Jalisco, Unidad Editorial, 15 p.

Garduño-M., V.H., Arreygue-R., E., Chiesa, S., Israde-A., I., Rodríguez-T., G.M., y Ayala, G.M., 1998, *Las fallas geológicas y sísmicas de la Ciudad de Morelia y su influencia en la planificación del territorio: Ingeniería Civil*, v. 1, núm. 5 p. 3-12.

Garduño-Monroy V.H., Arreygue-Rocha E., Israde-Alcántara I., Rodríguez-Torres G.M. (2001). *Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 18. Núm. 1. P. 37-54.*

Garduño-Monroy, V.H., Rodríguez-Torres, G.M., Israde-Alcántara, I., Arreygue, E., Canuti, P., y Chiesa, S., 1999, *Efectos del clima (El Niño) en los fenómenos de fluencia de las fallas geológicas de la Ciudad de Morelia: Geos, Unión Geofísica Mexicana, v. 9, núm. 2, p. 84-93.*

GEM (2002b) *Diagnóstico ambiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, proyecto Ciudades Ecológicas. Secretaría de Ecología. México.*

Gobierno del Estado de México (1995) *Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca, Estado de México.*

Gobierno del Estado de México, 2000-2003: Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca, Estado de México.

Gobierno del Estado de México, 2003-2006: Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca, Estado de México.

Gobierno del Estado de México, 2006-2009: Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca, Estado de México.

Gobierno del Estado de México, comisión Coordinadora para la recuperación ecológica de la cuenca del río Lerma. (2002). *Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Lerma. Estado de México: Comité Editorial del Gobierno del Estado de México.*

Gobierno del Estado de México, Dirección General de Protección Civil del Estado de México. (2015). *Atlas de Riesgos del Estado de México. Zinacantepec, Estado de México.*

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Ed. Prentice Hall, Madrid, 715 pp.

Hernández-Conde I. (2014). *Análisis de subsidencia del terreno en el Valle de Toluca a partir del método Dual Pair Interferometry (DPI)*. UAEMex-Facultad de Geografía. Tesis Licenciatura.

Horcajada-Herrera, T., Moisés, R., Simancas Cruz y Dorta Antequera, P. (2000). *La Constatación y Validación de los Mapas de Riesgo de Avenidas en Pequeñas Cuencas Hidrográficas Mediante Sistemas de Información Geográfica. Propuesta Metodológica y Aplicación a la Ordenación del Territorio*. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles., v. 30, págs. 135-154.

IGME (1988): *Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España*. Serie Geología Ambiental. Madrid. 91 p.

IGME (1988): *Riesgos geológicos. 1 Curso de Riesgos Geológicos*. Serie Geología Ambiental. Madrid. 333 p.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2010; *Censo de Población y Vivienda del Estado de México*, Ciudad de México.

INFOMEGEN. (2009). *Atlas Geológico Ambiental del Estado de México*. Centro de Geociencias de la UNAM: Gobierno del Estado de México.

Jara, M., Hurtado, F.; Jara, J.M., y Suárez, R., 1994, *Zonificación sísmica de la Ciudad de Morelia: Morelia, Michoacán*, Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Escuela de Ingeniería Civil, Boletín informativo, núm. 5.

Johnson, C.A., Harrison, C.G.A. (1990). *Neotectonics in central Mexico: Physics of the Earth and Planetary Interiors*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, v. 64, p. 187-210.

Keller EA, Blodgett RH. (2007). *Riesgos Naturales. Procesos de la Tierra, como Riesgos, Desastres y Catástrofes*. España: Pearson Alhambra.

Krantz, R.W., 1988. *Multiple fault sets and three-dimensional strain: theory and application*. Journal of Structural Geology 10, 225± 237.

Langridge, R.M., Persaud M., Ramón-Zuñiga F., Aguirre-Diaz G.deJ., Villamor P., Lacan, P. (2013). *Preliminary paleoseismic results from Pastores fault and its role in the seismic Hazard of the Acambay graben, Trans-Mexican Volcanic Belt*. Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 30, núm 3. P. 463-481.

Lermo-Samaniego, J., Nieto-Obregón, J., y Zermeño, M., 1996, *Fault and fractures in the valley of Aguascalientes*. Preliminary microzonification, in World

Conference on Earthquake Engineering, 11th: Amsterdam, Elsevier, Paper, núm. 1651.

Lindsay M. W. (1999). Using color effectively in computer graphics. IEEE Computer Graphics and Applications, 1999, vol. 19, núm. 4, p. 20-35.

Lugo-Hubp J.I. (1988). *Elementos de Geomorfología Aplicada*. México, D. F.: Instituto de Geografía, UNAM.

Maderey-Rascón L.E., Jiménez-Román A. (2001). *Alteración del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México*. Investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía, UNAM. Núm. 45. Pp. 24-38.

Marsal, R. J. (1992). *"Hundimiento de la Ciudad de México."* Colegio Nacional, México 71 pp.

Martínez-Reyes, A. F., 1990, Suter, 1992, Quintero-Legorreta, 2002. *Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México: Universidad Nacional Autónoma de México*, Instituto de Geología, Revista, 9, 33–50.

Martínez-Reyes, J., y Nieto-Samaniego, A.F., 1990, *Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, Revista, v. 9, núm. 1, p. 33-50.

Maskrey Andrew. (1993). *Los Desastres No Son Naturales*. América latina: La Red. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Maskrey, Andrew (1989) *El Manejo Popular de los Desastres*. ITDG, Perú.

Maskrey, Andrew (1993) "*Vulnerabilidad y Mitigación de Desastres*". En: A. Mskrey comp. *Los Desastres No son Naturales*, La Red-ITDG, Tercer Mundo Editores, Colombia.

Nieto-Samaniego, Á. F., Consuelo-Macías R., Alaniz-Alvarez S. (1996). *Nuevas Edades Isotópicas de la Cubierto Volcánica Cenozoica de la Parte Meridional de la Mesa Central, México*. Revista mexicana de ciencias geológicas, v. 13, p. 117-122.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2014). *Análisis de la implementación de la Gestión del Riesgo de Desastres en el Perú*. Lima: GMC Digital SAC.

Peña Moné, J.L. (1997): *cartografía Geomorfológica básica y aplicada*. Geoforma, Zaragoza.

Peña-Moné, J.L. (1997): *cartografía Geomorfológica básica y aplicada*. Geoforma, Zaragoza.

Pérez-Cruz, G.A., 1988, *Estudio Sismológico de Reflexión del Subsuelo de la Ciudad de México: México D.F.*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de Maestría, 83 p.

Periodico oficial Gaceta del Gobierno. Tomo CLXXXVII, no. 99, 19 de noviembre de 2009. Decreto numero 13 por que se aprueba la declaratoria de ZMVT.

Powell, D. (1992) *Interpretation of Geological Structures Through Maps*; Longman Scientific and Technical, 176 pp.

Quintero Legorreta O. (2002), *Análisis estructural de fallas potencialmente activas*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LV (1), 1-11 pp.

Ragan, D.M. (1973) *Structural Geology. An introduction to Geometrical Techniques*, 2ª Ed.; John Wiley & Sons, 208 pp.

Rodrigo, M. L., Roura, E y Obrador, A. (1984). *Introducció a la topografia en el Barri Gòtic*. ICE de la UAB. Barcelona

Salas-García J.S., Gárfias J., Llanos H., Martel R. (2011). *Modelo numérico 1D de la dinámica de infiltración en la zona no saturada, acuífero del valle de Toluca*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. V. 28. Núm. 1. P. 147-160.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2014). *Ordenamientos Ecológicos Expedidos con o sin la participación de SEMARNAT*.

Singer, André; Rojas, Carlos; Lugo, M. (1983). *Inventario Nacional de Riesgos Geológicos: Estado Preliminar: Mapa, Glosario y Comentarios*. Venezuela: Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FVIS).

Solano-Rojas D., Cabral-Cano E., Hernández-Espriú A., Wdowinski S., DeMets C., Salazar-Tlaczani L., Falorni G., Bohane A. (2015). *La relación de subsidencia del terreno InSAR-GPS y el abatimiento del nivel estático en pozos de la zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 67. Núm. 2. P. 273-283.

Suter, M., 1991, *State of stress and active deformation in Mexico and western Central America: in Neotectonics of North America*, D.B. Sluening et al., eds., Geological Society of America, Boulder, Colorado, *Decade Map Vol. 1*, 401-1421.

Suter, M., Aguirre, G., Siebe, C., Quintero, O., y Komorowski, J.C., 1991, *Volcanism and active faulting in the central part of the trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico*, in Walawender, M. J., and Hanan, B.B., eds., Geological excursions in southern California and Mexico, Guidebook: Boulder, Geological Society of America, Annual Meeting, p. 224-243.

Suter, M., Carrillo-Martínez, M., y Quintero-Legorreta, O., 1996, *Macroseismic study of shallow earthquakes in the central and eastern parts of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico: Seismological Society of America, Bulletin*, v. 86, núm. 6, p. 1,952-1,963.

Suter, M., Quintero, O., y Johnson, C.A., 1992, *Active faults and state of stress in the central part of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico*. 1. The Venta del Bravo fault: *Journal of Geophysical Research*, v. 97, núm. B8, p. 11,983-11,994.

Suter, M., Quintero-Legorreta, O., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., y Farrar, E., 1995, *The Acambay graben; active intraarc extensión in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico: Tectonics*, v. 14, núm. 5, p. 1,245-1,262.

Tomás, R., Herrera G., Delgado, J., y Peña, F. (2009). *Subsidencia del Terreno*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 1, 173.

Trujillo-Candelaria, J.A., 1985, *Subsidencia de terrenos en la ciudad de Celaya, Gto.* En: Reunión sobre Asentamientos Regionales: México, D.F., Sociedad Mexicana de Suelos, Asociación Geohidrológica mexicana, p. 1-2.

Trujillo-Candelaria, J.A., 1991, *Fallamiento de terrenos por efecto de la sobreexplotación de acuíferos en Celaya, Guanajuato, México*, in XXIII Congress of the Association of International Hydrologists, Sobreexplotación de acuíferos: España, p.175-178.

Twiss R. J., Moores E.M. (1992). *Structural Geology*. W.H. Freeman and Company.

Urbina, F., Camacho, H. (1913). La Zona Megasísmica Acambay- Tixmadejé, Estado de México, conmovida el 19 de noviembre de 1912: Boletín de Instituto Geológico de México, 32, 141 pp.

Velásquez Torres, David (1980), *El valle de Toluca. Asentamientos Urbanos. Espacio Geográfico, Toluca*, Universidad Autónoma del Estado de México.

Wilches Chaux, Gustavo. "La Vulnerabilidad Global". En Maskrey, A. (ed.) *Los Desastres no son Naturales*. La Red. Tercer Mundo Editores, Colombia 1993.

11. Anexos

Tabla de datos estructurales de la ZMVT												
Orden	Localidad	Estructura	Unidad/Litología	Calle/Fracc./Av.	Delegación-Municipio	Coordenadas UTM-WGS84		Elevación msnm	Rumbo	Inclinación	Cuadrante de echado	Desplazamiento vertical
						N metros	E metros					
1	Cerro La Teresona	Fracturas planas de flujo	Derrame Lava-dacita	C. Alondiga de Granaditas	San Mateo Oxtotlán	2133685	428042	2760	N66E	78	SE	
2	Cerro La Teresona	Falla	Dacita-Andesita	Cerro La Teresona	San Mateo Oxtotlán	2134128	428122	2848	N58E	90		ND
3	Cerro La Teresona	Falla	Dacita-Andesita	Cerro La Teresona	San Mateo Oxtotlán	2134407	428589	2800	N55E	90		ND
4	Cerro La Teresona	Falla	Dacita-Andesita	Cerro La Teresona	San Mateo Oxtotlán	2134097	428345	2929	N60E	80	SE	ND
5	Cerro La Teresona	Falla	Dacita-Andesita	Cerro La Teresona	San Mateo Oxtotlán	2134276	429007	2816	N80E	90		ND
6	Cerro La Teresona	Falla	Dacita-Andesita	Cerro La Teresona	San Mateo Oxtotlán	2133643	428324	2817	N68E	90		ND
7	San Mateo Oxtotlán	Falla	Abanicos aluviales	C. Hidalgo	San Mateo Oxtotlán	2133298	428085	2727	S38E	60	SW	ND
8	San Mateo Oxtotlán	Falla	Abanicos aluviales	C. Benito Juárez	San Mateo Oxtotlán	2133265	428110	2727	S60E	90		ND
9	San Mateo Oxtotlán	Falla	Abanicos aluviales	C. Benito Juárez	San Mateo Oxtotlán	2133230	428164	2723	S60E	88	SW	ND
10	San Mateo Oxtotlán	Falla normal	Abanicos aluviales-volcanosedimento	Cerca Benito Juárez	San Mateo Oxtotlán	2133465	427866	2731	S55E	70	SW	ND
11	San Mateo Oxtotlán	Falla normal	Abanicos aluviales-volcanosedimento	Cerca Benito Juárez	San Mateo Oxtotlán	2133508	427939	2720	S60E	89	SW	ND
12	San Mateo Oxtotlán	Falla normal	Abanicos aluviales-volcanosedimento	Cerca Benito Juárez	San Mateo Oxtotlán	2133369	428018	2736	S60E	70	SW	ND
13	Toluca	Grieta	Lacustre y volcanosedimentos	Rio Verdiguil	Toluca	2133263	430381	2663	N80E	90		
14	Toluca	Grieta	Lacustre y volcanosedimentos	C. Quintana Roo	Toluca	2133173	430367	2663	N30E	90		
15	Colonia La Mora	Grieta	Lacustre y volcanosedimentos	C. Clemente Orozco	Santiago Miltepec	2134478	432349	2638	N80E	90		
16	La Pedrera	Grieta	Lacustre y volcanosedimentos	C. Pastor Velazquez	Santiago Miltepec	2134469	432395	2637	N80E	90		
17	Santiago Miltepec	Grieta	Lacustre y volcanosedimentos	Adolfo López Mateos	Santiago Miltepec	2135038	431800	2628	N27W	90		
18	Santiago Miltepec	Falla normal	Lacustre y volcanosedimentos	Lerdo de Tejada	Santiago Miltepec	2134911	431408	2633	N43E	88	SE	15cm
19	San Pedro Totoltepec	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Albert Einstein	San Pedro Totoltepec	2134348	436247	2608	N85E	90		15cm
20	San Pedro Totoltepec	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Cutiáhuac	San Pedro Totoltepec	2134676	437849	2600	N80E	90		25cm
21	San Pedro Totoltepec	Grieta	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Tolotzin	San Pedro Totoltepec	2134744	438588	2591	N85E	36	SE	
22	San Pedro Totoltepec	Grieta	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Tlatelolco	San Pedro Totoltepec	2134697	439131	2590	S43E	90		
23	San Pedro Totoltepec	Grieta	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Jesús García Lovera	San Pedro Totoltepec	2134697	439131	2590	S65E	90		
24	San Pedro Totoltepec	Grieta	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Jesús García Lovera	San Pedro Totoltepec	2134697	439131	2590	N80W	90		
25	San Pedro Totoltepec	Grieta	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Jesús García Lovera	San Pedro Totoltepec	2134697	439131	2590	N57E	90		
26	San Pedro Totoltepec	Grieta	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Jesús García Lovera	San Pedro Totoltepec	2134697	439131	2590	S65E	90		
27	San Pedro Totoltepec	Grieta	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Fracc. Jesús García Lovera	San Pedro Totoltepec	2134951	438760	2593	N15E	90		
28	San Pedro Totoltepec	Grieta	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Fracc. García Lovera	San Pedro Totoltepec	2134951	438760	2593	N10W	90		
29	San Pedro Totoltepec	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Industria automotriz	San Pedro Totoltepec	2133825	435114	2626	N65E	88	SE	ND
30	San Pedro Totoltepec	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. Juan Álvarez	San Pedro Totoltepec	2134204	435919	2618	N65E	80	SE	ND

Tabla 1 Tabla de datos estructurales de la ZMVT

Tabla de datos estructurales de la ZMVT												
Orden	Localidad	Estructura	Unidad/Litología	Calle/Fracc./Av.	Delegación-Municipio	Coordenadas UTM-WGS84		elevación metros msnm	Rumbo	Inclinación	Cuadrante de echado	Desplazamiento vertical
						N	E					
31	San Pedro Totoltepec	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. José Ma Morelos	San Pedro Totoltepec	2134535	436765	2609	N75E	87	SE	ND
32	San Pedro Totoltepec	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. Tizoc	San Pedro Totoltepec	2134622	438102	2600	E-W	90		ND
33	San Pedro Totoltepec	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. Tlatelolco II	San Pedro Totoltepec	2134748	438760	2599	E-W	90		ND
34	San Pedro Totoltepec	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. De San Pedro	San Pedro Totoltepec	2134760	440025	2594	N60E	90		ND
35	San Pedro Totoltepec	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Tlatelolco	San Pedro Totoltepec	2134916	2593	2593	N40E	90		ND
36	Santa Ana Tiapaltitlan	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	16 de Sept.	Santa Ana Tiapaltitlan	2131842	434126	2635	S30W	90		10cm
37	Santa Ana Tiapaltitlan	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Hidalgo	Santa Ana Tiapaltitlan	2131982	434153	2637	N13W	90		12cm
38	Santa Ana Tiapaltitlan	Grieta muro	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Federación	Santa Ana Tiapaltitlan	2131740	434121	2638	N10W	90		ND
39	Santa Ana Tiapaltitlan	fracturas	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. 2 de abril	Santa Ana Tiapaltitlan	2132125	434120	2631	N-S	90		ND
40	Santa Ana Tiapaltitlan	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. 2 de abril	Santa Ana Tiapaltitlan	2132126	434158	2633	N5W	90		20cm
41	Santa Ana Tiapaltitlan	fracturas en muro	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. 2 de abril	Santa Ana Tiapaltitlan	2132126	434158	2633	N15W	45	NE	ND
42	La Virgen	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Fracc. La Virgen	Metepec	2129165	438722	2592	S55W	90		30cm
43	La Virgen	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Fracc. La Virgen	Metepec	2129175	438784	2592	S68W	90		ND
44	La Virgen	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Fracc. La Virgen	Metepec	2129170	438910	2594	N75W	90		ND
45	La Virgen	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Fracc. La Virgen	Metepec	2129088	438414	2611	N75E	90		20cm
46	La Virgen	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Fracc. La Virgen	Metepec	2129126	438534	2599	S70E	88	NW	10cm
47	Cerrito de Metepec	Falla	escoria volcánica basáltica	Centro Metepec	Metepec	2128301	436331	2693	S70E	88	NW	ND
48	La Michoacana	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Pueblo Nuevo	Metepec	2128213	434663	2643	S55E	90		ND
49	Las Margaritas	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Palmas	Metepec	2128091	434380	2654	N73E	90		1m
50	Las Margaritas	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Palmas	Metepec	2128149	434570	2645	EW	44	N	ND
51	Las Margaritas	Falla normal	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Av. Ocotitlán	Metepec	2128136	434118	2661	S88W	38	NW	ND
52	Las Margaritas	Falla en la Calle	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Las Margaritas	Metepec	2128136	434118	2661	N5E	90		ND
53	Las Margaritas	Fractura	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Av. Ocotitlán	Metepec	2128171	434115	2665	N50W	80	NE	ND
54	Las Margaritas	Falla normal	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Camino Las Palmas	Metepec	2128165	434556	2656	S70E	80	NW	ND
55	Las Margaritas	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Camino Real a San Felipe	Metepec	2128092	434402	2659	S60E	85	NW	ND
56	Las Margaritas	fractura	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Camino a Metepec	Metepec	2127787	433563	2681	N40E	90		ND
57	Chapultepec	fractura	basalto	Cerro Chapultepec	Chapultepec	2123659	441792	2617	E-W	90		ND
58	Chapultepec	fractura	basalto	Cerro Chapultepec	Chapultepec	2123675	441441	2650	E-W	90		ND
59	San Pedro Totoltepec	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Calzada San Antonio	San Pedro Totoltepec	2135173	440495	2588	N22E	88	SE	25cm
60	San Pedro Totoltepec	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. 5 de Mayo	San Pedro Totoltepec	2135245	440557	2540	N40E	80	SE	30cm

Tabla 2 Continuación de la Tabla de datos estructurales de la ZMVT

Tabla de datos estructurales de la ZMVT												
Orden	Localidad	Estructura	Unidad/Litología	Calle/Fracc./Av.	Delegación-Municipio	Elevación			Rumbo	Inclinación	Cuadrante de echado	Desplazamiento vertical
						N	E	m snm				
						Coordenadas UTM-WGS84						
						metros	metros	msnm				
61	San Pedro Tototepic	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. San Felipe	San Pedro Tototepic	2135411	440757	2590	N45E	90	SE	30cm
62	Bulevard Aeropuerto	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. Bulevard Aeropuerto	San Pedro Tototepic	2135490	440905	2585	N45E	90		ND
63	San Antonio Abad	grietas	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. Rosas	San Pedro Tototepic	2135714	440593	2588	N70E	90		
64	San Pablo Autopan	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. Agustín Milán	San Pablo Autopan	2135671	440469	2562	N60E	70	SE	30cm
65	San Pablo Autopan	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Fracc. San Diego Linares	San Pablo Autopan	2143259	432973	2567	S60W	90		ND
66	San Pablo Autopan	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Fracc. San Diego Linares	San Pablo Autopan	2143238	433005	2591	S75W	90		20cm
67	San Pablo Autopan	falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Fracc. San Diego Linares	San Pablo Autopan	2143104	432862	2544	S35W	90		ND
68	Santiago Miltepec	Brecha de falla	Abanicos aluviales	Paseo Juana de Asbaje	Santiago Miltepec	2135143	431028	2670	S5W	32	NW	ND
69	Santiago Miltepec	casa con grietas	Abanicos aluviales	Paseo Juana de Asbaje	Santiago Miltepec	2134650	431056	2660	S10W	90		ND
70	Santa Barbara	Brecha de falla	Dacita	Paseo Juana de Asbaje	Santiago Miltepec	2134143	431154	2708	N55E	66	SE	ND
71	San Miguel Apinahuizco	Falla Grande	Dacita	Paseo de los Matlatzincas	San Luis Obispo	2134353	430230	2735	N15E	44	NE	ND
72	San Miguel Apinahuizco	Falla normal	Dacita	Paseo de los Matlatzincas	San Luis Obispo	2134353	430230	2735	N17W	84	NE	ND
73	San Miguel Apinahuizco	Falla normal	Dacita	Paseo de los Matlatzincas	San Luis Obispo	2134353	430230	2735	N15W	80	NE	ND
74	San Miguel Apinahuizco	Falla normal	Dacita	Paseo de los Matlatzincas	San Luis Obispo	2134353	430230	2735	N24W	64	NE	ND
75	San Miguel Apinahuizco	Falla normal	Dacita	Paseo de los Matlatzincas	San Luis Obispo	2134353	430230	2735	S52E	71	SE	ND
76	San Miguel Apinahuizco	Falla normal	Dacita	Paseo de los Matlatzincas	Santiago Miltepec	2134353	430230	2700	S35E	85	SE	ND
77	Parque Bosque de La Mora	Falla Lateral	Dacita	La Pedrera-La Mora	Santiago Miltepec	2134111	432248	2660	S35E	84	NE	ND
78	Parque Bosque de La Mora	Falla	Dacita	La Pedrera-La Mora	Santiago Miltepec	2134111	432248	2660	S49E	80	NE	ND
79	Parque Bosque de La Mora	Falla	Dacita	La Pedrera-La Mora	Santiago Miltepec	2134111	432248	2660	S25E	80	NE	ND
80	Parque Bosque de La Mora	Falla	Dacita	La Pedrera-La Mora	Santiago Miltepec	2134111	432248	2660	S9W	80	NW	ND
81	Parque Bosque de La Mora	Falla	Dacita	La Pedrera-La Mora	Santiago Miltepec	2134111	432248	2660	S10W	80	NW	ND
82	Col. Niños Heroes	Falla	Dacita	Paseo de los Matlatzincas	Santiago Miltepec	2133650	431760	2678	S70E	80	NE	ND
83	Santiago Tlaxomulco	Fracturas aluvial-fluvial		C. Insurgentes	Tlaxomulco	2135364	429544	2690	S85E	90		
84	Santiago Tlaxomulco	Falla aluvial-fluvial	aluvial-fluvial	C. Niños Heroes	Santiago Tlaxomulco	2134891	429355	2690	N75E	90		ND
85	Santiago Tlaxomulco	Falla aluvial-fluvial	aluvial-fluvial	C. Niños Heroes	Santiago Tlaxomulco	2134891	429355	2690	N10E	90		ND
86	Santiago Tlaxomulco	Falla aluvial-fluvial	aluvial-fluvial	C. Niños Heroes	Santiago Tlaxomulco	2134891	429355	2690	S35E	90		ND
87	Santiago Tlaxomulco	Falla normal	aluvial-fluvial	C. Niños Heroes	Santiago Miltepec	2134847	429385	2700	N20W	90		ND
88	La Teresona	falla normal	aluvial-fluvial	C. Agustín Milán	Toluca	2134259	429156	2760	S55W	75	NW	
89	La Teresona	Fractura	aluvial-fluvial	C. Agustín Milán	Toluca	2134259	429156	2760	S70W	75	NW	
90	La Teresona	Fractura	aluvial-fluvial	C. Agustín Milán	Toluca	2134259	429156	2760	N13W	62	NE	
91	La Teresona	Falla	aluvial-fluvial	C. Agustín Milán	Toluca	2134275	429125	2760	N80E	68	SE	
92	Industria Automotriz	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. industria automotriz	Santa Maria Tototepic	2133632	439691	2584	NS	90		ND
93	Zona Industrial	Falla	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. Benito Juárez	Santa Maria Tototepic	2134923	434787	2592	NS	90		ND
94	Zona Industrial	Falla normal	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	Av. Industria automotriz	Santa Maria Tototepic	2133828	435292	2619	N60E	90		40cm
95	Zona Industrial	Falla normal	fluvio-lacustre y volcanosedimentos	C. Robert Bosh	Santa Maria Tototepic	2133599	434895	2625	N40E	90		20cm
96	Parque Sierra Morelos	Falla normal	Andesita-Dacita	Parque Sierra Morelos	San Mateo Oxtotlán	2135669	427930	2736	S32W	75	NW	
97	Cerro Coatepec	Falla	Andesita-Dacita	Poniente Cerro Coatepec	Toluca	2132522	428738	2731	S30W	80	NW	ND
98	Cerro Coatepec	Falla	Andesita-Dacita	Estac. Fac. Geografía	Toluca	2132768	428864	2703	N32E	85	SE	10cm
99	Cerro Coatepec	Falla	Andesita-Dacita	Fac. Ingeniería	Toluca	2132275	428876	2720	N30E	80	SE	ND
100	Cerro Coatepec	Falla	Andesita-Dacita	Fac. Ingeniería	Toluca	2132354	428876	2713	N30E	87	SE	ND
101	Cerro Coatepec	Falla	Abanicos aluviales-volcanosedimento	Bulevard Universitario	Toluca	2132374	429044	2696	N-S	90	ND	ND
102	Cerro Coatepec	Falla	Abanicos aluviales-volcanosedimento	Bulevard Universitario	Toluca	2132147	429058	2697	N-S	90	ND	ND
103	Parque El Calvario	Fractura	Andesita-Dacita	C. Quintana Roo	Toluca	2132279	430458	2702	N40E	90		
104	Parque El Calvario	Fractura	Andesita-Dacita	C. Quintana Roo	Toluca	2132517	430642	2689	N48E	90		

Tabla 3 Continuación de la Tabla de datos estructurales de la ZMVT